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 : Amira Mohammed Toufik

Boulifa Ayman Taha

Thème

Prédiction Intelligente de la Micro-dureté des Surfaces après Fraisage

Soutenue publiquement le 24/06/2019 devant le jury :

AMEUR Toufik	MCB	Université Kasdi Merbah Ouargla	Président
BELLOUFI Abderrahim	MCA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Rapporteur
ABDELKRIM Mourad	MCA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examinateur

Année Universitaires : 2018/2019

Remerciement

Avant tout, nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous 'a donnée durant ces longues années et de nous avoir illuminé et ouvert les voies du savoir, et pour nous avoir accordé le courage pour élaborer ce travail.

Nous avons sincèrement pris beaucoup de plaisir pendant toute la durée de ce modeste travail. Nous avons eu la chance d'avoir un encadrement scientifique de qualité. Nous remercions donc très chaleureusement notre encadrant ***Dr. Abderrahim Belloufi*** *d'avoir accepté de diriger ce travail et d'avoir mis à notre 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. Ameur Toufik*** *pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il nous 'a fait en présidant le jury.*

Nos remerciements tout particulièrement ***Dr. Mourad. Abdelkrim*** *pour nous avoir aidés durant notre cycle de master et a accepté aussi d'évaluer ce travail et d'en faire partie du jury de soutenance.*

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

A tous les étudiants de notre promotion, et à tous les enseignants et employés j'adresse un grand merci pour leur soutien et leurs aides durant notre carrière d'apprentissage.

Dédicace

Nous tenons à dédier ce modeste travail à :

À nos grands-parents

À nos parents

À nos frères

À nos sœurs

À nos familles

À tous nos enseignants

À tous nos amis et nos collègues

À tous qui nous ont donné de l'aide un jour

Nous tenons aussi à rendre hommage à tous nos chers décédés que dieu les bénisse.

Table de Matières

Introduction générale…….…….. 02

Chapitre I

Etude Bibliographique sur le Procédé de Fraisage

I.1 Introduction…….…… 05
I.2 Fraisage……05
I.2.1 Définition……...…….……..……...05
I.2.2 Fraiseuse..…….…....…...……... 06
I.2.3 La fraise..……..…….……... 07
I.2.4 Types de fraisage…… 09
I.2.5 Mode d'action de la fraise……...…….……...… 10
I.2.6 Les opérations de fraisage……...…….……...12
I.3 Conditions de coupe…….…….……... 13
I.3.1 La vitesse de broche……...…..…… 13
I.3.2 La vitesse de coupe……...……..……..……...14
I.3.3 La vitesse d'avance……..……..... 14
I.3.4 L'avance par tour……..15
I.3.5 L'avance par dent…… 15
I.3.6 La profondeur de coupe…… 15
I.4 Intégrité de la surface……16
I.5 La dureté……...…….…….. 18
I.5.1 Définition..……...…..…..…….…….……... 18
I.5.2 Essais de dureté...…….……18
I.5.3 A quoi sert l'essai de dureté ?.....19
I.5.4 Les types d'essai de dureté.....19
I.5.5 Le choix de la méthode d'essais de dureté…… 19
I.5.6 La microdureté des surfaces usinées……20
I.5.7 Les tests utilisés pour mesurer la microdureté……..20

I.5.8 Échelles de mesure de dureté…… 23
I.6 Les facteurs affectant la microdureté des surfaces usinées par fraisage..…… 23
I.7 Conclusion…… 24

Chapitre II

Revue de Littérature

II.1 Introduction…… 26
II.2 Travaux analysés…… 26
II.3 Influence des conditions de coupe sur la micro-dureté…….... 28
II.3.1 Influence de la vitesse de coupe (ou vitesse de la broche)..... 28
II.3.2 Influence de l'avance……... 35
II.3.3 Influence de la profondeur de passe…… 37
II.4 Conclusion…….…….....40

Chapitre III

La Logique Floue

III.1 Introduction……..…….....42
III.2 Historique ……..……..... 42
III.3 Les domaines d'applications de la logique floue ……...…… 42
III.4 La logique floue ……..……...43
III.5 Logique floue et la logique classique…….…….……... 43
III.6 Le principe de fonctionnement d'un système flou……..... 45
III.7 Les variables linguistiques……...……..……..... 46
III.8 Sous-ensembles flous……46
III.9 Fonction d'appartenance…… 47
III.10 Les opérateurs de la logique floue…… 50
III.11 Conclusion……..……..... 50

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1 Introduction……..……..... 52
IV.2 Procédure et données expérimentales……..…….. 52
IV.3 Système floue……..……...……53

IV.4 Modélisation floue……..……... 53
IV.4.1 Les variables floues…..……...……..…… 53
IV.4.2 Définition des variable linguistiques…… 53
IV.4.3 Les fonction d'appartenance…….. 55
IV.5 Les règles floues…….……... 60
IV.6 Résultats et discussion ……...……... 61
IV.6.1 Validation des modèles élaborés ……...……... 64
IV.6.2 Etude de la précision et de l'erreur du système flou……..…….. 65
IV.6.3 Validation des résultats ……...……66
IV.7 Représentation schématique des résultats ….…….……..…….....67
IV.8 Conclusion……..……... 68
Conclusion générale……..…… 69
Références bibliographiques…….……..... 70

Liste des Figures

Chapitre I

Etude Bibliographique sur le Procédé de Fraisage

Figure I.1 Fraiseuse universelle MT 200…… 6

Figure I.2 Types d'arrêtes tranchantes…… 7

Figure I.3 Type de tailles de fraise…….. 7

Figure I.4 Quelques formes de fraises…… 8

Figure I.5 Les types de dentures de la fraise……... 8

Figure I.6 Le nombre de dents de la fraise…….. 8

Figure I.7 Le diamètre d'une fraise…… 9

Figure I.8 Mode de fixation de la fraise…….. 9

Figure I.9 Fraisage en roulant…… 9

Figure I.10 Fraisage en bout…….. 10

Figure I.11 Fraisage en opposition…… 11

Figure I.12 Fraisage en avalant…….. 12

Figure I.13 Vitesse de la broche…… 13

Figure I.14 Vitesse de coupe…… 14

Figure I.15 Les avances…… 14

Figure I.16 Avance par dent et avance par tour…… 15

Figure I.17 Largeur et profondeur de coupe…….. 16

Figure I.18 Schéma des différentes couches affectées par un procédé de fabrication……... 17

Figure I.19 Exemple de machines d'essai de dureté…… 18

Figure I.20 Teste de dureté Vickers…….. 21

Figure I.21 Désignation de l'essai Vickers……... 21

Figure I.22 Teste de dureté Knoop (1)…….. 22

Figure I.23 Teste de dureté Knoop (2)…….. 22

Figure I.24 Echelles de mesure de dureté…….. 23

Chapitre II

Revue de Littérature

Figure II.1 Evolution de la microdureté avec la vitesse de broche……... 29

Figure II.2 L'effet de la vitesse de coupe sur la micro-dureté……... 30

Figure II.3 L'effet de la vitesse de broche sur la microdureté cas de fraisage à sec……. 31

Figure II.4 Représentation de la microstructure du matériau de base……... 31

Figure II.5 Microstructure des surfaces fraisées à sec à (a) 120 tr / min, (b) 150 tr / min et (c) 180 tr / min…… 32

Figure II.6 L'effet de vitesse de broche sur la micro-dureté cas de fraisage sous arrosage.. 32

Figure II.7 Microstructure des surfaces fraisées sous arrosage à (a) 120 tr/min, (b) 150 tr/min et (c) 180 tr/min…… 33

Figure II.8 Evolution de la microdureté avec la vitesse de coupe…… 33

Figure II.9 L'effet de Vc sur la microdureté cas des plaquettes en carbure cémenté…… 34

Figure II.10 L'effet de Vc sur la microdureté cas des plaquettes en céramique……. 34

Figure II.11 L'effet de l'avance par dent sur la microdureté……... 35

Figure II.12 L'effet de l'avance sur la microdureté pour une vitesse de coupe de Vc=160 m/min…….. 36

Figure II.13 L'effet de l'avance par dent sur la micro-dureté cas des plaquettes en carbure cémenté……36

Figure II.14 L'effet de l'avance par dent sur la microdureté cas des plaquettes en céramique…… 37

Figure II.15 L'effet de la profondeur de coupe sur la micro-dureté…… 38

Figure II.16 L'effet de profondeur de coupe sur la microdureté lors du fraisage à sec……... 38

Figure II.17 L'effet de profondeur de coupe sur la microdureté lors du fraisage sous arrosage……39

Figure II.18 L'effet de profondeur de coupe sur la microdureté cas des plaquettes en carbure cémenté…….....39

Figure II.19 L'effet de profondeur de coupe sur la microdureté cas des plaquettes en céramique…… 40

Chapitre III

La Logique Floue

Figure III.1 Logique classique…… 44

Figure III.2 Logique floue……...44

Figure III.3 Comparaison entre fonction caractéristique d'un ensemble classique et fonction d'appartenance d'un ensemble flou……..... 44

Figure III.4 Schéma de principe de fonctionnement d'un système flou…… 45

Figure III.5 Fonction caractéristiques d'un sous-ensemble classique…… 47

Figure III.6 Fonction caractéristiques d'un sous-ensemble flou……47

Figure III.7 Fonction d'appartenance pour la variable linguistique température…… 48

Figure III.8 Fonction d'appartenance Triangulaire…… 48

Figure III.9 Fonction d'appartenance Trapézoïdale……49

Figure III.10 Fonction d'appartenance Gaussienne…….. 49

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Figure IV.1 Entrées et sorties du système flou……... 53

Figure IV.2 Variables linguistiques pour la profondeur de passe……...54

Figure IV.3 Variables linguistiques pour l'Avance…… 54

Figure IV.4 Variables linguistiques pour la vitesse de coupe……54

Figure IV.5 Les valeurs de la microdureté pour l'ensemble des essais…….. 55

Figure IV.6 Variables linguistiques pour la microdureté……55

Figure IV.7 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la profondeur de passe…… 56

Figure IV.8 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour l'avance par dent……56

Figure IV.9 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la vitesse de coupe…….. 56

Figure IV.10 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la microdureté……. 57

Figure IV.11 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la profondeur de passe…... 57

Figure IV.12 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour l'avance par dent……58

Figure IV.13 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la vitesse de coupe……. 58

Figure IV.14 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la microdureté…… 58

Figure IV.15 Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour la profondeur de passe…59

Figure IV.16 Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour l'avance par dent…… 59

Figure IV.17 Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour la vitesse de coupe……. 59

Figure IV.18 Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour la microdureté……60

Figure IV.19 Variation de la microdureté (trapézoïdale, triangulaire et Gaussienne) en fonction du nombre d'essais……63

Figure IV.20 Comparaison de la prédiction des modèles de logique floue avec les résultats mesurés de la microdureté……... 64

Figure IV.21 Comparaison de la microdureté prédite et expérimental……66

Figure IV.22 Variation de la micro-dureté prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres de coupe……67

Liste des Tableaux

Chapitre I
Etude Bibliographique sur le Procédé de Fraisage

Tableau I.1 Avantages et inconvénients du fraisage en opposition……10

Tableau I.2 Avantages et inconvénients du fraisage en avalant…….. 12

Tableau I.3 Principales opérations rencontrées en fraisage……12

Chapitre II
Revue de Littérature

Tableau II.1 Configuration des paramètres de coupe……... 26

Tableau II.2 Composition de l'acier de carbone (CS) en %……. 27

Tableau II.3 Paramètres de coupe utilisés……28

Chapitre IV
Résultats et Discussions

Tableau IV.1 Données expérimentales……..……52

Tableau IV.2 Valeurs limites pour les entrées et les sorties……..…53

Tableau IV.3 Les règles floues……...…… 60

Tableau IV.4 Les résultats du système flou……...……61

Tableau IV.5 résultats du système flou pour les sept essais de vérification……...64

Tableau IV.6 Les résultats du système flou……...……66

Nomenclature

Symbole	Unité	Désignation
a_e	mm	Profondeur de passe axial
a_p	mm	Profondeur de passe radial
e_i	%	Erreur
f	mm/tr	Avance par tour
f_z	$mm/dent$	Avance par dent
A	%	Précision
D	mm	Diamètre
$Exp.$		Expérimental
F	N	Charge
$Gauss.$		Gaussienne
H	H_B	Dureté BRINELL
H	H_K	Dureté KNOOP
H	H_L	Dureté LEEB
H	H_R	Dureté ROCKWELL
H	H_S	Dureté SHORE
H	H_V	Dureté VICKERS
L	μm	Longueur diagonale
N	$tr/\min$	vitesse de rotation
$Trap.$		Trapézoïdale
$Trian.$		Triangulaire
V_c	$m/\min$	vitesse de coupe
V_f	$mm/\min$	vitesse d'avance
Z		Nombre de dent de l'outil
γ	$Degré$	Angle
σ		L'écart type

Introduction Générale

Aujourd'hui l'usinage est devenu accessible presque pour tout le monde, il n'est plus exclusif juste chez certains pays comme c'était auparavant. Ce qui a créé une concurrence acharnée dans le monde de l'industrie pour développer des nouveaux techniques qui permettent d'usiner des produits finis de très haute qualité en un temps-record pour le plus faible cout possible pour conquérir le marché mondial.

Le fraisage est l'un des plus importants procédés d'usinage. Il joue un rôle important dans la fabrication des pièces mécaniques.

Les opérations de fraisage ont un impact important sur l'efficacité du travail et sur l'intégrité de la surface de la pièce. Le fraisage dur se caractérise par une contrainte élevée, une vitesse de déformation et une température élevées pendant le processus de formation de copeaux, ainsi que par un temps d'interaction court entre l'outil et la pièce. Les charges thermiques / mécaniques très localisées et rapides entraînent des modifications de la micro-dureté des surfaces usinées.

Ces modifications sont causées par les températures élevées dans la zone de coupe qui entraînent des déformations plastiques (contraintes résiduelles), des réactions chimiques se produisant dans l'interface copeau-outil et des modifications de la couche de surface (microfissures, rugosité). La surface de la pièce après usinage résiste généralement à l'effet de la plupart des contraintes survenant au cours du processus d'usinage, ainsi qu'à l'effet de nombreux facteurs environnementaux différents. Cependant, des conditions de coupe mal choisies peuvent réduire l'efficacité de la production.

Au cours des dernières décennies, de nombreuses expériences ont été menées pour rechercher les conditions qui ont influencé le changement de la micro-dureté des surfaces usinées. Ces expériences sont énormément difficiles et nécessitent beaucoup de temps et de matériel.

Ainsi quelques méthodes de prédiction ont été développées pour résoudre le problème de changement de la micro-dureté des surfaces usinées et ce pour leur capacité de modélisation des différents phénomènes.

L'avancement concernant l'utilisation des approches numériques pour la prédiction de la micro-dureté des surfaces après usinage est en retard par rapport aux autres progrès obtenus dans l'industrie.

Nous proposons dans ce mémoire d'utiliser l'approche de la logique floue pour étudier l'effet des paramètres de coupe sur la micro-dureté des surfaces usinées par fraisage.

Le mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur le procédé de fraisage.

Le deuxième chapitre une synthèse bibliographique sur l'ensemble des travaux qui traitent le problème de changement de la micro-dureté des surfaces après fraisage.

Le troisième chapitre va mettre l'accent sur la méthode utilisée pour la résolution de notre problème (la logique floue).

Le quatrième chapitre aborde la formulation et l'implantation d'un modèle pour la prédiction de la micro-dureté des surfaces après fraisage.

CHAPITRE I

Etude Bibliographique sur le Procédé de Fraisage

I.1. Introduction

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces par enlèvement de copeaux. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. L'un des principaux processus d'usinage est le fraisage qui consiste à enlever à l'aide d'une fraise rotative de la matière en faisant avancer la fraise dans une pièce. Cela peut être fait en faisant varier la direction sur un ou plusieurs axes, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Le fraisage couvre une grande variété d'opérations et de machines différentes, allant des petites pièces aux grandes opérations de fraisage multiples. Il s'agit de l'un des procédés les plus couramment utilisés pour l'usinage de pièces avec des tolérances précises. Le fraisage a été développée au 19ème siècle, alors que presque tous les autres procédés d'usinage sont connues depuis l'Antiquité [1].

Dans ce chapitre nous allons voir tout ce qui concerne le fraisage comme la machine-outil utilisée et aussi les outils (fraises) utilisées, les types de fraisage, les modes d'action de la fraise, les opérations de fraisage, les conditions de coupe dans le fraisage, et nous allons voir aussi un aspect important de l'intégrité de surface d'une pièce usinée qui est la microdureté de surface.

I.2. Fraisage

I.2.1. Définition

Le fraisage est, dans son principe, un procédé de fabrication mécanique par coupe (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, toutefois, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction. L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux. Les avantages du fraisage sont un rendement élevé, une bonne finition de la surface et une haute précision, ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des gorges, mais son efficacité en contournage est en croissance grâce à l'utilisation des techniques CNC (Computerized Numerical Control) [2].

I.2.2. Fraiseuse

a) Définition

Une fraiseuse est une machine-outil utilisée pour usiner tous types de pièces mécaniques, à l'unité ou en série, par enlèvement de matière à partir de blocs ou parfois d'ébauches estampées ou moulées, à l'aide d'un outil coupant nommé fraise. En dehors de cet outil qui lui a donné son nom, une fraiseuse peut également être équipée de foret, de taraud ou d'alésoir.

b) Critère de classification des fraiseuses

Les fraiseuses peuvent être classé selon plusieurs critère (direction de l'axe principal, selon le degré d'automatisation, selon la taille et la puissance, le nombres d'axes, selon la précision et le nombre de broches…etc.)

Dans notre cas on va donner juste un seul exemple celui de la fraiseuse universelle conventionnelle : La machine de base est une fraiseuse à axe horizontal dont la table est orientable ; les mouvements d'avance sont donnés à la table ; l'arbre porte-fraise est animé du mouvement de rotation uniquement. La machine est conçue de telle manière qu'elle peut recevoir une tête universelle et des équipements spéciaux tels que : appareils diviseurs, tables circulaires, appareil à mortaiser, etc. Elle permet en principe l'exécution de toutes les opérations courantes : son universalité est due surtout à la possibilité de la convertir en fraiseuse horizontale ou verticale et de pouvoir assurer l'entraînement des appareils diviseurs [3].

Figure I.1 *Fraiseuse universelle MT 200 [4].*

I.2.3. La fraise

L'outil – appelé fraise – est toujours animé d'un mouvement de rotation autour de son axe Mc (mouvement de coupe). Il est situé et bloqué sur un porte – fraise, lui–même fixé dans la broche de la machine, Les caractéristiques de la fraise sont [5] :

a) Types d'arrêtes tranchantes

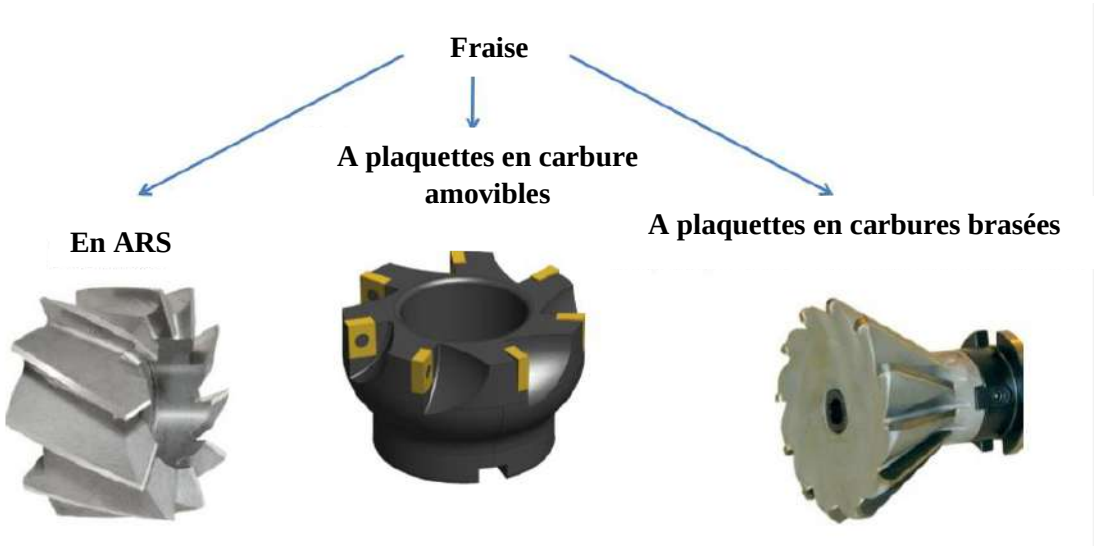


Figure I.2 *Types d'arrêtes tranchantes [5].*

b) La taille

Suivant le nombre d'arêtes tranchantes par dent, il existe des fraises : une taille, deux tailles ou trois tailles.

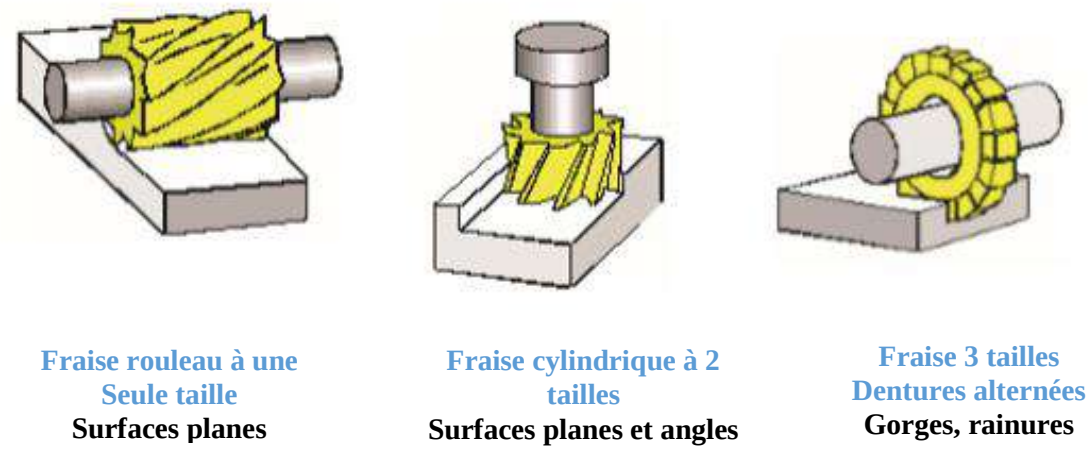


Figure I.3 *Type de tailles de fraise [3].*

c) La forme

Suivant le profil des génératrices par rapport à l'axe de l'outil, il existe des fraises cylindriques, coniques et des fraises de forme…etc.

Fraise cylindrique

Fraise conique

Fraise de forme

Figure I.4 *Quelques formes de fraises [5].*

d) La denture

Suivant le sens d'inclinaison des arêtes tranchantes par rapport à l'axe de la fraise, il existe les dentures hélicoïdales à droites ou à gauche et les dentures à double hélice alternées. Si l'arête tranchante est parallèle à l'axe de la fraise, la denture est droite.

Dentures hélicoidale à droite

Dentures hélicoidale à gauche

Dentures à double Hélice alternées

Dentures droite

Figure I.5 *Les types de dentures de la fraise [5].*

e) Nombre de dents

Une fraise est également caractérisée par son nombre de dents.

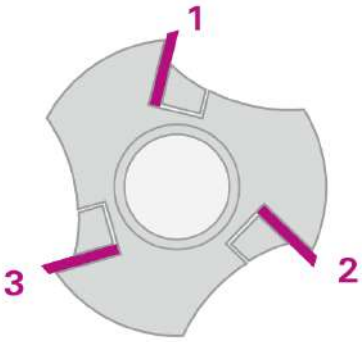


Figure I.6 *Le nombre de dents de la fraise [6].*

f) Dimensions

- Pour une fraise deux tailles : diamètre et hauteur taillée.
- Pour une fraise trois tailles : diamètre de l'outil, épaisseur, diamètre de l'alésage.
- Pour une fraise conique pour queue d'aronde : l'angle, le diamètre de l'outil et l'épaisseur.

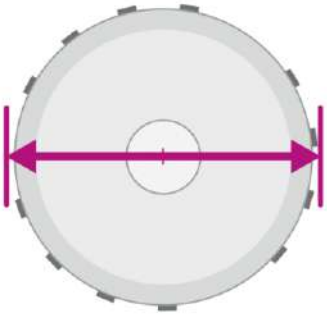


Figure I.7 *Le diamètre d'une fraise [6].*

g) Mode de fixation

La fixation peut être grâce à un trou lisse ou taraudé, à queue cylindrique ou conique...

Fraise à trou lisse | **Fraise à trou taraudé** | **Fraise à queue cylindrique** | **Fraise à queue conique**

Figure I.8 *Mode de fixation de la fraise [5].*

I.2.4. Types de fraisage

Selon l'état de surface souhaité, le type de la machine, le type de l'outil, les dimensions des surfaces à usiner, la position des surfaces sur la machine, les dimensions de la fraise et le débit souhaité, il existe deux types de fraisage, à savoir [5] :

a) Le fraisage en roulant

Lors du fraisage en roulant l'axe de la fraise est parallèle à la surface usinée.

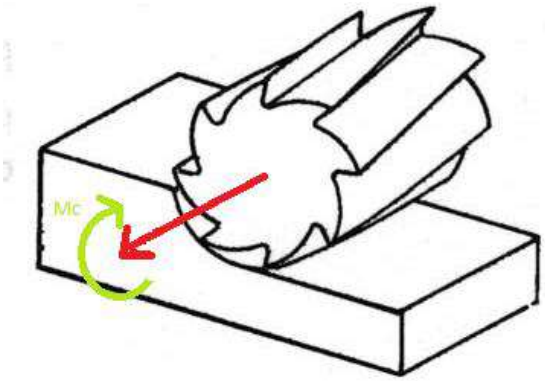


Figure I.9 *Fraisage en roulant [7].*

b) Le fraisage en bout

Lors du fraisage en bout l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface fraisée.

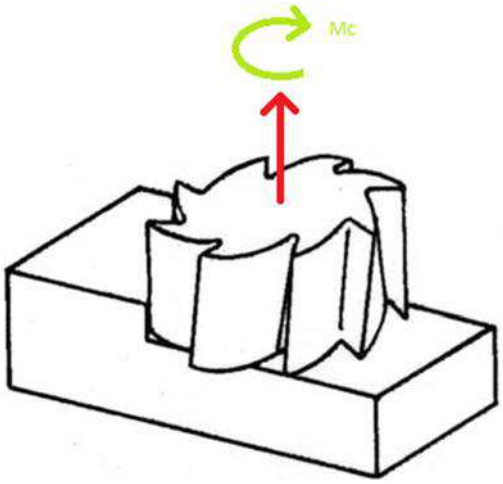


Figure I.10 *Fraisage en bout [7].*

I.2.5. Mode d'action de la fraise

a) Fraisage en opposition

- Principe :

  On dit que le fraisage est en opposition (ou conventionnel) lorsque le sens de l'avance est opposé au sens de rotation de la fraise au niveau de la coupe.

- Formation du copeau :

  Au début de la coupe, le tranchant de la dent glisse sur la surface de la pièce, le copeau a alors une épaisseur nulle. Ensuite, la dent pénètre lentement dans la matière pour atteindre sa profondeur maximum à la fin de la coupe.

- Avantages et inconvénients :

  Le tableau ci-dessus illustre les avantages et les inconvénients du fraisage en opposition.

Tableau I.1 Avantages et inconvénients du fraisage en opposition [3].

Avantages	Inconvénients
1. Lors de l'arrachement, les dents de la fraise soulèvent les impuretés éventuelles	1. Lorsque la fraise entre en prise avec la matière, la dent refuse de tailler à cause du copeau minimum. Il s'ensuit que l'outil frotte exagérément sur la pièce, s'use et détériore la surface usinée.

Avantages	Inconvénients
	2. À la suite de cette usure, la pression devient trop importante et à chaque sortie de dent, l'outil plonge dans la matière. Il y a alors production de marques de broutage et l'état de surface n'est pas bon. 3. L'effort de coupe tend à soulever la pièce et la table sur laquelle elle est fixée. Ce qui demande un blocage de la pièce beaucoup plus conséquent.

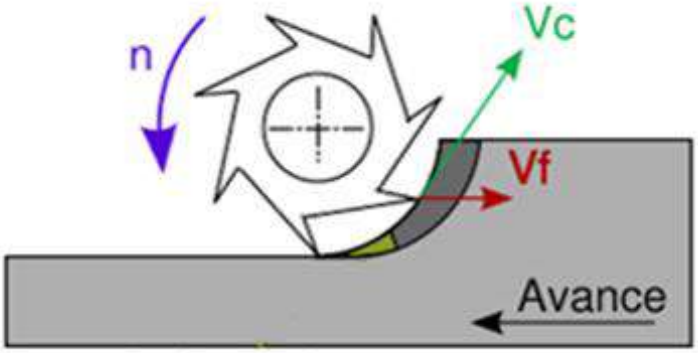


Figure I.11 *Fraisage en opposition [8].*

b) Fraisage en avalant

- <u>Principe :</u>

  On dit que le fraisage se fait en avalant (ou en concordance) lorsque le sens de l'avance est identique au sens de rotation de la fraise au niveau de la coupe.

- <u>Formation du copeau :</u>

  Au début de la coupe, le copeau est à son épaisseur maximale, pour diminuer au fur et à mesure et se terminer par une valeur nulle.

- <u>Avantages et inconvénients :</u>

  Le tableau ci-dessus illustre les avantages et les inconvénients du fraisage en avalant.

Tableau I.2 Avantages et inconvénients du fraisage en avalant [3].

Avantages	Inconvénients
1. L'effort de coupe applique d'avantage la pièce sur la table et celle-ci sur ses glissières.	1. Il se produit une contrainte due aux chocs sur l'arête de coupe. Ceci implique l'utilisation d'une arête de coupe plus tenace. 2. Il importe de veiller à ce que le rapport entre le nombre de dents et la profondeur de passe soit tel qu'il n'y ait jamais une seule dent en prise. 3. Ce mode de fraisage demande un dispositif de rattrapage de jeu sur la machine.

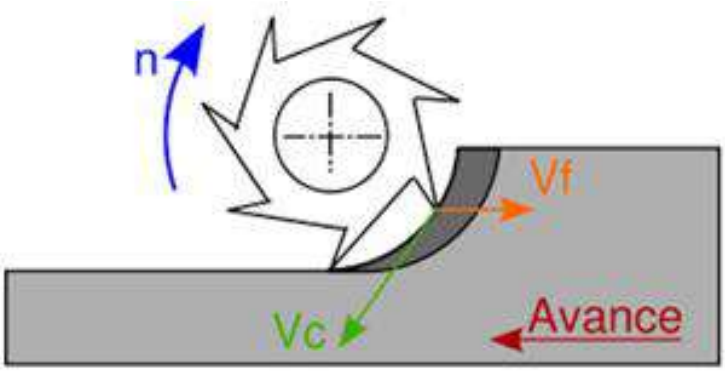
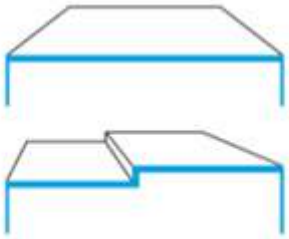


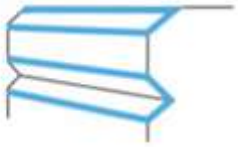
Figure I.12 *Fraisage en avalant [8].*

I.2.6. Les opérations de fraisage

La liste des opérations dépend bien sûr de la pièce à fabriquer, mais on retrouve globalement les opérations suivantes [2] :

Tableau I.3 Principales opérations rencontrées en fraisage [2].

Opération	Schématisation
Surfaçage-dressage (fraise à surfacer, fraise à rainurer)	

Opération	Schématisation
Dressage, rainurage et fraisage longitudinal (fraise à rainurer, fraise à surfacer-dresser, fraise deux tailles, fraise-disque)	
Poches (fraise à rainurer à dent perçante, fraise à surfacer avec plaquettes rondes, fraises à rainurer)	
Profils (fraise à bout sphérique)	
Rainures et tronçonnage (fraise-scie, fraise à gorges, fraise à surfacer-dresser)	
Chanfreins (fraise à chanfreiner, fraise à surfacer, fraise deux tailles, fraise à rainurer)	

I.3. Conditions de coupe

Pour régler les paramètres de l'opération de fraisage, il convient en premier lieu d'établir quelques définitions s'appliquant aux caractéristiques dynamiques de l'outil de fraisage dont le diamètre (D) se déplace contre la pièce [2].

I.3.1. La vitesse de broche

La vitesse de la broche (N en $tr/\min$) est le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil effectue par minute[2].

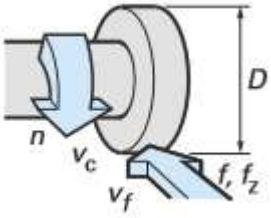


Figure I.13 *Vitesse de la broche [2].*

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

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 de coupe

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'efficacités par l'outil concerné. La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par les formules suivantes (figure I.13 et I.14) [2] :

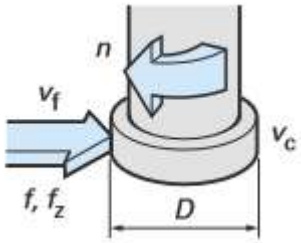
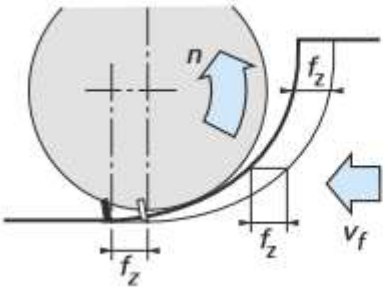


Figure I.14 *Vitesse de coupe [2].*

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

I.3.3. La vitesse d'avance

La vitesse d'avance ou l'avance par minute V_f ($mm / \min$) est le mouvement de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps (figure I.15) [2].



N	**vitesse de broche (tr/min)**
Vc	**vitesse de coupe (m/min)**
D	**diamètre de l'outil (m)**
Vf	**avance par minute (mm/min)**
f	**avance par tour (mm/tr)**
fz	**avance par dent (mm/dent)**

Figure I.15 *Les avances [2].*

$$V_f = f_z \times Z \times N \quad \text{(I.3)}$$

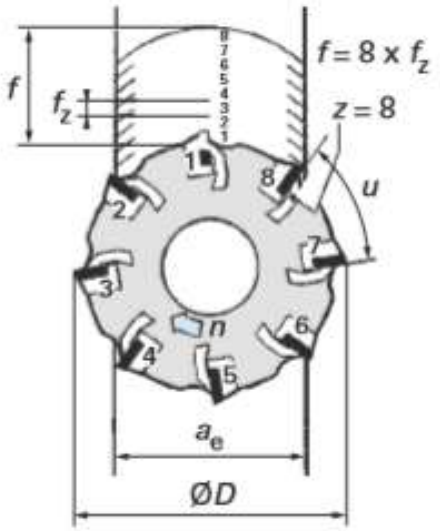
I.3.4. L'avance par tour

L'avance par tour f (mm/tr) elle indique de combien l'outil avance au cours d'un seul tour voir la figure I.15 [2].

$$f = \frac{V_f}{N} \tag{I.4}$$

I.3.5. L'avance par dent

L'avance par dent f_z ($mm/dent$), comme il est indiqué dans la figure I.15, est un important paramètre en fraisage. La fraise étant un outil à arêtes multiples, il faut en effet disposer d'un moyen de mesure pour contrôler que chacune de ces arêtes travaille dans des conditions satisfaisantes. La capacité d'enlèvement de matière de chaque dent est l'élément limitatif au niveau des performances de l'outil. L'avance par dent indique la distance linéaire parcourue par l'outil alors qu'une certaine dent est engagée. L'avance par dent représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle peut donc être exprimée en fonction du nombre d'arêtes de l'outil (Z) et de l'avance par minute, ou sous forme d'avance par tour (figure I.16) [2].



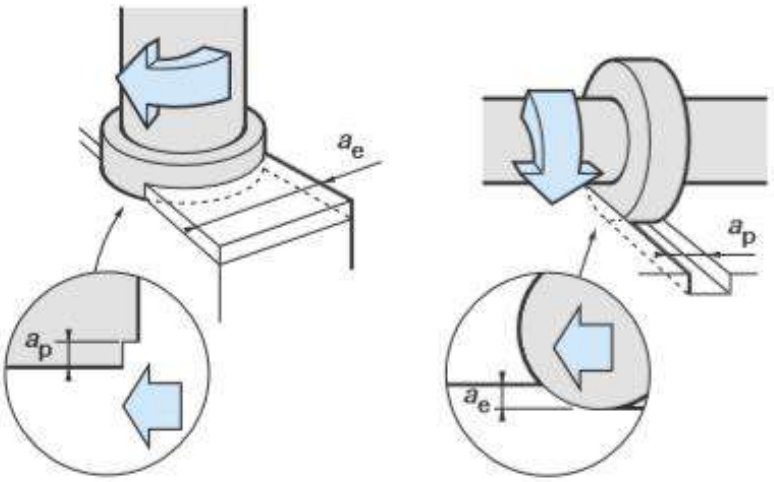
Z nombre d'arêtes de l'outil
f avance par tour (mm/tr)
fz avance par dent (mm/dent)
ae largeur de coupe (mm)
u pas de la fraise

Figure I.16 *Avance par dent et avance par tour [2].*

$$f_z = \frac{V_f}{N \times Z} \tag{I.5}$$

I.3.6. La profondeur de coupe

La profondeur de coupe (passe), qui peut être axiale (a_p) pour le surfaçage ou radiale (a_e) pour le fraisage d'épaulements, elle 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 [2].



a_e largeur de coupe radiale
a_p profondeur de coupe axiale

Figure I.17 *Largeur et profondeur de coupe [2].*

I.4. Intégrité de la surface

En premier lieu, il est nécessaire de définir la notion d'intégrité de surface. Une surface se définit comme l'interface entre la pièce et son environnement. Cette surface doit donc posséder les caractéristiques adaptées à l'usage à laquelle est destinée. Le terme intégrité de surface fait référence aux spécifications de cette surface qui dépendent du domaine d'utilisation [9] :

- Mécanique (spécification d'états de surface et de résistance aux efforts, dureté…).
- Métallurgique (spécification de résistance à la corrosion, de microdureté...).
- Thermique (spécification d'une conductivité ou résistance thermique...).
- Tribologie (spécification de propriétés de frottement ou d'adhésion).
- Optique (spécification d'apparence, d'indice de réflexion ou d'absorption de la lumière).

Cette liste n'est pas exhaustive car de nouvelles spécifications peuvent être nécessaires en fonction de l'utilisation de cette pièce, en plus des exigences classiques, comme la géométrie de la pièce. Dans le domaine de la mécanique, la surface désigne la limite physique de la pièce ainsi que la matière directement sous la surface. À partir de cette considération, l'intégrité de surface a fait l'objet d'une première définition en 1964 : il s'agit des « caractéristiques intrinsèques ou améliorées d'une surface obtenue par usinage ou un autre procédé de mise en forme ». Cette définition présente le défaut de ne considérer que la pièce, et non sa fonctionnalité finale. L'intégrité de surface doit donc se définir comme les propriétés

topographiques, mécaniques, chimiques et métallurgiques d'une surface usinée en relation avec ses performances en service [9].

La surface n'est pas considérée comme un objet géométrique, mais comme un volume de matériau situé directement sous la surface géométrique, dont les caractéristiques ont été modifiées par un procédé. Ces caractéristiques susceptibles d'être modifiées sont topographiques (forme, rugosité, fissures, ...), ou physiques (déformations plastiques, contraintes résiduelles, microstructure, dureté, composition chimique, ...). Ce volume de matériau affecté par un procédé peut se décomposer en plusieurs couches d'après les différents phénomènes susceptibles de s'y produire (figure I.18) [9].

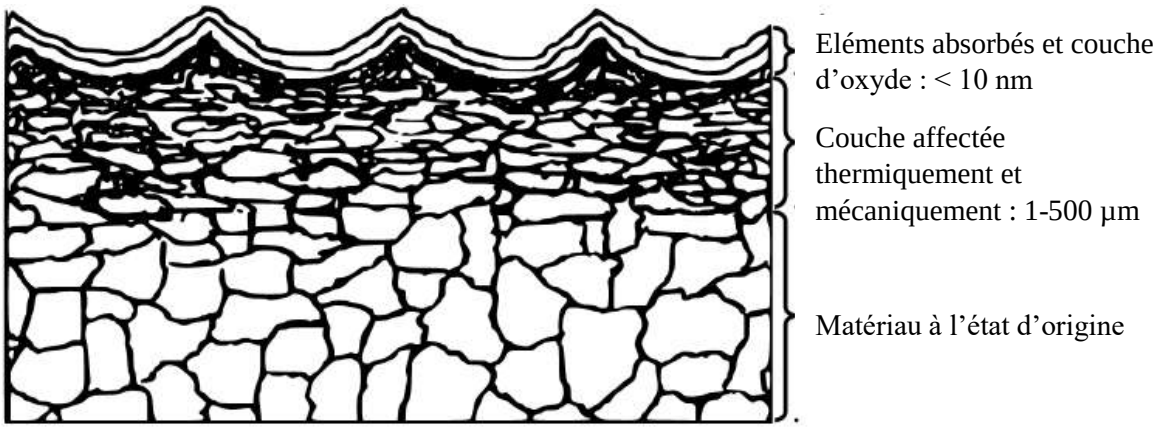


Figure I.18 *Schéma des différentes couches affectées par un procédé de fabrication [9].*

Au niveau de l'extrême surface, suivant le procédé utilisé, une oxydation de la surface peut se produire et conduire cette dernière à adsorber certains éléments présents dans l'air ou les fluides utilisés sous forme de vapeur d'eau et d'hydrocarbures. Dans le cas des aciers inoxydables, cette couche est naturellement présente et n'est pas générée par les procédés de mise en forme utilisés. En raison de la très faible épaisseur de cette couche (moins de 10 nm), elle ne sera pas considérée dans ces travaux [9].

Au-delà de cette couche d'adsorption, se trouve la couche qui est affectée thermiquement et mécaniquement par le procédé. L'épaisseur de cette couche est bien plus importante que celle de la couche d'adsorption (plusieurs dizaines de fois plus épaisse), et peut atteindre quelques dixièmes de millimètre, en présentant un gradient de microstructures et de propriétés. Cette couche peut donc se décomposer en plusieurs sous-couches aux caractéristiques mécaniques et/ou microstructurales différentes [9].

I.5. La dureté

I.5.1. Définition

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (dureté Brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré [10].

I.5.2. Essais de dureté

L'essai est très simple à réaliser, n'utilise pas de machine coûteuse et n'exige pas l'usinage d'une éprouvette, puisqu'une surface plane de quelques mm 2 suffit. Un pénétrateur de géométrie connue est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné, on mesure la surface ou la profondeur de l'empreinte laissée dans le matériau, plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur [11].

- Les essais de dureté qui mesurent la profondeur de pénétration comprennent : essai Rockwell, essai de pénétration instrumentalisé par bille.
- Les essais de dureté qui mesurent la taille de l'empreinte laissée par le pénétrateur sont : Vickers, Knoop, et Brinell.

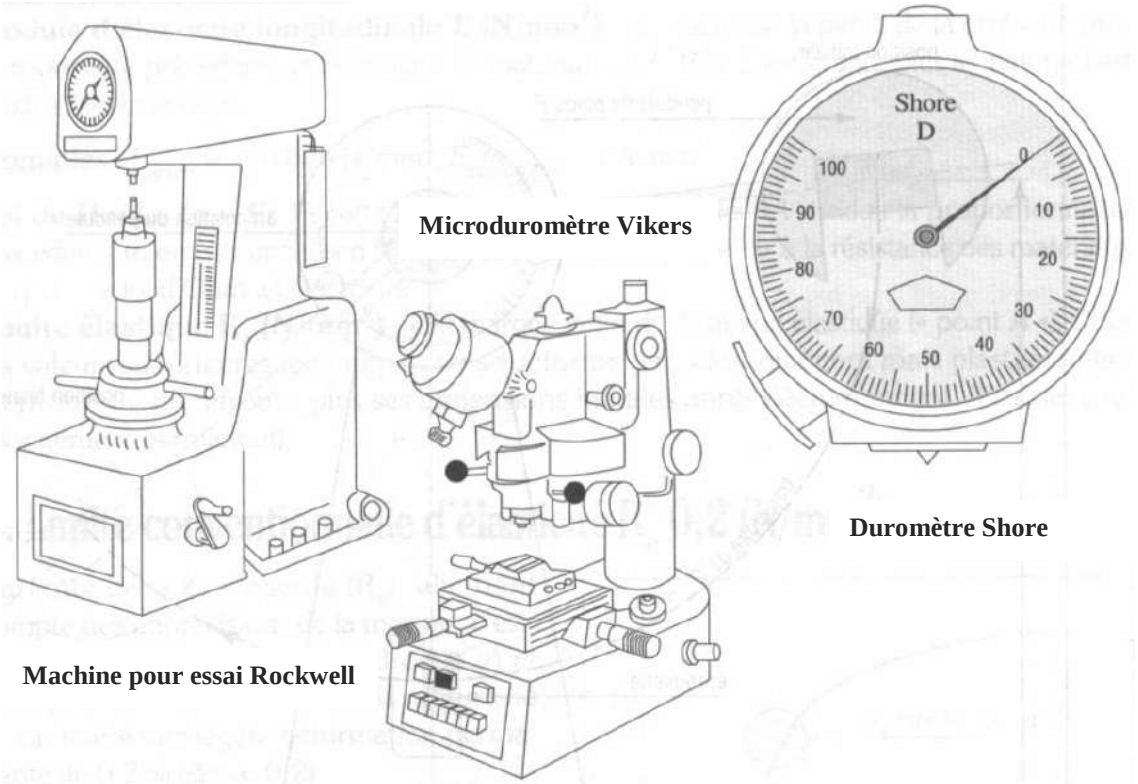


Figure I.19 *Exemple de machines d'essai de dureté [12].*

I.5.3. A quoi sert l'essai de dureté ?

L'essai peut renseigner sur la résistance à l'usure par frottement, la capacité à s'usiner, l'homogénéité du matériau, l'efficacité des traitements thermiques…etc [11].

I.5.4. Les types d'essai de dureté

Il existe plusieurs manières pour déterminer la dureté d'un matériau :

- Essai de Rockwell
- Essai de Brinell
- Essai de Vickers
- Essai de Shore
- Essai de Leeb
- Essai de knoop

L'essai de dureté est défini par 3 critères, des lettres et des chiffres. La valeur de dureté est toujours placée avant les critères de l'essai [13].

1ère critère

H = Hardness (dureté en anglais)

2ème critère

Une seconde lettre indiquant le type d'essai de dureté :

- H R (Rockwell)
- H B (Brinell)
- H V (Vickers)
- H S (Shore)
- H L (Leeb)
- H K (knoop)

3ème critère

Une lettre ou un nombre, définit par les normes ISO : 6506-Brinell, 6507-Vickers, 6508-Rockwell…

I.5.5. Le choix de la méthode d'essais de dureté

Lors du choix de la méthode d'essais de dureté, les considérations suivantes sont importantes [14] :

- Le type de matériau à tester en dureté
- L'exigence de se conformer à une norme
- La dureté approximative du matériau

- L'homogénéité/hétérogénéité du matériau
- La taille de la pièce
- La nécessité de procéder à un enrobage
- Le nombre d'échantillons à tester
- La précision requise du résultat

I.5.6. La microdureté des surfaces usinées

La microdureté est un terme largement utilisé se référant à l'essai de la dureté impliquant des matériaux en utilisant de petites charges appliquées. Un terme plus approprié pour décrire ceci est le test de dureté par micro-indentation. Dans cette méthode d'essai, l'utilisation d'un pénétrateur de diamant de forme particulière est recommandée pour créer une empreinte appelée « charge d'essai » ou « force appliquée », qui peut être de 1 à 1 000 g sur le matériau à l'essai [15].

Normalement, les tests de micro-indentation impliquent des forces 2N, équivalentes à environ 200 g. Cette force peut produire une empreinte d'environ 50 µm. En raison de sa spécificité, ce type de test est applicable dans les cas où il est nécessaire de surveiller les changements de dureté au niveau microscopique. Malheureusement, la standardisation de la microdureté peut être difficile car la microdureté de tout matériau a tendance à être supérieure à sa macrodureté. Les valeurs de microdureté peuvent également changer en fonction de l'écrouissage et de la charge. Le test de dureté Knoop et le test de dureté Vickers sont deux des tests les plus couramment utilisés pour mesurer la microdureté, mais ils s'appliquent également à des charges plus lourdes [15].

Ce type d'essai est utilisé non seulement pour les métaux, mais aussi pour les céramiques et les composites pour lesquels des essais d'indentation de macrodureté ne peuvent être appliqués. Les tests de microdureté sont utiles pour fournir les données requises lors de la mesure de microstructures uniques situées dans une matrice plus grande et lors du test de matériaux minces ou en feuille [15].

I.5.7. Les tests utilisés pour mesurer la microdureté

a) Essai de dureté Vickers

L'essai de dureté VICKERS consiste à imprimer sur la surface de la pièce un pénétrateur de diamant en forme de pyramide droite à base carrée d'angle de 136° sous une charge F et à mesurer à l'aide d'un microscope gradué les deux diagonales de l'empreinte laissée après suppression de la charge.

Cet essai est le plus précis est permet de tester des pièces fines. La surface doit être rectifiée ou polie [11,13].

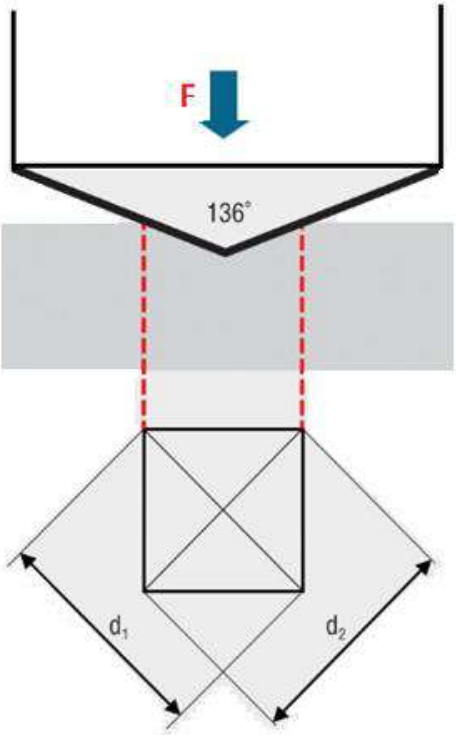


Figure I.20 *Teste de dureté Vickers [14].*

La dureté Vickers est donnée par la formule suivante [12] :

$$HV = 0{,}189\frac{F}{d^2} \tag{I.6}$$

Avec $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ (I.7)

$(F\ en\ N\ , d_1 et\ d_2\ en\ mm\ )$

Désignation de l'essai :

Les valeurs de dureté Vickers sont rapportées comme l'exemple suivant [13] :

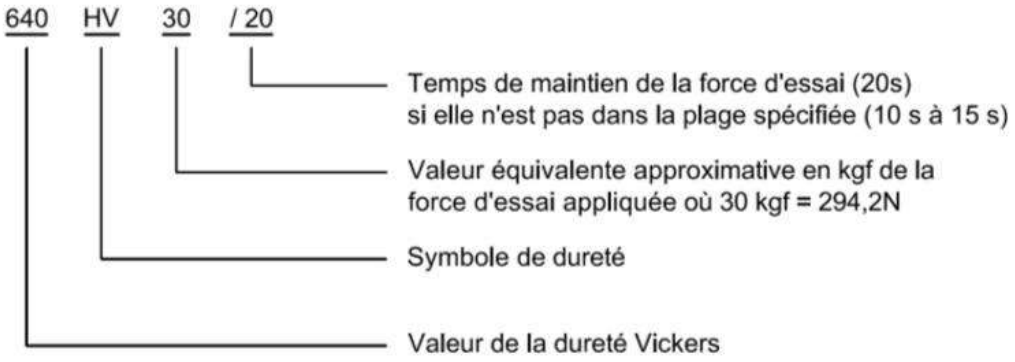


Figure I.21 *Désignation de l'essai Vickers [13].*

b) Essai de dureté Knoop

Semblable à l'essai Vickers, mais avec un pénétrateur diamant de forme pyramidale dont le rapport des diagonales est de 1 :7 et des angles de face respectifs de 172 degrés pour le bord long et de 130 degrés pour le bord court [14].

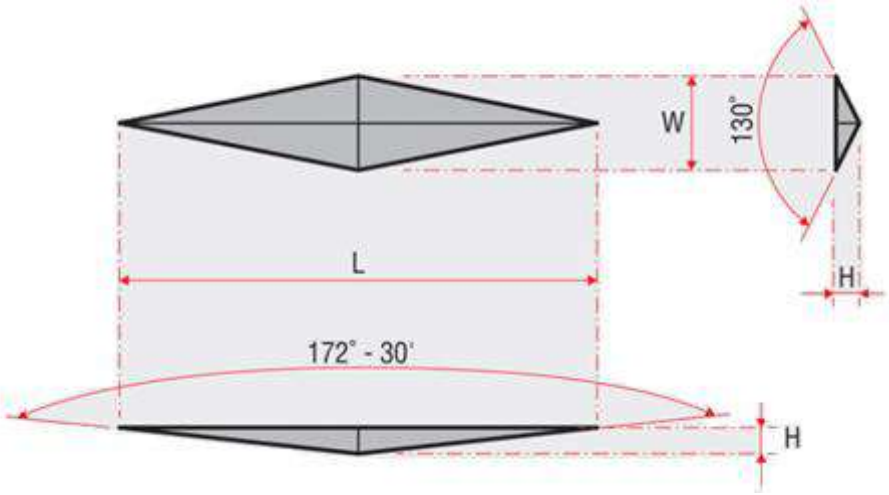


Figure I.22 *Teste de dureté Knoop (1) [14].*

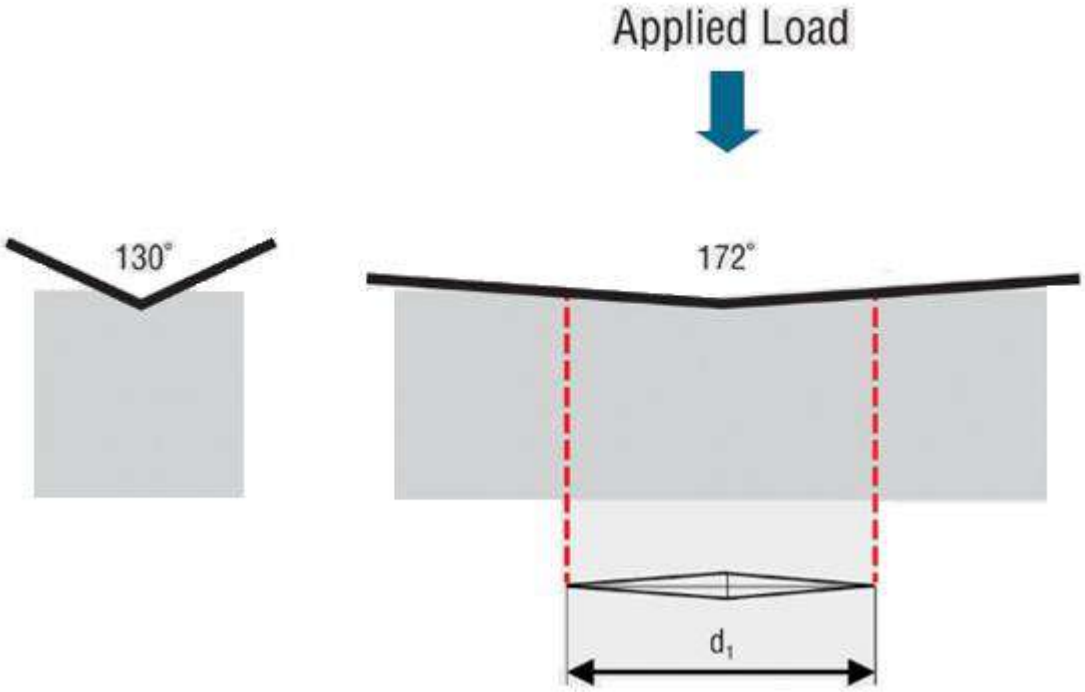


Figure I.23 *Teste de dureté Knoop (2) [14].*

La dureté Knoop HK est donnée par la formule :

$$HK = 1,451 \frac{F}{L^2} \tag{I.8}$$

Où : $L =$ diagonale la plus longue de l'empreinte

I.5.8. Échelles de mesure de dureté

- HRC (pour ferreux)
- HRD et HRA avec cônes (pour matériaux durs et très durs : carbures, aciers trempés...)
- HRB (non ferreux et métaux en feuilles)
- HRE, HRF, HRG (pour métaux doux)
- HRM et HRR avec billes (pour matières plastiques)

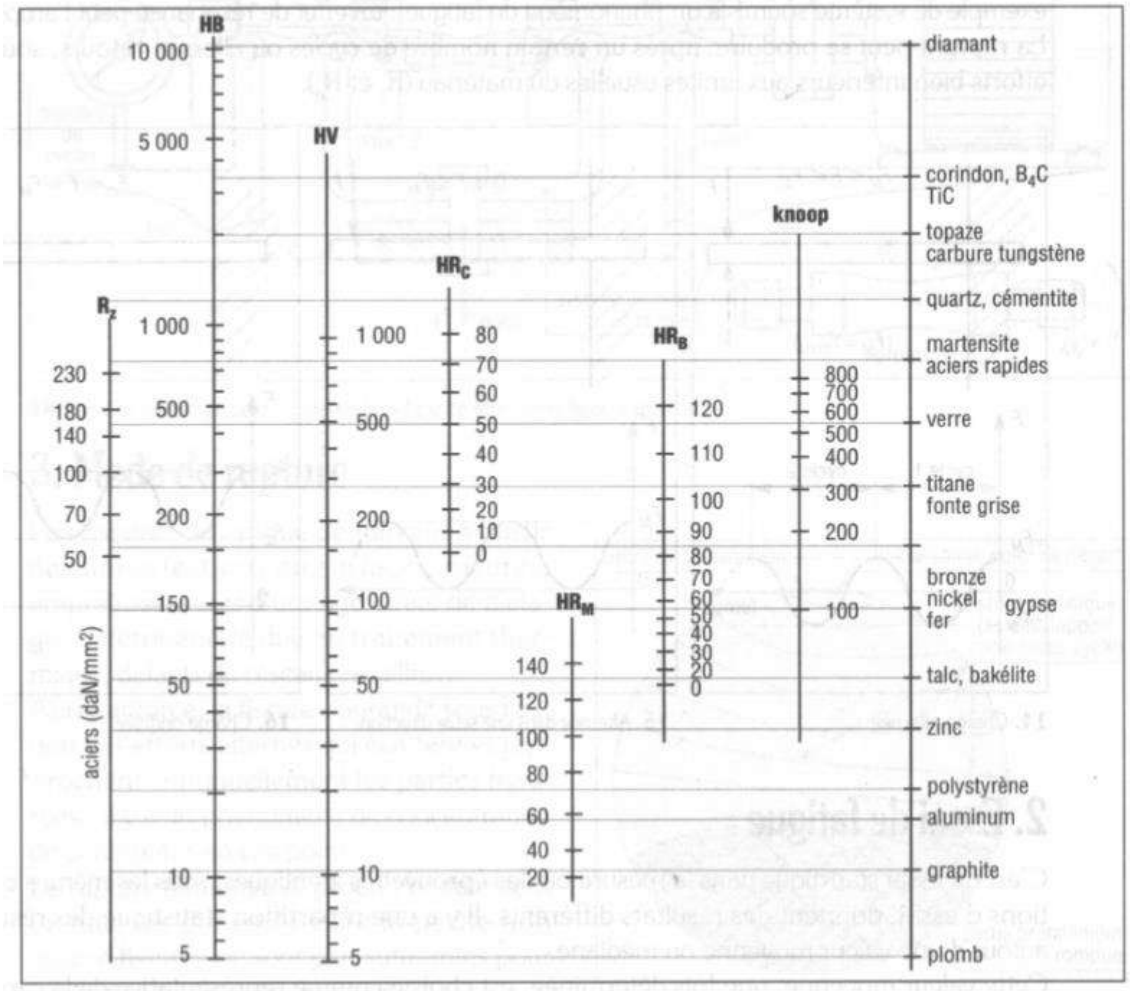


Figure I.24 *Echelles de mesure de dureté [12].*

I.6. Les facteurs affectant la microdureté des surfaces usinées par fraisage

Les facteurs affectant la microdureté des surfaces usinées par fraisage sont les conditions de coupes comme la vitesse de coupe la vitesse d'avance et la profondeur de passe et aussi le type de fraise (matière, le nombre de dents, les tailles, l'usure du bec…), l'environnement de coupe a aussi une influence sur la microdureté (Milieu sec ou présence de liquide de lubrification ou de refroidissement).

I.7. Conclusion

Nous avons discuté dans ce chapitre tout ce qui concerne l'usinage par fraisage, en concentrant sur les aspects de l'intégrité de surfaces usinées, particulièrement l'aspect le plus important qui est la microdureté car le contrôle de l'intégrité de surface est une considération vitale lors de l'usinage.

CHAPITRE II

Revue de Littérature

II.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter un état de l'art sur l'influence des paramètres de coupe sur les surfaces usinées par fraisage à savoir, l'influence des conditions de coupe (vitesse de coupe ou de broche, avance par dent et profondeur de passe) sur la micro-dureté et la microstructure des surfaces de pièces usinées par fraisage, l'influence du type de matière de l'outil de coupe sur la micro-dureté. Par la suite, Au-delà, quelques travaux liés à la micro-dureté des surfaces usinées par fraisage ont été présentés.

II.2. Travaux analysés

De nombreuses recherches ont été effectuées sur Influence des conditions de coupe sur la micro-dureté et la structure des pièces usinées par fraisage. Parmi ces recherches nous avons analysé les travaux ci-dessous :

Travail effectué par W. Huang et al. [16]

Dans ce travail, les auteurs ont choisi l'acier AISI D2 comme matériau de la pièce usinée. Ils sont effectué l'usinage avec une fraise sphérique à double-arrêtes de 10 mm de diamètre à différentes vitesses de coupe, la dureté de la pièce est aux environs de 61 ± 1 HR. L'opération de fraisage a été réalisée à sec en utilisant un centre d'usinage à grande vitesse à cinq axes DMU60P duoBlock. La microdureté de surface a été mesurée au moins trois fois en utilisant le testeur de dureté Vickers avec une charge de 50 g, ensuite la valeur moyenne a été calculée [16]. Les paramètres de coupe utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau II.1 Configuration des paramètres de coupe [16].

N $(tr/\min)$	f_z $(mm/dent)$	a_e (mm)	a_p (mm)
3000, 4500 6000, 7000,8000	0.12	0.2	0.2

Travail effectué par Y. Zhenchao et al. [17]

Y. Zhenchao et al [17] ont utilisés l'acier 16Co14Ni10Cr2Mo dans leurs expériences, tous les tests de fraisage ont été réalisés sur un centre d'usinage à grande vitesse HAS avec lubrification à huile émulsifiée. La microdureté a été mesurée par le testeur de dureté Vickers. La charge est de 50 grammes et le temps de maintien de la pression est de 10 secondes [17].

Travail effectué par I. Mathohoet al. [18]

Dans ce travail l'opération de fraisage de l'acier Ti-6Al-4V a été réalisée à l'aide d'une fraiseuse verticale (Pinnacle PK-GRSM-V2). Le fraisage a été effectué à sec et sous arrosage

en faisant varier la vitesse de la broche (120, 150 et 180 tr / min), l'avance étant maintenu constant à 4,6 mm / min et la profondeur de coupe étant de 0.5, 1, 1.5 et 2 mm. La microdureté a été mesurée par le testeur de dureté Vickers, la charge appliquée est de 300 grammes et le temps de maintien de la pression est de 15 secondes [18].

Travail effectué par W. Bouzid Saı et al [19]

W. Bouzid Saı et al avaient mené des expériences, où ils ont usiné un acier au carbone (CS) de dureté initiale égale à 300 Hv, la composition chimique de l'acier est indiquée dans le tableau II.2 ci-dessous.

Tableau II.2 Composition de l'acier de carbone (CS) en % [19].

C	Mn	Si	S	P
0.35	0.5	0.15	0.035	0.03

Seules la vitesse de coupe et l'avance sont variables. Le nombre d'arêtes de coupe de l'outil en carbure est fixé à huit pour tous les tests, la profondeur de passe est de 0,5 mm et le diamètre de la fraise utilisée est de 100 mm. Les paramètres utilisés sont entre 160 et 440 m / min pour la vitesse de coupe et entre 0,05 et 0,2 mm / tour pour l'avance. La microdureté a été mesurée par le testeur de dureté Vickers la charge appliquée est de 200 grammes [19].

Travail effectué par W. Akhtar et al. [20]

W. Akhtar et al ont étudié l'effet des paramètres de coupe lors du fraisage de finition d'un super-alliage GH4169 / Inconel 718. Ils ont utilisé des plaquettes en carbure cémenté revêtu et des plaquettes en céramique enduits renforcés. Le surfaçage à grande vitesse avec une machine CNC a été effectué avec les deux types d'outils de coupe.

Les auteurs ont réalisé l'usinage à sec avec les plaquettes en céramique renforcé, tandis que l'usinage par voie humide a été réalisé en utilisant un fluide de coupe soluble dans l'eau avec les plaquettes en carbure. Les combinaisons détaillées des paramètres de coupe utilisés sont illustrées dans le tableau II.3. La microdureté a été mesurée par le testeur de dureté Vickers la charge appliquée est de 200 grammes et le temps de maintien de pression est de 10 secondes [20].

Tableau II.3 Paramètres de coupe utilisés [20].

Exp.	Types de plaquettes de coupe					
	Plaquette en carbure revêtu			Plaquette en céramique renforcé		
	$V_c\ (m/s)$	$f_z\ (mm/dt)$	$a_p\ (mm)$	$V_c\ (m/s)$	$f_z\ (mm/dt)$	$a_p\ (mm)$
1	30	0.06	0.6	300	0.08	0.6
2	45	0.06	0.6	500	0.08	0.6
3	60	0.06	0.6	700	0.08	0.6
4	75	0.06	0.6	900	0.08	0.6
5	90	0.06	0.6	1100	0.08	0.6
6	60	0.02	0.6	700	0.04	0.6
7	60	0.04	0.6	700	0.06	0.6
8	60	0.06	0.6	700	0.08	0.6
9	60	0.08	0.6	700	0.10	0.6
10	60	0.10	0.6	700	0.12	0.6
11	60	0.06	0.2	700	0.08	0.2
12	60	0.06	0.4	700	0.08	0.4
13	60	0.06	0.6	700	0.08	0.6
14	60	0.06	0.8	700	0.08	0.8
15	60	0.06	1.0	700	0.08	1.0

L'analyse des travaux précédemment présentés nous a permis d'identifier les différents effets des conditions de coupe sur la micro-dureté des pièces usinées par fraisage, où ces effets sont répartis comme suit :

II.3. Influence des conditions de coupe sur la micro-dureté

II.3.1. Influence de la vitesse de coupe (ou vitesse de la broche)

Notre recherche bibliographique a révélé que l'effet de la vitesse de coupe varie relativement en fonction du matériau usiné. Nous avons donc décidé que nous présenterons l'effet de la vitesse de coupe sur la micro-dureté de chaque matériau séparément.

a) Matériau usiné : l'acier AISI D2

W. Huang et al [16] ont étudié la variation de la micro-dureté des surfaces fraisées en fonction de la vitesse de broche. Ils ont conclu que la micro-dureté de surfaces usinées a évidemment augmenté par rapport à la micro-dureté de la pièce avant usinage (734 HV), quelle que soit la vitesse utilisée. Ceci est attribué à l'écrouissage induit par la déformation plastique

sévère au cours du processus de fraisage. De plus, il existe une différence de degré d'écrouissage pour différentes conditions de vitesse de broche en raison de la différence de champ de couplage thermomécanique.

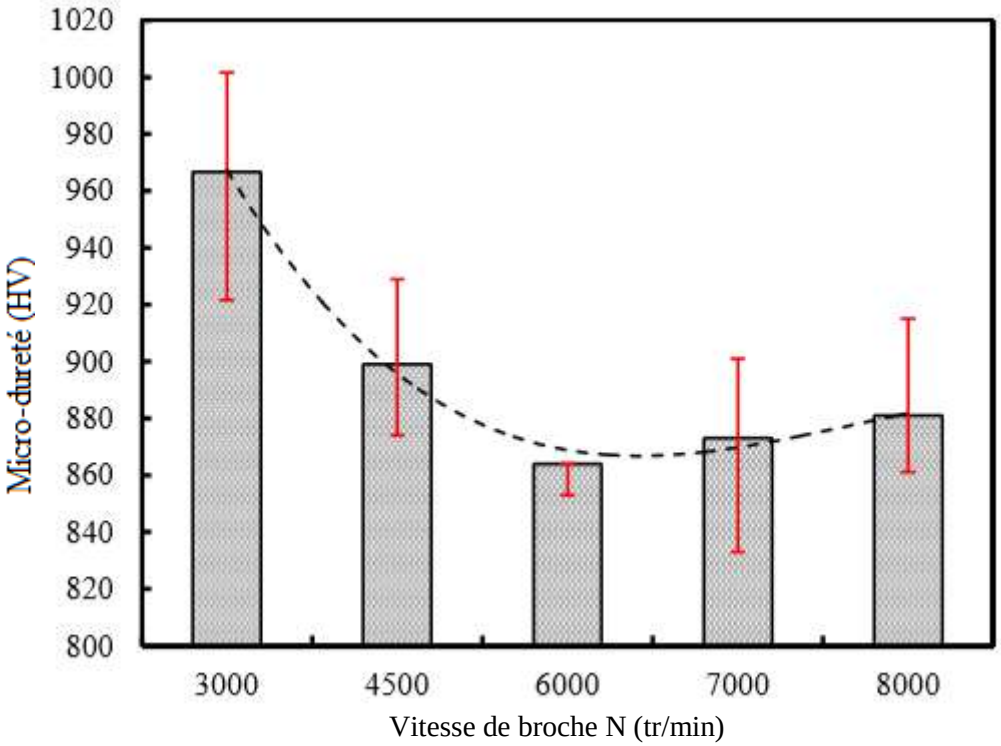


Figure II.1 *Evolution de la microdureté avec la vitesse de broche [16].*

Ils ont conclu aussi que pour les surfaces fraisées à faible vitesse de broche, l'effet mécanique joue un rôle plus important que la charge thermique. C'est la raison la raison pour laquelle la micro-dureté est plus élevée pour les surfaces usinées avec N = 3000 tr / min. Cependant, le ramollissement thermique devient de plus en plus évident avec l'augmentation de la vitesse de broche qui affaiblit le degré d'écrouissage. De plus, il est à noter que la micro-dureté de surface tend à se stabiliser lorsque la vitesse de rotation de la broche dépasse 6000 tr/min [16].

De cette étude on conclure que la micro-dureté superficielle diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation due à l'amélioration du ramollissement thermique. De plus, la microdureté superficielle était évidemment améliorée par rapport à la dureté du matériau de la pièce [16].

b) Matériau usiné : l'acier 16Co14Ni10Cr2Mo

Y. Zhenchao et al [17] ont analysé l'influence de la vitesse de coupe sur la micro-dureté des surfaces usinées, avec des valeurs constantes de l'avance par dent, la profondeur de passe et la largeur de coupe : 0.12 mm / dent, 0.7 mm/dent et 25 mm respectivement.

Ils ont trouvé que : lorsque la vitesse de coupe augmente de 201 m/min à 251 m/min, la micro-dureté superficielle décroît de 387,2 HV à 345,2 HV. Tandis que lorsque la vitesse de coupe varie de 251 m/min à 402 m/min, la micro-dureté de la surface usinée augmente de 345,2HV à 362,7HV. Cela est dû à la réduction de la distorsion de coupe lorsque la vitesse d'usinage augmente.

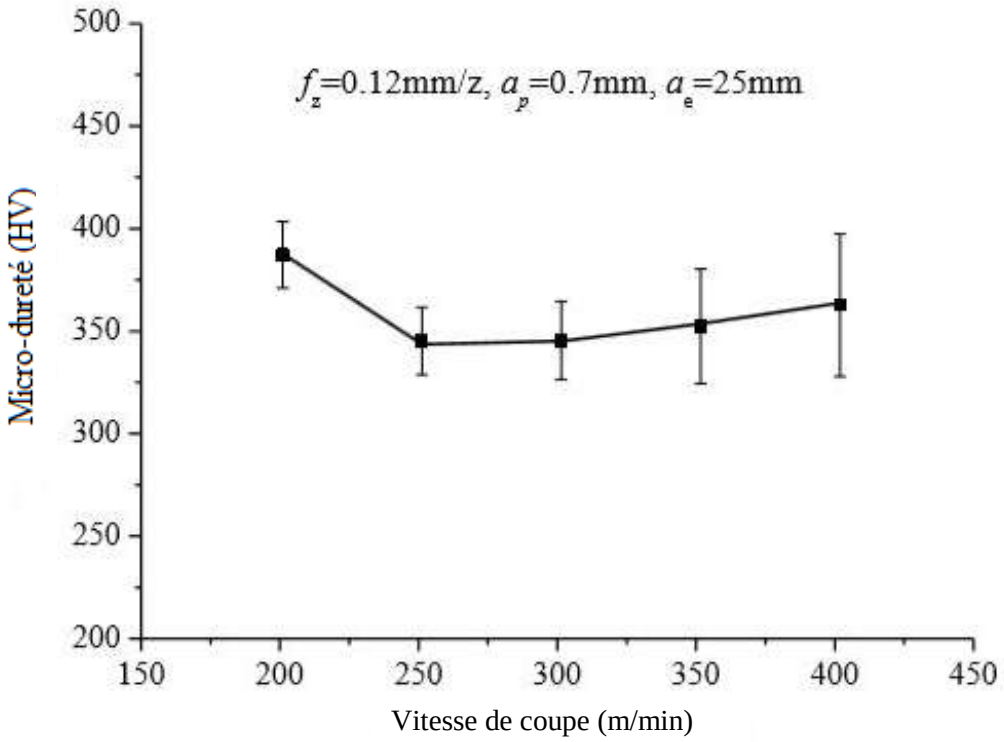


Figure II.2 *L'effet de la vitesse de coupe sur la micro-dureté [17].*

c) Matériau usiné : l'acier Ti-6Al-4V

I. Mathohoet et al [18] ont étudié l'influence de la vitesse de broche sur la micro-dureté des surfaces usinées par fraisage avec et sans lubrification.

Lors de la réalisation des essais sans lubrification, ils ont trouvé que l'augmentation de la vitesse de rotation de la broche de 120 à 180 tr/min a entraîné une augmentation de la micro-dureté. Dans ces essais des micro-duretés : minimale, moyenne et maximale de 317,88 HV, 328,28 HV et 336,36 HV ont été générés à 120 tr/min, 150 tr/min et 180 tr/min respectivement.

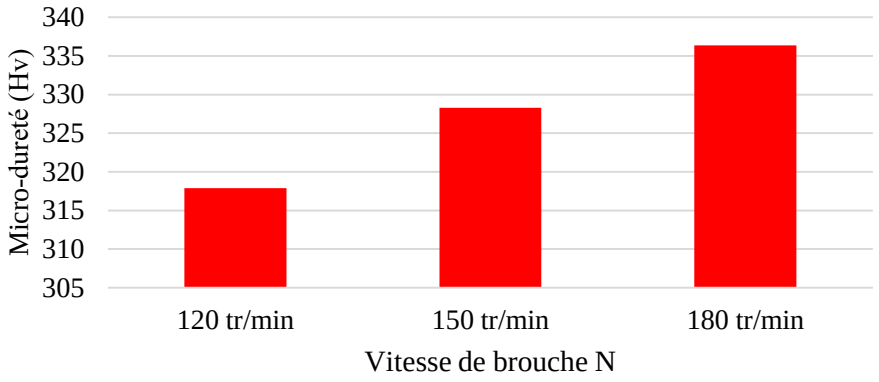


Figure II. 3 *L'effet de la vitesse de broche sur la microdureté cas de fraisage à sec [18].*

L'augmentation de la dureté avec l'augmentation de la vitesse de la broche est due au fait que l'écrouissage est supérieur au ramollissement thermique.

Dans le but de consolider leurs résultats, les auteurs ont réalisé une analyse de la microstructure des pièces usinées avant et après usinage.

La microstructure du matériau avant usinage est illustrée à la figure II. 4. La phase alpha (α) est représentée par la zone claire, tandis que la phase bêta (β) est représentée par la zone ombre.

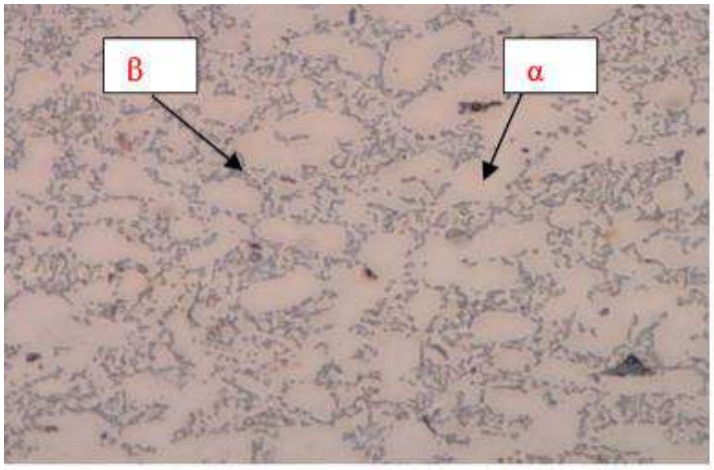


Figure II.4 *Représentation de la microstructure du matériau de base [18].*

L'analyse la microstructure effectuée après usinage à sec est illustrée dans la figure II.5. De la figure on constate la déformation de la phase bêta (la phase bêta diminue) avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la broche et que la déformation maximale de la phase bêta est atteinte à une vitesse de rotation maximale de 180 tr / min [18].

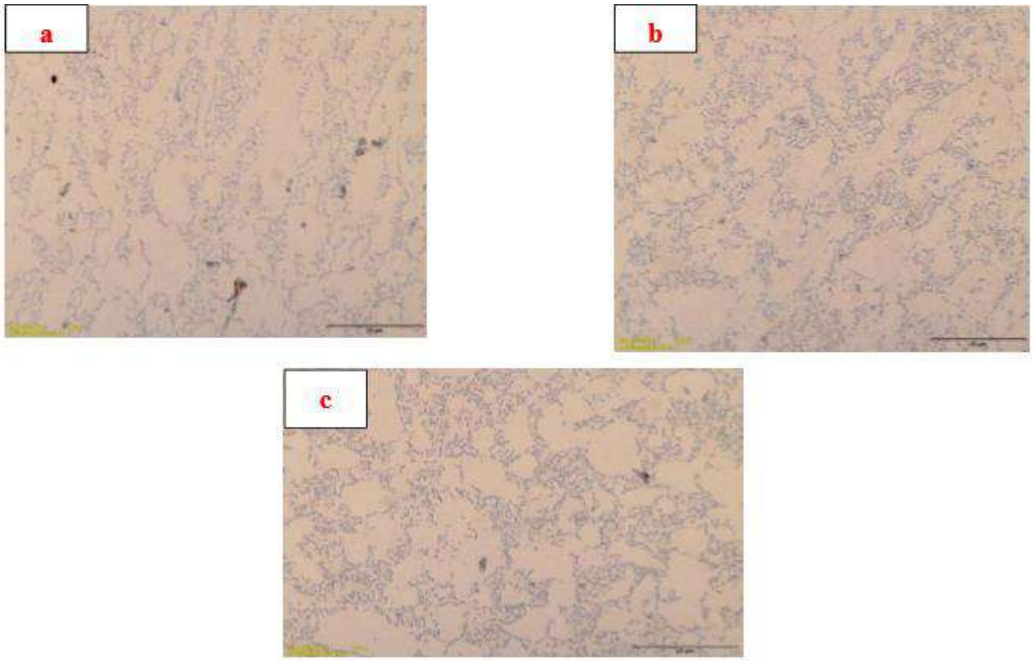


Figure II.5 *Microstructure des surfaces fraisées à sec à (a) 120 tr / min, (b) 150 tr / min et (c) 180 tr / min [18].*

Lors de la réalisation des essais sans lubrification, ils ont constaté que la micro-dureté de la surface fraisée augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation de la broche, comme le montre la figure 4. En outre, la figure 6 montre qu'une micro-dureté minimale de 325,62 HV a été trouvée à une vitesse de rotation minimale de 120 tours/min, et une micro-dureté moyenne de 331,1 HV a été trouvée à une vitesse de broche moyenne de 150 tr / min, tandis qu'une micro-dureté maximale de 338,62 HV a été trouvée à une vitesse de broche maximale de 180 tr /min.

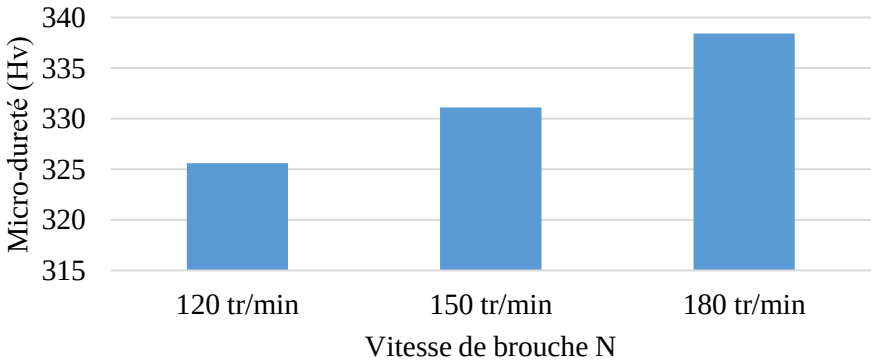


Figure II.6 *L'effet de vitesse de broche sur la micro-dureté cas de fraisage sous arrosage [18].*

L'analyse de la structure après fraisage ne montre aucune altération avec une augmentation de la vitesse de rotation de la broche, comme illustré dans la figure II.7.

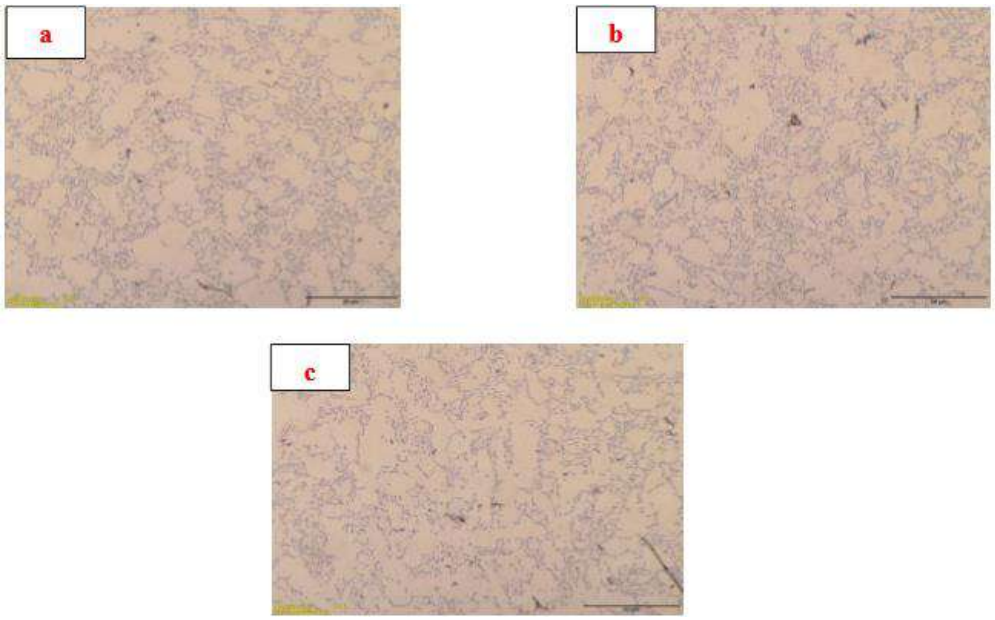


Figure II.7 *Microstructure des surfaces fraisées sous arrosage à (a) 120 tr/min, (b) 150 tr/min et (c) 180 tr/min [18].*

d) Matériau usiné : acier de carbone (CS)

W. Bouzid Saı et al [19] ont constaté que la micro-dureté de la surface fraisée augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe, comme le montre la figure II.8. En outre, la figure II.8 montre qu'une micro-dureté minimale a été trouvée à une vitesse de coupe minimale de 160 m/min. et une micro-dureté moyenne a été trouvée à une vitesse de coupe moyenne de 220 m/min, tandis qu'une micro-dureté maximale a été trouvée à une vitesse de coupe maximale de 315 m/min.

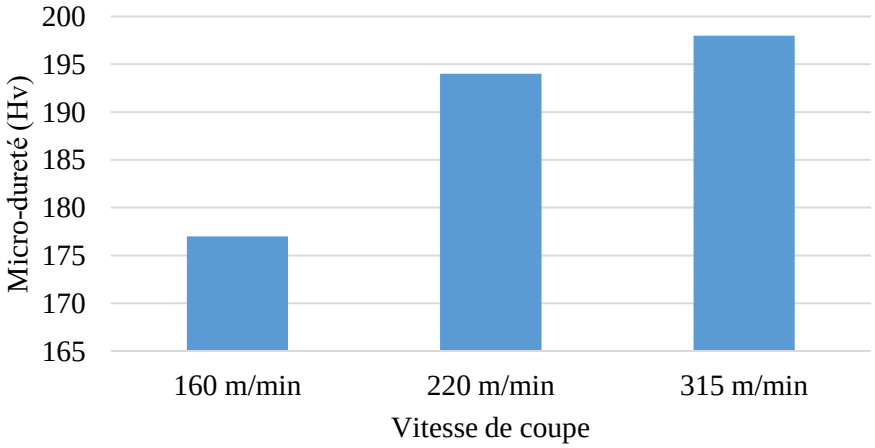


Figure II.8 *Evolution de la microdureté avec la vitesse de coupe [19].*

e) Matériau usiné : superalliage GH4169 / Inconel 718

W. Akhtar et al [20] ont étudié l'influence de la vitesse de coupe sur la micro-dureté des surfaces usinées par fraisage en utilisant deux types de plaquettes : plaquettes en carbure cémenté et plaquettes en céramique.

Ils ont constaté que lors de l'usinage avec plaquettes en carbure cémenté, la micro-dureté superficielle diminue à mesure que la vitesse de coupe augmente. Dans un processus d'usinage, le durcissement ou le ramollissement d'une pièce est contrôlé par plusieurs facteurs, par exemple la déformation plastique, vitesse de déformation, température de coupe, etc. Aux faibles vitesses de coupe, l'effet de l'écrouissage est dominant et conduit à une plus grande micro-dureté du matériau, cependant, à des vitesses de coupe élevées, la micro-dureté de la surface usinée chute vers la dureté du matériau brute. La diminution de la micro-dureté dans ce cas est due à un ramollissement thermique accru à des vitesses de coupe élevées.

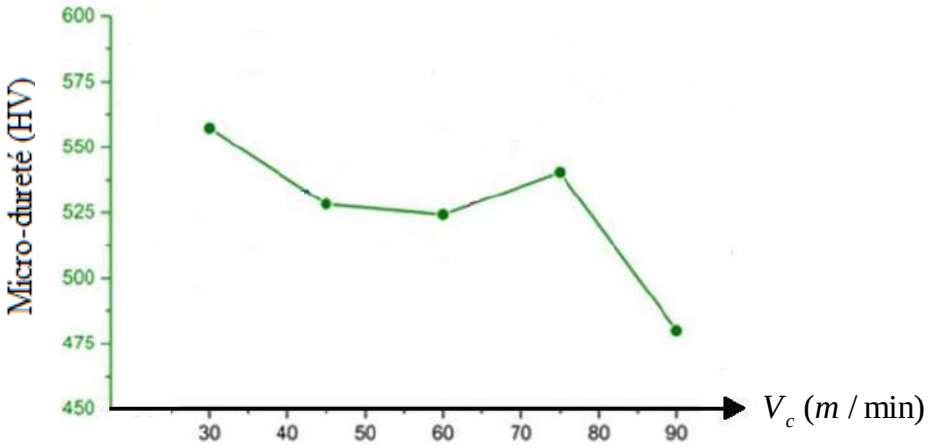


Figure II.9 *L'effet de Vc sur la microdureté cas des plaquettes en carbure cémenté [20].*

Lors de l'usinage avec plaquettes en céramique, les auteurs ont trouvé que l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une diminution de la dureté de la surface.

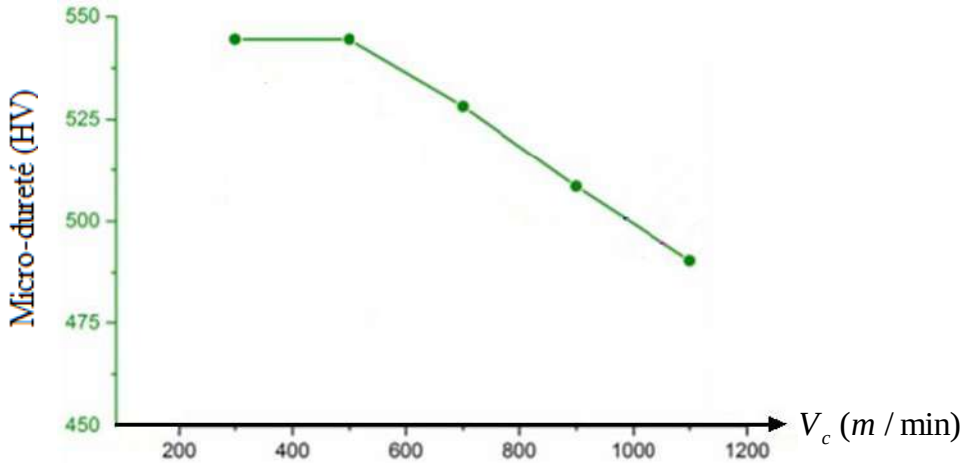


Figure II.10 *L'effet de Vc sur la microdureté cas des plaquettes en céramique [20].*

II.3.2. Influence de l'avance

a) Matériau usiné : l'acier 16Co14Ni10Cr2Mo

Y. Zhenchao et al [17] ont analysé l'influence de l'avance par dent sur la micro-dureté des surfaces usinées, avec des valeurs constantes de la vitesse de coupe, la profondeur de passe et la largeur de coupe : 301 m / min, 0,7 mm et 25 mm respectivement.

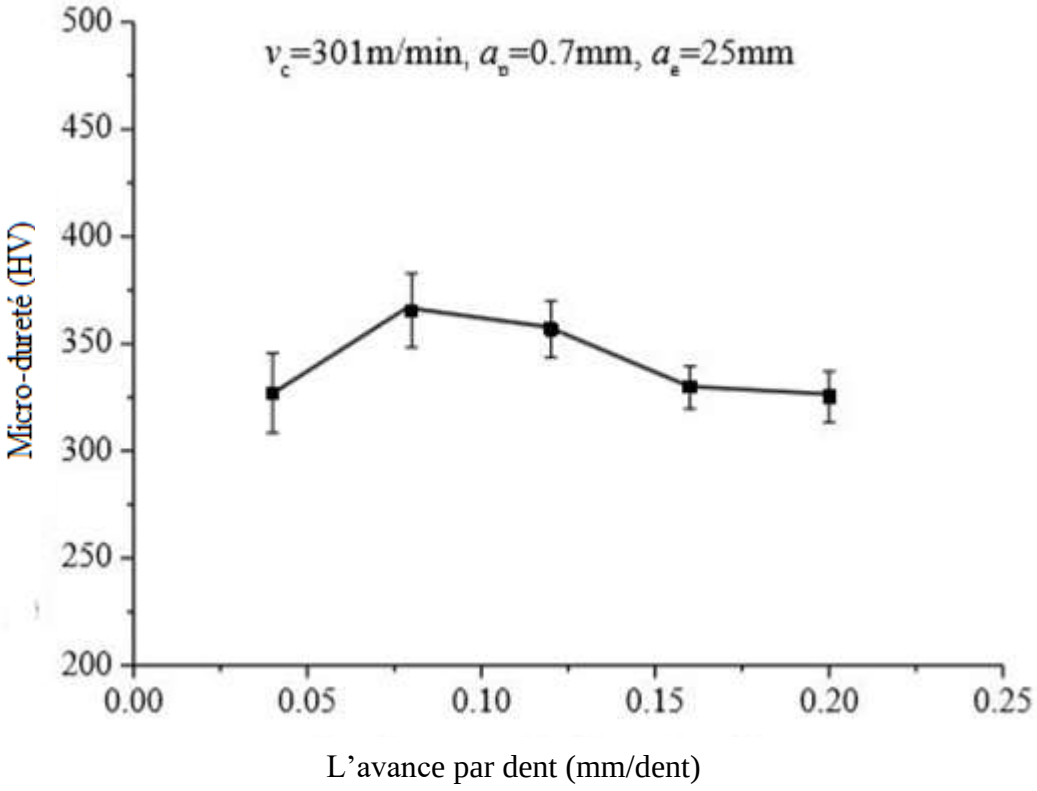


Figure II.11 *L'effet de l'avance par dent sur la microdureté [17].*

Ils ont trouvé que la micro-dureté de la surface augmente lorsque l'avance par dent augmente de 0,04 mm/dent à 0,08 mm/dent. Par contre elle diminue lorsque l'avance par dent augmente de 0,08 mm/dent à 0,2 mm/dent.

b) Matériau usiné : l'acier de carbone (CS)

W. Bouzid Saı et al [19] ont analysé l'effet de l'avance sur la microdureté de la surface usinée pour une vitesse de coupe Vc = 160 m/min.

Ils ont constaté que la micro-dureté de la surface usinée augmente avec l'augmentation de l'avance par dent.

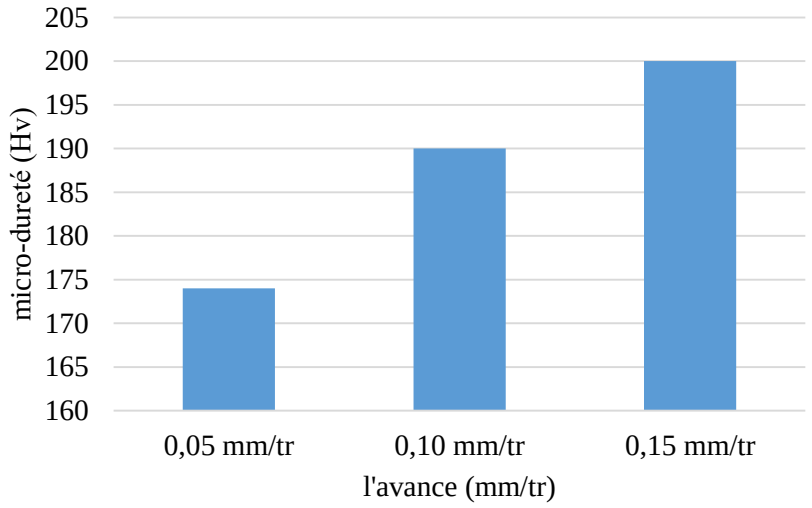


Figure II.12 *L'effet de l'avance sur la microdureté pour une vitesse de coupe de Vc=160 m/min [19].*

c) Matériau usiné : superalliage GH4169 / Inconel 718

W. Akhtar et al [20] ont observé que lors de l'usinage, avec plaquettes en carbure cémenté, la micro-dureté de la surface du matériau augmente également l'augmentation de l'avance par dent. L'augmentation de l'avance par dent a entraîné une plus grande force de coupe et une plus grande déformation, entraînant ainsi un durcissement accru. Bien que l'effet de ramollissement thermique puisse également être dû à l'augmentation de la température de coupe avec l'augmentation de la vitesse d'avance, l'effet de durcissement induit par la déformation a dominé et il a été constaté que la dureté de surface de la pièce à usiner augmente.

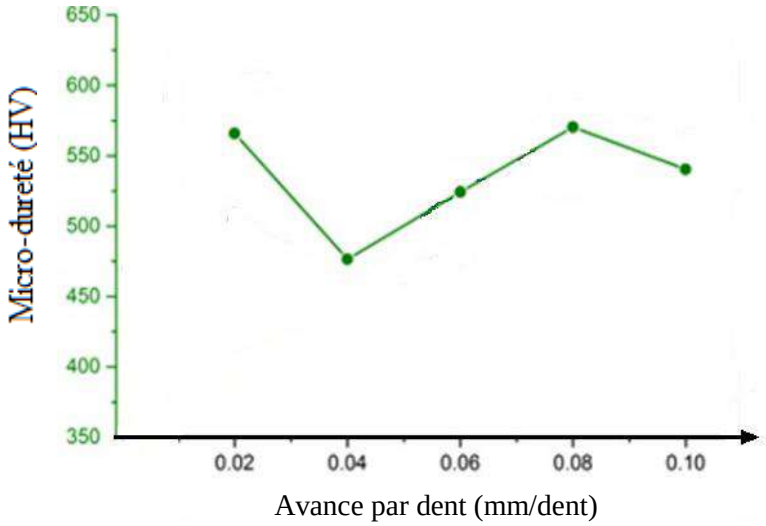


Figure II.13 *L'effet de l'avance par dent sur la micro-dureté cas des plaquettes en carbure cémenté [20].*

W. Akhtar et al [20] ont observé aussi que lors de l'usinage, avec plaquettes en céramique, la dureté superficielle diminue avec l'augmentation de l'avance par dent dans son ensemble, mais il n'y avait pas de tendance simple. Les points avec une dureté de surface accrue ont mis en évidence la prédominance de l'effet d'écrouissage par rapport au ramollissement thermique et vice versa.

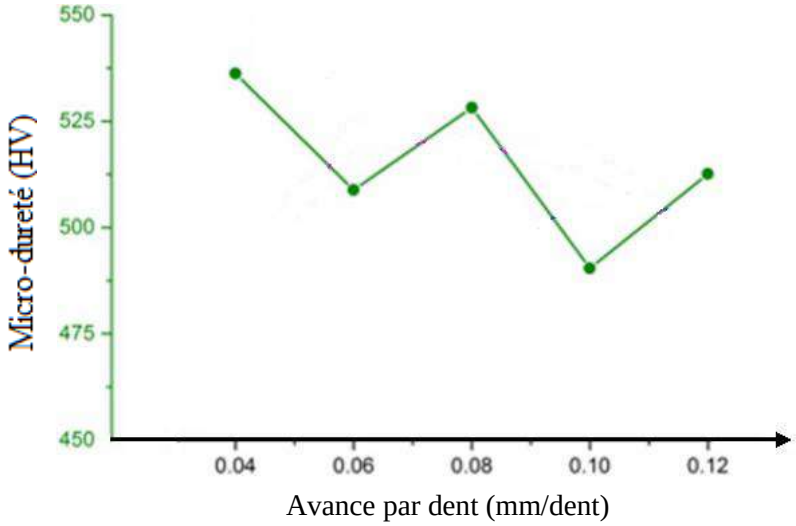


Figure II.14 *L'effet de l'avance par dent sur la microdureté cas des plaquettes en céramique [20].*

II.3.3. Influence de la profondeur de passe

a) Matériau usiné : l'acier 16Co14Ni10Cr2Mo

Y. Zhenchao et al [17] ont analysé l'influence de la profondeur de passe sur la micro-dureté des surfaces usinées, avec des valeurs constantes de la vitesse de coupe, l'avance par dent et la largeur de coupe : 301 m / min, 0.12 mm / dent et 25 mm respectivement.

Ils ont remarqué que lorsque la profondeur de passe augmente de 0.3 mm à 0.9 mm, la micro-dureté de surface augmente lentement. Lorsque la profondeur de passe est de 0.9 mm, la micro-dureté de surface atteint la valeur la plus élevée, à savoir 353.2 HV. Ensuite, la micro-dureté diminue lorsque la profondeur de passe augmente de 0.9 mm à 1.1 mm. Ceci est dû au fait que plus la profondeur de passe augmente, plus la force de coupe et la déformation de coupe augmentent.

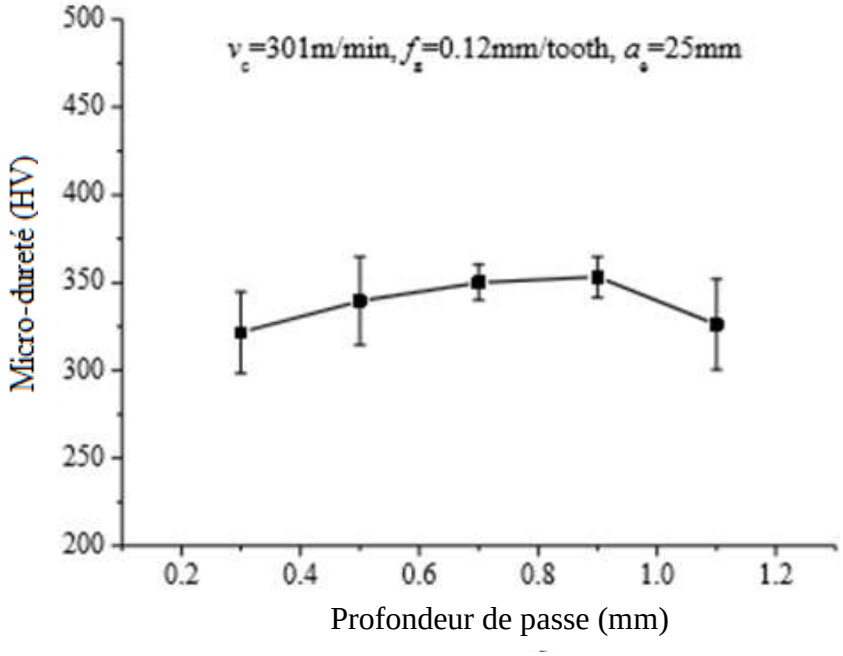


Figure II.15 *L'effet de la profondeur de coupe sur la micro-dureté [17].*

b) Matériau usiné : l'acier Ti-6Al-4V

I. Mathohoet et al [18] ont constaté que lors de l'usinage, sans lubrification, la micro-dureté diminue avec la diminution de la profondeur de coupe et qu'une dureté minimum de 328,74 HV était obtenue à une profondeur de passe maximale de 2 mm. Une dureté maximale de 338,7 HV a été enregistrée à une profondeur de passe minimale (1 mm). La diminution de la dureté est due au ramollissement thermique.

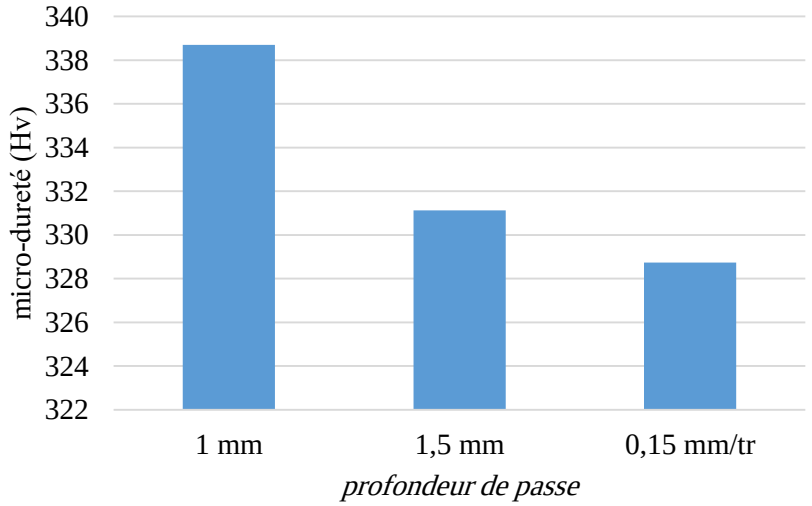


Figure II.16 *L'effet de profondeur de coupe sur la microdureté lors du fraisage à sec [18].*

Ils ont montré aussi que lors de l'usinage lubrifié la micro-dureté augmentait avec l'augmentation de la profondeur de coupe, une dureté minimale de 314,97 HV a été enregistrée

à une profondeur de coupe minimale (1 mm) et une dureté maximale de 326,84 HV a été enregistrée à une profondeur de passe maximale (2 mm).

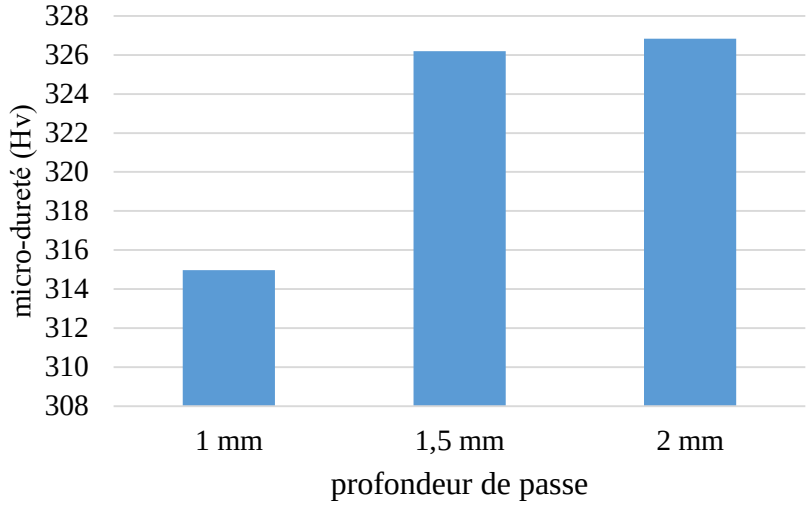


Figure II.17 *L'effet de profondeur de coupe sur la microdureté lors du fraisage sous arrosage [18].*

c) Matériau usiné : superalliage GH4169 / Inconel 718

W. Akhtar et al [20] ont observé que lors de l'usinage, avec plaquettes en carbure cémenté, que la dureté superficielle augmentait avec la profondeur de passe. Comme il n'y avait pas d'augmentation significative de la température d'un processus d'usinage en raison de l'augmentation de la profondeur de passe, l'effet de durcissement mécanique de la contrainte dominait entraînant une augmentation de la dureté de la couche de surface.

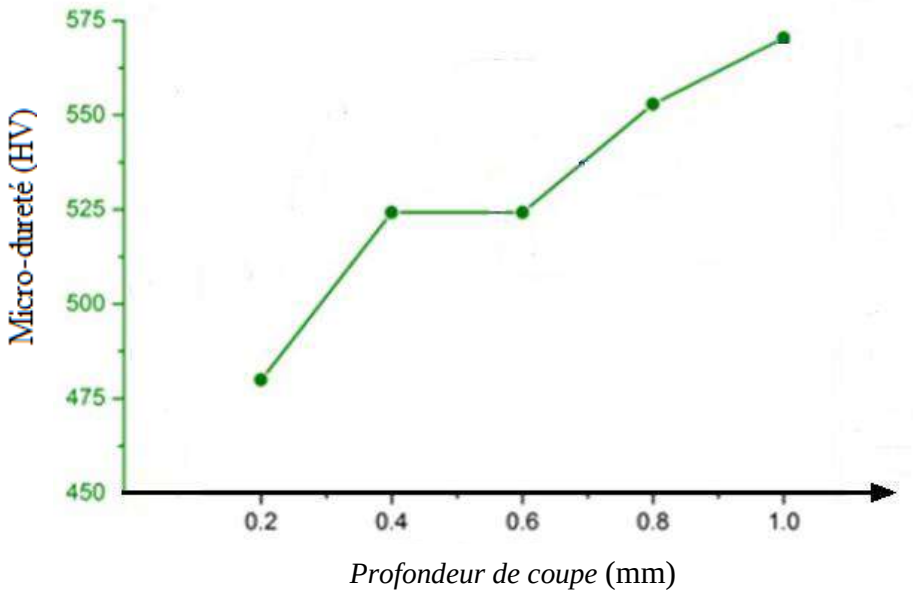


Figure II.18 *L'effet de profondeur de coupe sur la microdureté cas des plaquettes en carbure cémenté [20].*

W. Akhtar et al [20] ont observé aussi que lors de l'usinage, avec plaquettes en céramique, la micro-dureté, en générale, diminuait avec l'augmentation de la profondeur de coupe. L'augmentation de la température d'usinage a été jugée responsable de la variation de la micro-dureté.

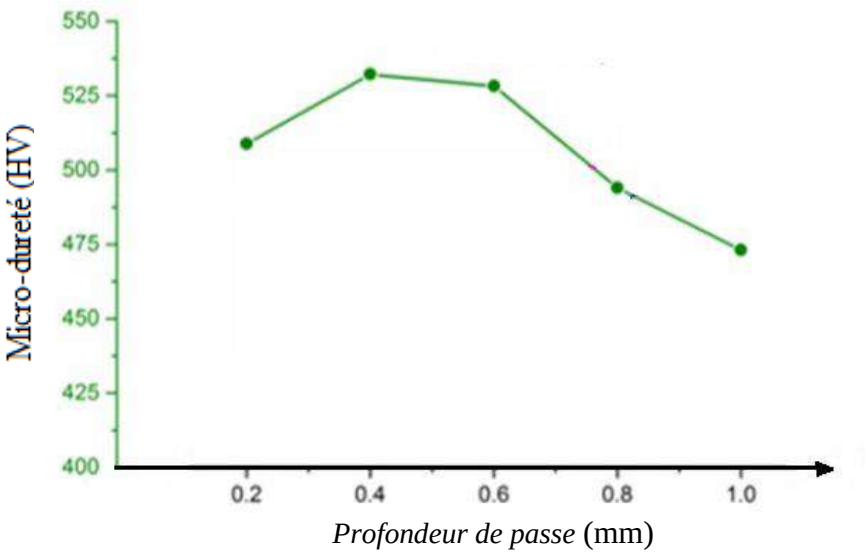


Figure II.19 *L'effet de profondeur de coupe sur la microdureté cas des plaquettes en céramique [20].*

II.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les facteurs qui ont une influence sur la microdureté et la microstructure des surfaces usinées par fraisage. Nous avons conclu que la micro-dureté des surfaces usinées dépend du type de matériau usiné, des paramètres de coupe et de l'environnement de fraisage (à sec ou sous présence d'un fluide de coupe …), elle est influencée également par le matériau de l'outil de coupe.

CHAPITRE III

La Logique Floue

III.1. Introduction

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain [21].

La logique floue est un outil qui gagne une popularité ces dernières années. Il est basé sur l'observation que les personnes prennent des décisions basées sur des informations imprécises et non numériques, les modèles ou les ensembles flous étant des moyens mathématiques utilisés pour représenter des informations vagues et imprécises, ç'est de ça vient le terme floue. Ces modèles ont la capacité de reconnaître, de représenter, de manipuler, d'interpréter et d'utiliser des données et des informations vagues et peu sûres.

La logique floue a été appliquée à de nombreux domaines, de la théorie du contrôle à l'intelligence artificielle.

Dans ce chapitre, nous définirons les notions de base de la logique floue.

III.2. Historique

Voici un petit aperçu historique de la logique floue [22] :

- 1965 : Concept d'ensemble flou introduit par Lofti Zadeh (Berkeley)
  "Fuzzy set theory" : définition des ensembles flous et des opérateurs associés
- 1970 : Premières applications
  Systèmes experts, aide à la décision en médecine, commerce ...
- 1974 : Première application industrielle
  Régulation floue d'une chaudière à vapeur réalisée par Mamdani
- 1985 : Les Japonais lancent des produits avec "Fuzzy Logic Inside"
  Machines à laver, appareils photos, ...
- 1990 : Généralisation de l'utilisation de cette technique.
  Appareils électroménagers, systèmes audio-visuels, systèmes d'automobile et décision, diagnostic, reconnaissance, ……etc.

III.3. Les domaines d'applications de la logique floue

Les domaines d'applications de la logique floue sont très nombreux. On la retrouve [23] :

- En automatique, pour faire de la commande et de la régulation floue, etc.
- En traitement du signal, pour faire de la fusion de données, de la classification, de la reconnaissance de forme ou de la recherche d'information, etc.
- En robotique, pour faire de la planification de trajectoire, etc.

- En traitement d'image, pour atténuer le bruit d'une image, pour faire de l'interpolation, etc.

III.4. La logique floue

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en 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, nous permettons à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux. La logique floue confère ainsi une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes. Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel [21].

III.5. Logique floue et la logique classique

La logique classique est un pan des mathématiques relativement bien connu du public. C'est sur son principe que fonctionne les ordinateurs, calculateurs et la plupart des machines numériques. En logique classique, les décisions sont binaires : soit vraies, soient fausses. C'est sur ce point que la logique floue va se distinguer de la logique classique. En logique floue, une décision peut être à la fois vraie et fausse en même temps, avec un certain degré d'appartenance à chacune de ces deux croyances [23].

Par exemple, considérons ces deux règles d'inférences :

- Si l'objet est à moins de 20 mètres, alors il est proche.
- Si l'objet est à plus de 20 mètres, alors il est loin.

En logique classique, un objet ne pourra être que proche ou que loin. Si la distance à l'objet est de 19 mètres, alors celui-ci sera proche. En logique floue par contre, l'objet sera à la fois proche et loin en même temps. Ici, l'objet qui se situe à 19 mètres, sera par exemple proche à 60% et loin à 40%.

On se rend compte qu'en logique floue, un fait n'a plus une appartenance stricte à une croyance, mais une appartenance "floue" [23].

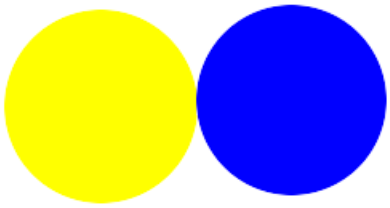


Figure III.1 *Logique classique [23].*

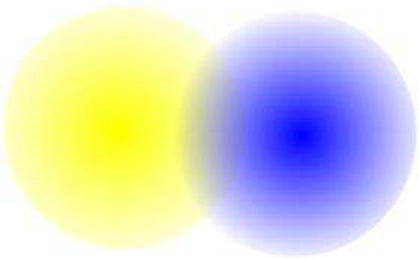


Figure III.2 *Logique floue [23].*

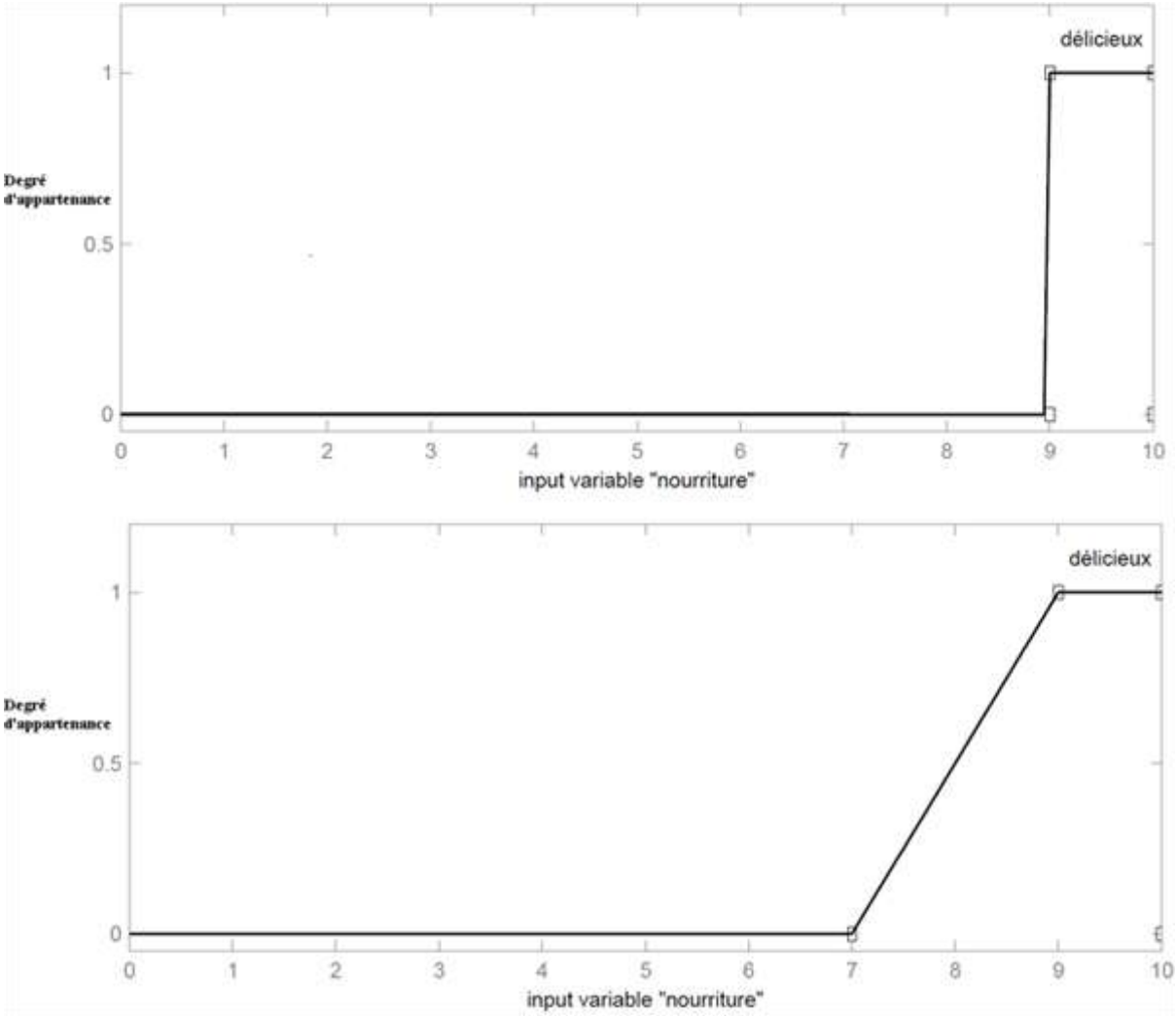


Figure III.3 *Comparaison entre fonction caractéristique d'un ensemble classique et fonction d'appartenance d'un ensemble flou [21].*

III.6. Le principe de fonctionnement d'un système flou

Le principe d'un système flou, c'est de pouvoir calculer des paramètres de sorties en fournissant au système un ensemble de règles formulés en langage naturel. Pour qu'il y ait comptabilités entre les données capteurs, ces règles et les paramètres de sortie, on doit décomposer un système flou en trois parties [23].

a) La fuzzification

La première partie qui permettra de traduire une donnée numérique provenant d'un capteur en une variable linguistique s'appelle la fuzzification. Grâce à une fonction d'appartenance créée par le concepteur du système flou, on va pouvoir transformer une donnée capteur quantitative en variable linguistique qualitative (par exemple, une donnée provenant d'un capteur pourrait être distance=10.56 mètre. Après fuzzification, on aurait donc distance = 30 % proche, 50 % moyen, 20 % loin) [23].

b) Le moteur d'inférence

La seconde partie est le moteur d'inférence qui se chargera d'appliquer chacune des règles d'inférences. Ces règles d'inférences représentant les connaissances que l'on a du système dû à l'expertise humaine. Chaque règle génèrera une commande de sortie [23].

c) La défuzzification

Enfin, la troisième étape est la défuzzification. C'est l'étape permettant de fusionner les différentes commandes générées par le moteur d'inférence pour le donner qu'une seule commande de sortie et de transformer cette variable linguistique de sortie en donnée numérique [23].

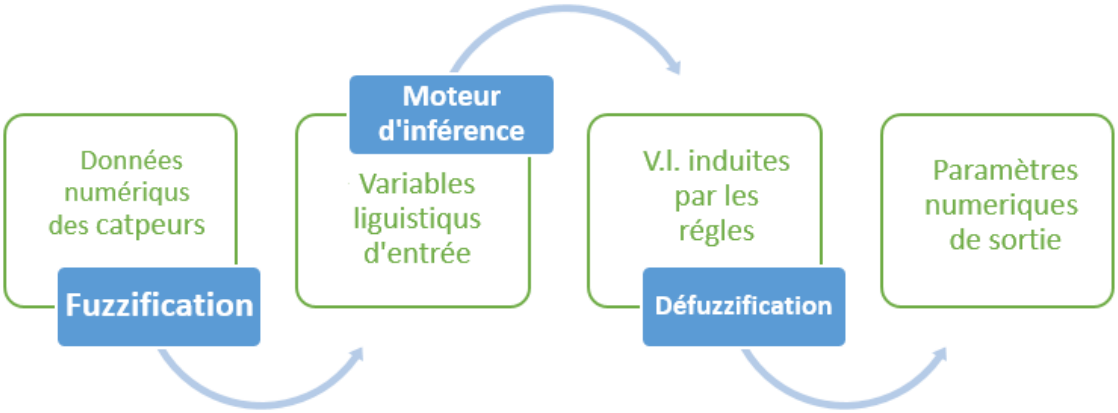


Figure III.4 *Schéma de principe de fonctionnement d'un système flou [23].*

III.7. Les variables linguistiques

Le raisonnement humain n'utilise pas de valeurs numériques, c'est-à-dire qu'il ne dit pas que la température est ici de 15,5 degrés et permet donc d'allumer l'appareil de chauffage. Le raisonnement humain dit plutôt qu'il fait froid ici, allumons l'appareil de chauffage. C'est une variable linguistique au lieu d'une variable numérique [24].

Tandis que les variables en mathématiques prennent généralement des valeurs numériques, dans les applications de logique floue, les valeurs non numériques sont souvent utilisées pour faciliter l'expression de règles et de faits.

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou procédé contient en général des qualificatifs flous tels que : (Quelque, beaucoup, chaud, froid, rapide, lent, Grand, petit, etc.), par exemples [25] :

1. La variable linguistique « Vitesse » peut appartenir aux ensembles flous « Lent » ou « Rapide ».
2. Dans une régulation, la variable linguistique « Ecart » (écart=consigne-mesure) peut appartenir aux ensembles flous « Petit », « Moyen » ou « Grand ».

III.8. Sous-ensembles flous

En théorie des ensembles classiques, l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble est booléenne. Les sous-ensembles flous permettent en revanche de connaître le degré d'appartenance d'un élément au sous-ensemble. Un sous-ensemble flou A d'un univers du discours U est caractérisé par une fonction d'appartenance [26] :

$$\mu A : U \longrightarrow [0,1] \qquad \text{(III.1)}$$

Où μA est le niveau ou degré d'appartenance d'un élément de l'univers de discours U dans le sous-ensemble flou. On peut définir aussi un sous-ensemble flou $\bar{A}$ dans l'univers du discours U comme suit [24] :

$$\bar{A} = \left\{ \left(x, \mu\bar{A}(x) \right) | x \in U \right\} \qquad \text{(III.2)}$$

Avec $\mu\bar{A}(x)$ comme le degré d'appartenance de x dans $\bar{A}$.

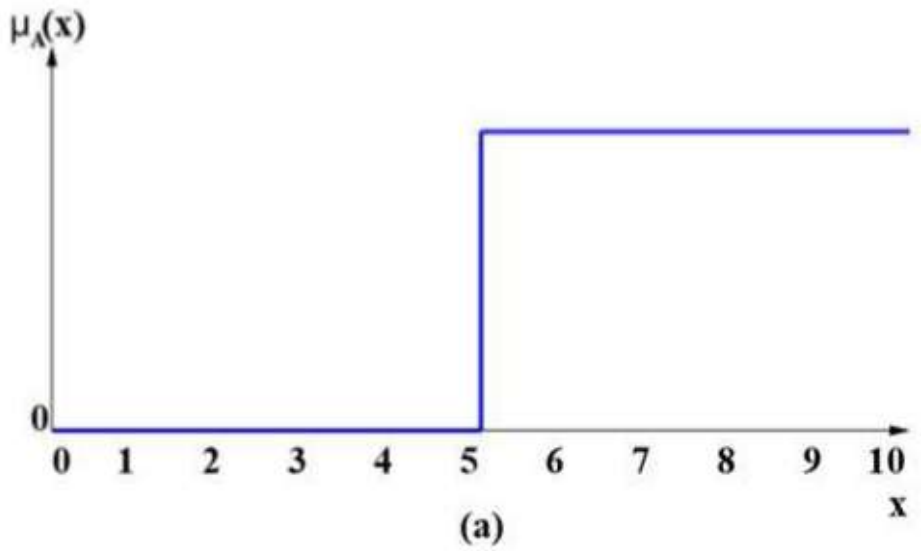


Figure III.5 *Fonction caractéristiques d'un sous-ensemble classique [26].*

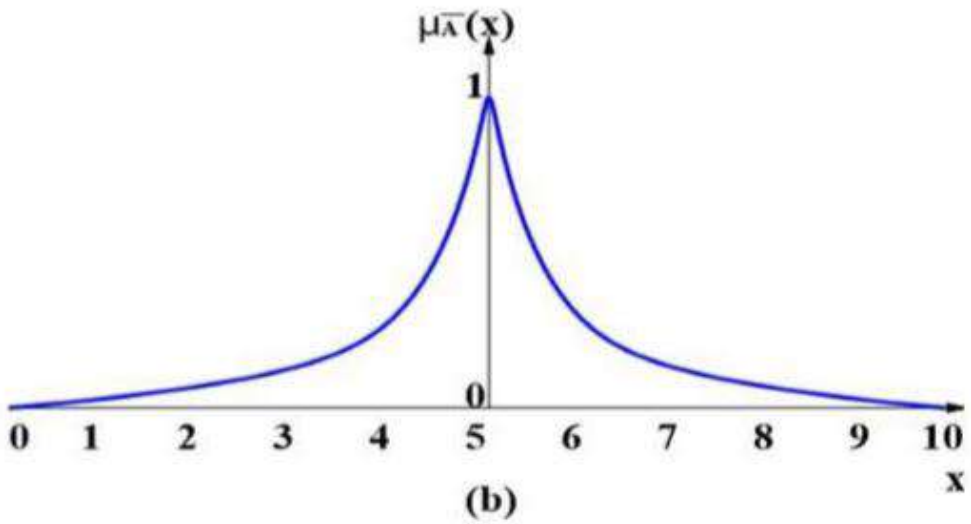


Figure III.6 *Fonction caractéristiques d'un sous-ensemble flou [26].*

III.9. Fonction d'appartenance

Afin de permettre un traitement numérique. Il est indispensable de soumettre les variables linguistiques à des fonctions d'appartenance. Le degré d'appartenance à un ensemble est matérialisé par un nombre compris entre 0 et 1.

Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée μ et appelé « facteur d'appartenance ».

Sur l'exemple figure (III.7), on voit que pour $\theta = 16^{o}C$, le facteur d'appartenance à l'ensemble « froid » vaut $\mu\theta = 0.7$ et le facteur d'appartenance à l'ensemble « chaud » vaut $\mu\theta = 0.35$ [25].

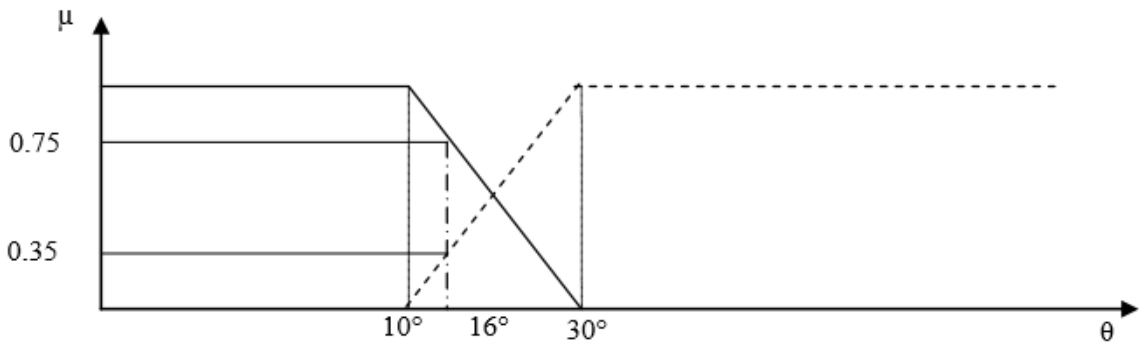


Figure III.7 *Fonction d'appartenance pour la variable linguistique température [25].*

Les fonctions d'appartenances peuvent avoir différentes formes nous donnons ci-après les formes les plus utilisées.

➢ **Fonction d'appartenance triangulaire :**

L'allure est complètement définie par trois paramètres a, b, et c comme suit [25] :

$$\begin{cases} 0 & x \le a \\ \dfrac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ \dfrac{c-x}{c-b} & b \le x \le a \\ 0 & c \le x \end{cases} \qquad \text{(III.3)}$$

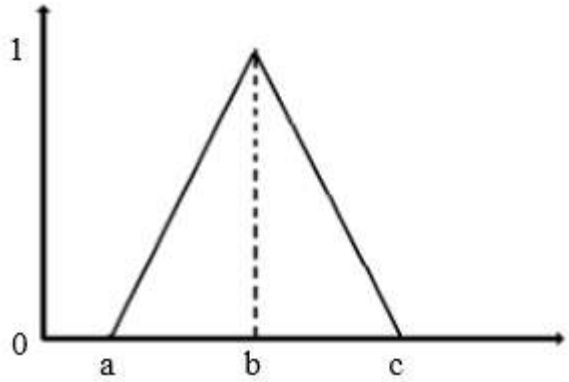


Figure III.8 *Fonction d'appartenance Triangulaire [25].*

Ou bien par la relation suivante :

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

➢ **Fonction d'appartenance trapézoïdale :**

Elle est définie par quatre paramètres a,b,c et d comme suit [25] :

$$\begin{cases} 0 & x \le a \\ \dfrac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ 1 & b \le x \le c \\ \dfrac{c-x}{c-b} & c \le x \le d \\ 0 & c \le d \end{cases} \qquad \text{(III.5)}$$

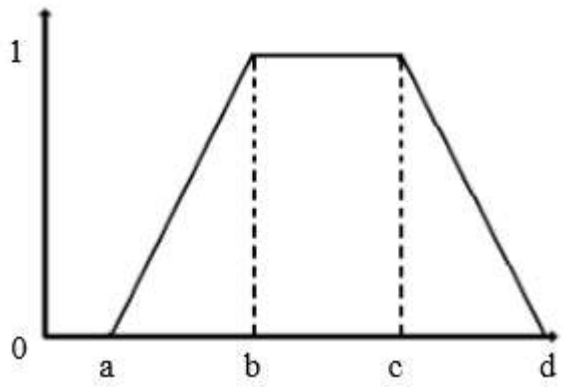


Figure III.9 *Fonction d'appartenance Trapézoïdale [25].*

Ou bien par la relation suivante :

$$\mu(x)=\max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \qquad \text{(III.6)}$$

➢ **Fonction d'appartenance gaussienne :**

Elle est définie par les paramètres m et σ [25] :

$$\mu(x)=\exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma}\right) \qquad \text{(III.7)}$$

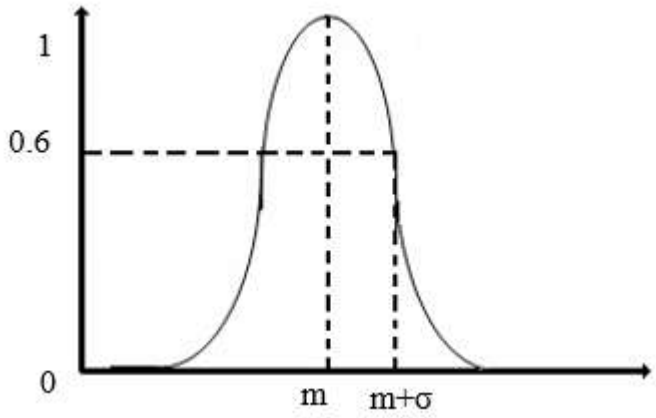


Figure III.10 *Fonction d'appartenance Gaussienne [25].*

III.10. Les opérateurs de la logique floue

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs ET, OU, et NON. Il s'agit d'opérateurs logiques qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. De plus, il existe trois opérateurs de base [25] :

- **L'intersection** (opérateur minimum)

$A \cap B = C$ si et seulement si $\mu_C(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x)$

$\mu_C(x)$ est définie par la valeur minimale de $\mu_A(x) \cap \mu_B(x)$

A et $B = \min(\mu_A(x)\ U\ \mu_B(x))$

- **L'union** (opérateur maximal)

AUB=C si et seulement si $\mu_C(x) = \mu_A(x)\, U\, \mu_B(x)$

$\mu_C(x)$ est définie par la valeur maximale de $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$

A ou $B = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$

- **Le complément**

A si et seulement si $(\mu_A(x))' = 1 - \mu_A(x)$

NON (A) $= 1 - \mu_A(x)$

III.11. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre tout ce qui concerne la logique floue, son historique et ses domaines d'application et on a fait une comparaison entre la logique classique et la logique floue, nous avons présenté aussi son principe de fonctionnement et ses étapes, Ainsi que les sous-ensembles floues et les fonction d'appartenance et les opérateurs de la logique floue et ça pour développer notre propre modèle de logique floue qui est le but de notre étude.

CHAPITRE IV

Résultats et Discussions

IV.1. Introduction

Le but de notre travail est de faire une prédiction intelligente de la microdureté des surfaces après fraisage. Dans ce chapitre on va crées notre propre modèle en utilisant une des méthodes de l'intelligence artificielle qui est la logique floue en se basant sur une base de donné expérimentale, qui comporte la variation de la micro-dureté en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe) sur laquelle on va développer notre modèle sur MATLAB.

IV.2. Procédure et données expérimentale

Tableau IV.1 Données expérimentales.

$a_p\ (mm)$		0.25	0.5	0.75
$f_z\ (mm/dent)$	$V_c\ (m/\min)$			
0.09	100	125,6	117,4	129,6
	150	133,4	132,8	136,4
	200	126,4	142,4	130
	250	120,2	130,6	128,6
	300	122	128,6	125,4
0.12	100	130,6	127,4	132,2
	150	134,6	137,4	141,2
	200	117,4	138,2	130,3
	250	114,8	131,4	126,6
	300	125,2	122,2	127,8
0.15	100	131,6	130,2	130,2
	150	134,6	147,4	136,4
	200	116,8	130,4	131,6
	250	128,4	121,6	125,6
	300	126,2	127,6	127,6
0.18	100	125	140,8	138,4
	150	137,2	123,4	132,8
	200	131,4	136,4	124,4
	250	123	125,4	123,8
	300	137,2	135,4	122

Le tableau ci-dessus présente les valeurs expérimentales de la variation de la microdureté (en H_v) en fonction des paramètres de coupe obtenus en mesurant la microdureté de la surface de l'acier fraisée AISI 1060 grâce au testeur de dureté Vickers.

IV.3. Système flou

Les variables d'entrées (paramètres de coupe) et de sortie (microdureté) du système flou utilisé pour la prédiction de la microdureté pendant le fraisage de l'acier AISI 1060 est représenté dans la figure ci-dessous.

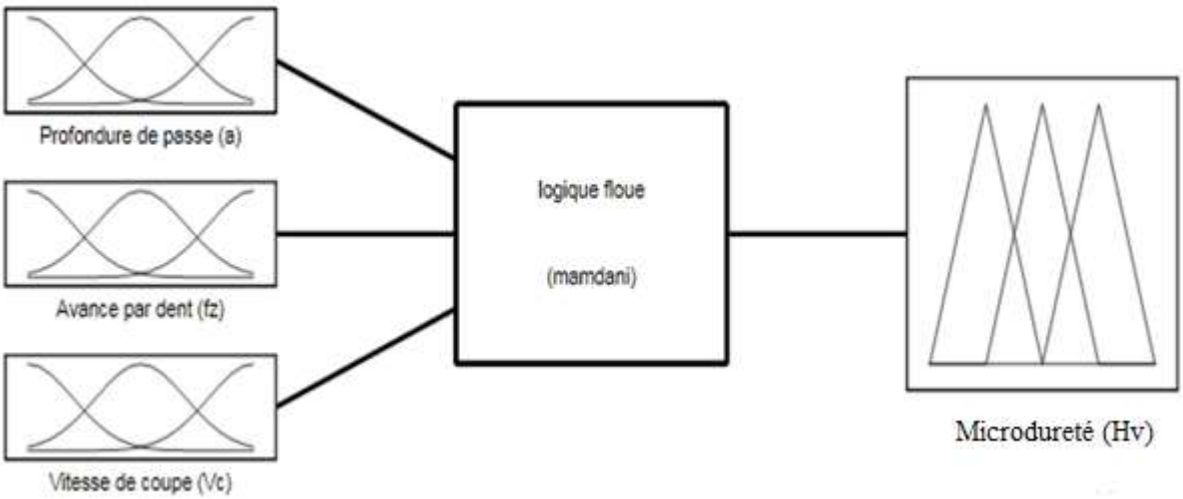


Figure IV .1 *Entrées et sorties du système flou.*

IV.4. Modélisation floue

IV.4.1. Les variables floues

Le tableau ci-dessous représente les valeurs limites des paramètres d'entrée et de sortie, pour le modèle flou utilisé, c'est pour définir l'univers de discours associé à cette étude.

Tableau IV.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
H (Hv)	114.8	147.4

IV.4.2. Définition des variables linguistiques

Dans cette partie nous définirons l'ensemble des variables linguistique associées à chaque paramètre utilisé à partir de la base expérimentale utilisée.

- Les variables linguistiques de la profondeur de passe sont illustrées dans la figure IV.2.

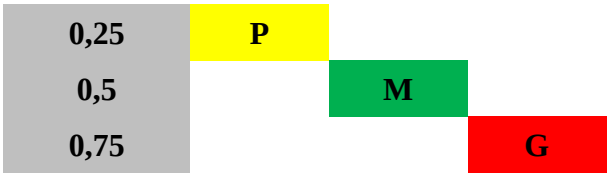


Figure IV .2 *Variables linguistiques pour la profondeur de passe.*

- Les variables linguistiques de l'avance par dent sont illustrées dans la figure IV.3.

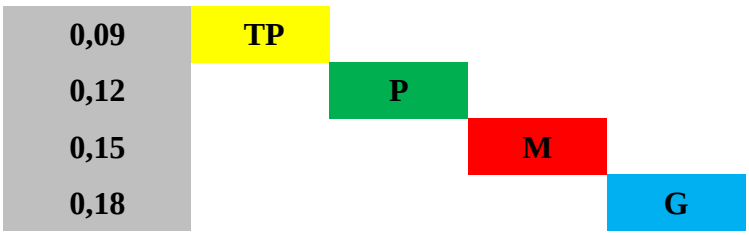


Figure IV .3 *Variables linguistiques pour l'Avance.*

- Les variables linguistiques de la vitesse de coupe sont illustrées dans la figure IV.4.

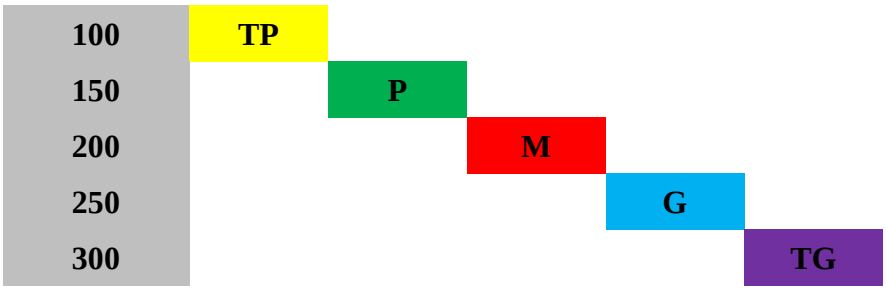


Figure IV .4 *Variables linguistiques pour la vitesse de coupe.*

On va représenter les valeurs expérimentales du paramètre de sortie qui est la microdureté pour tous les essais expérimentaux sous forme d'un nuage de points afin de définir les variables linguistiques associées à la micro-dureté. 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.

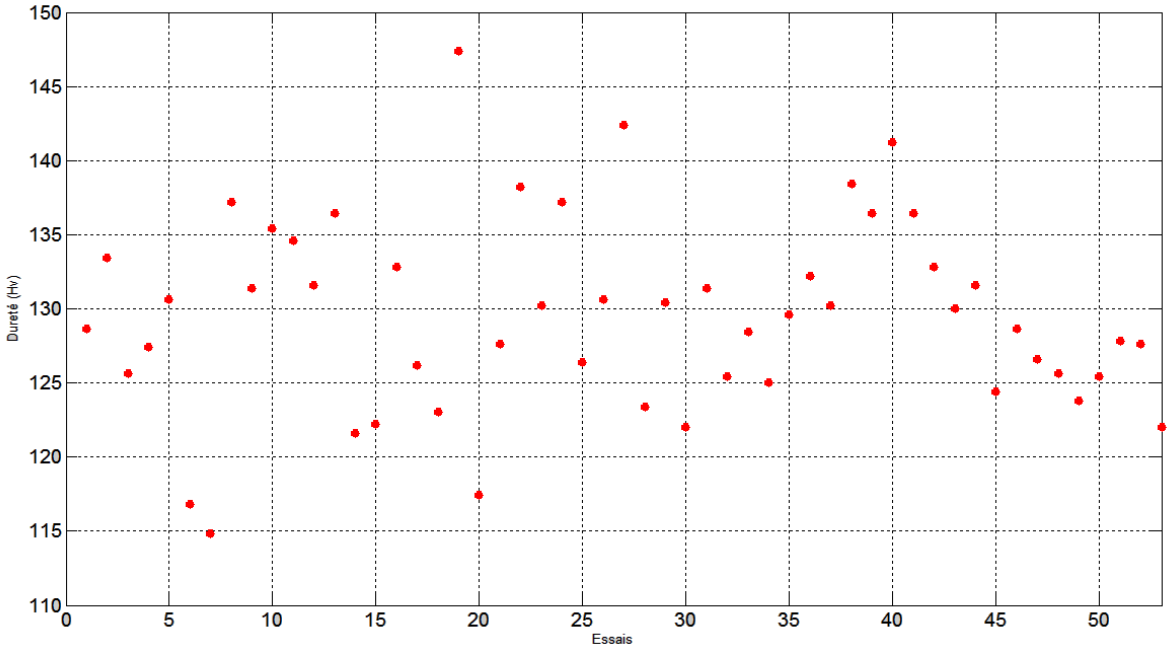


Figure IV .5 *Les valeurs de la microdureté pour l'ensemble des essais.*

- Les variables linguistiques pour le paramètre de sortie (la microdureté) sont représentées dans la figure IV.6.

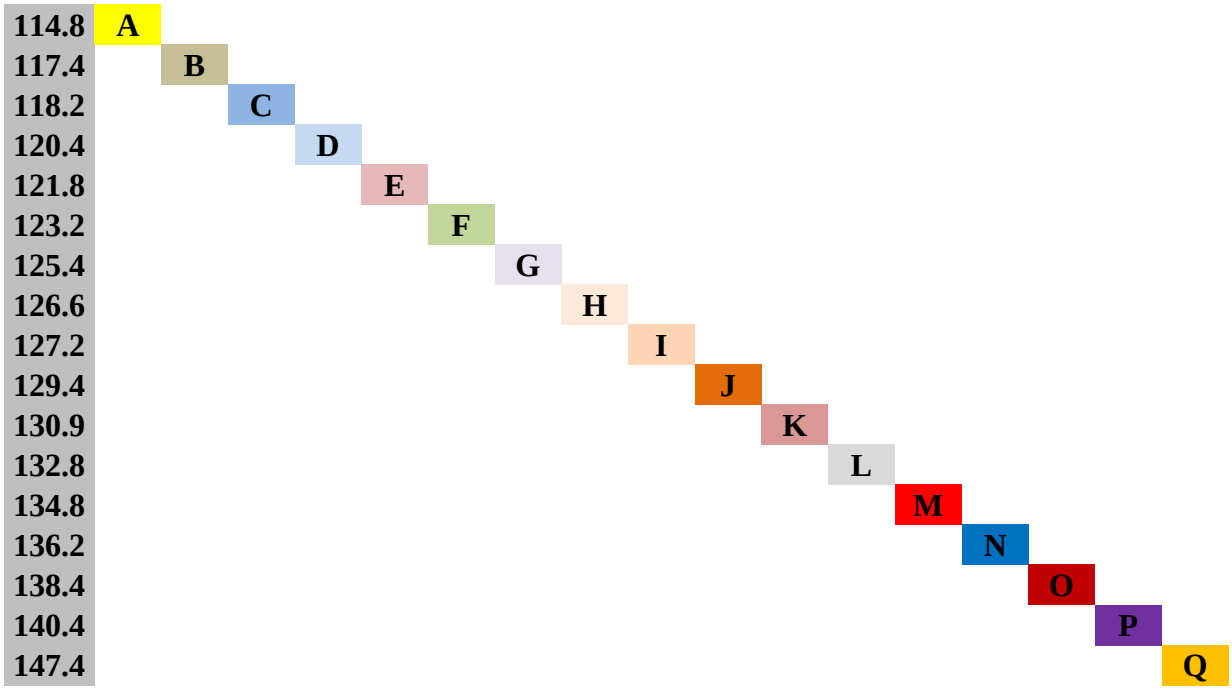


Figure IV .6 *Variables linguistiques pour la microdureté.*

IV.4.3. Les fonctions d'appartenance

Dans cette étude on va utiliser trois types de fonction d'appartenance, la fonction triangulaire, trapézoïdale et Gaussienne.

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 IV.7, IV.8 et IV.9 :

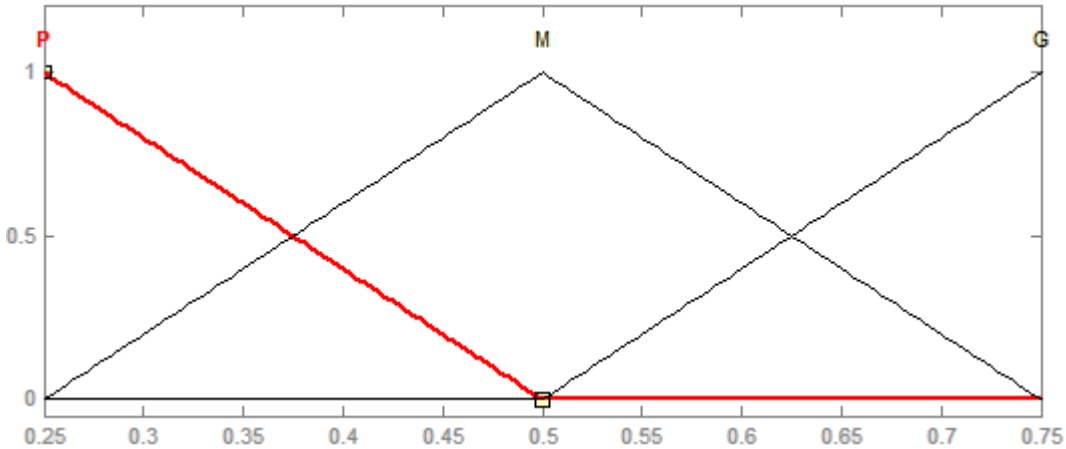


Figure IV .7 *Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la profondeur de passe.*

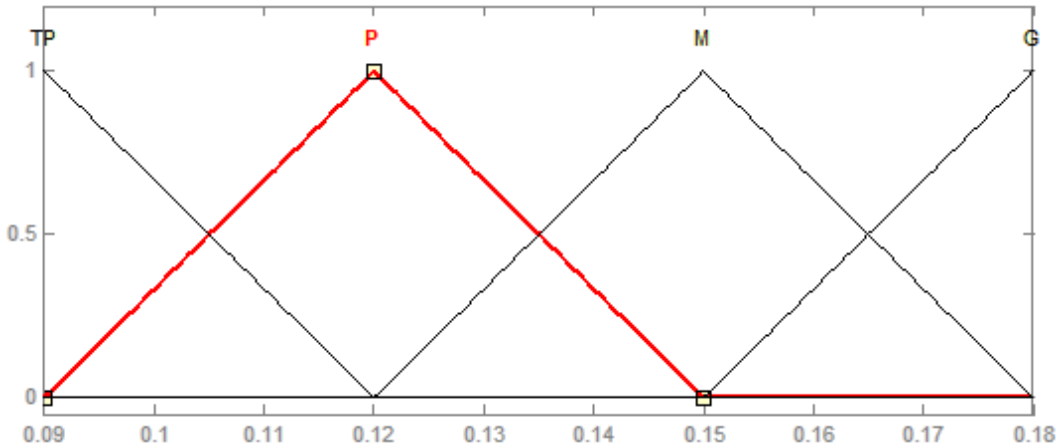


Figure IV .8 *Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour l'avance par dent.*

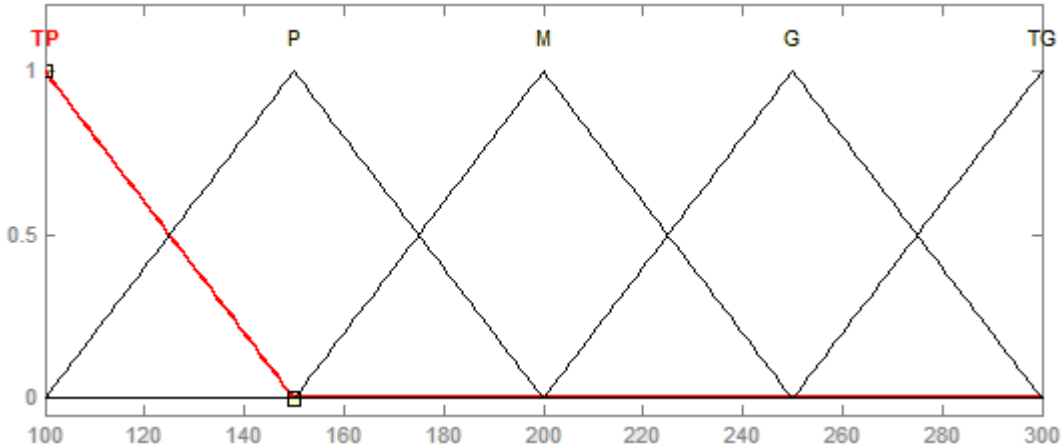


Figure IV .9 *Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la vitesse de coupe.*

➢ Le paramètre de sortie

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

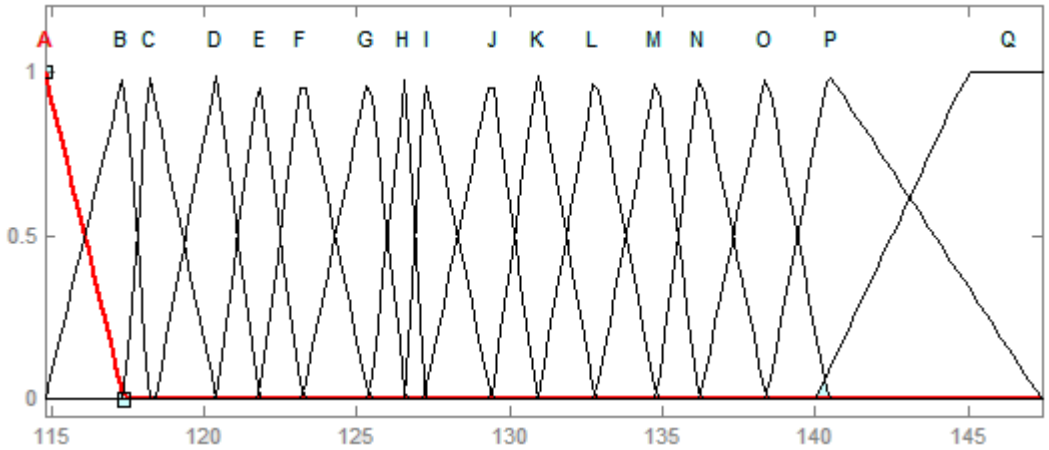


Figure IV .10 *Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la microdureté.*

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 IV.11, IV.12 et IV.13 :

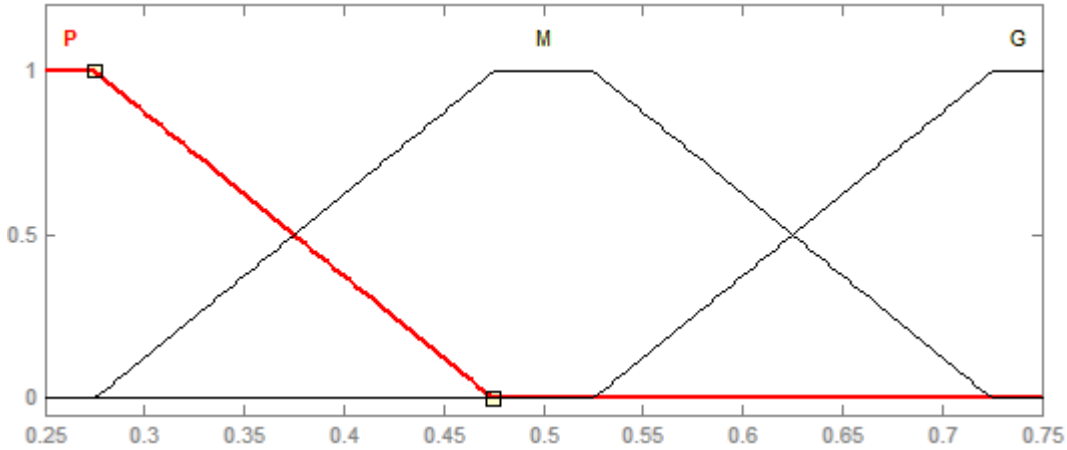


Figure IV .11 *Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la profondeur de passe.*

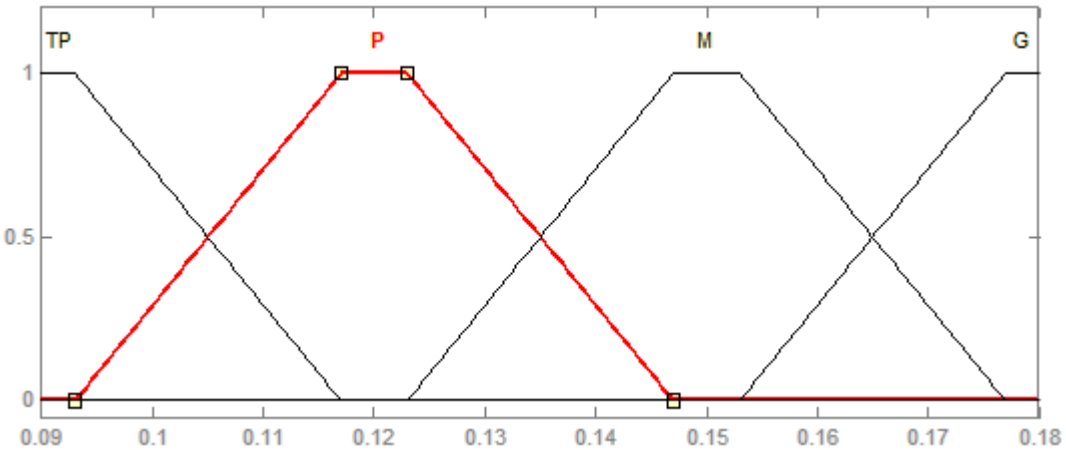


Figure IV .12 *Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour l'avance par dent.*

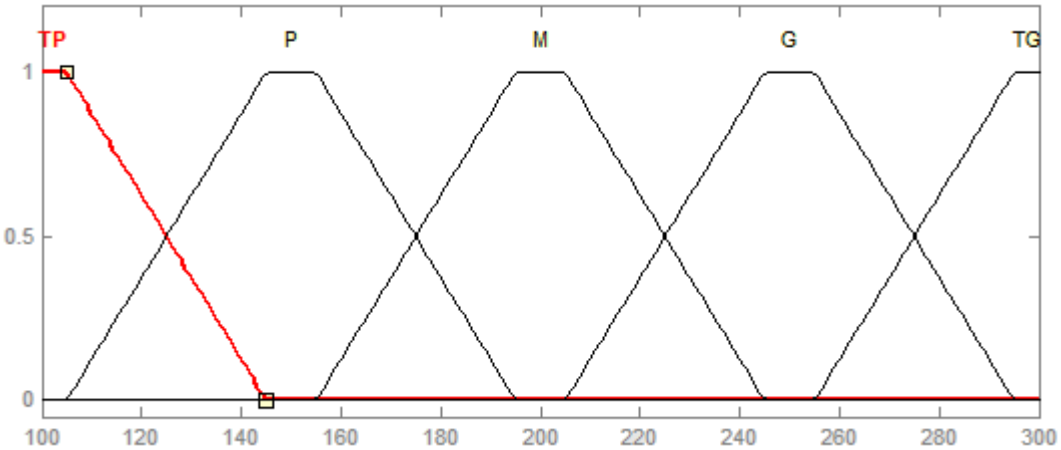


Figure IV .13 *Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la vitesse de coupe.*

➢ Le paramètre de sortie

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

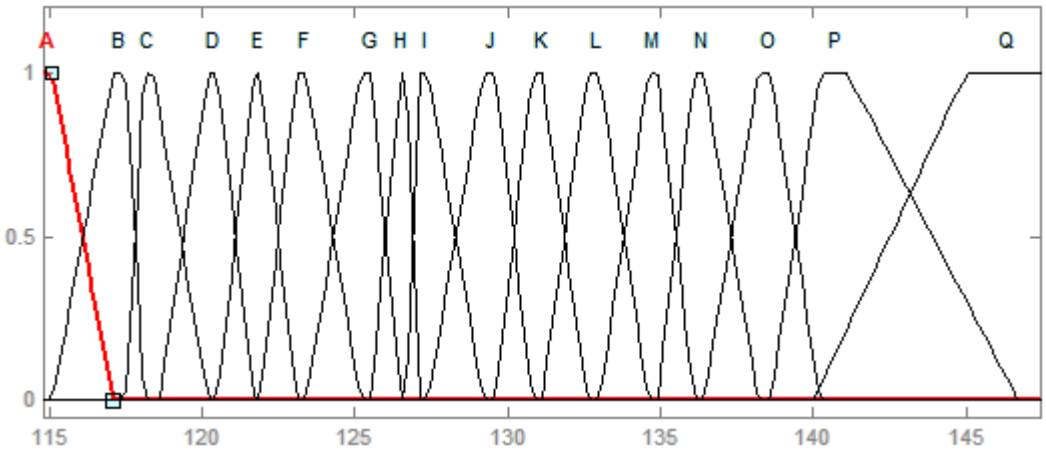


Figure IV .14 *Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la microdureté.*

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 IV.15, IV.16 et IV.17 :

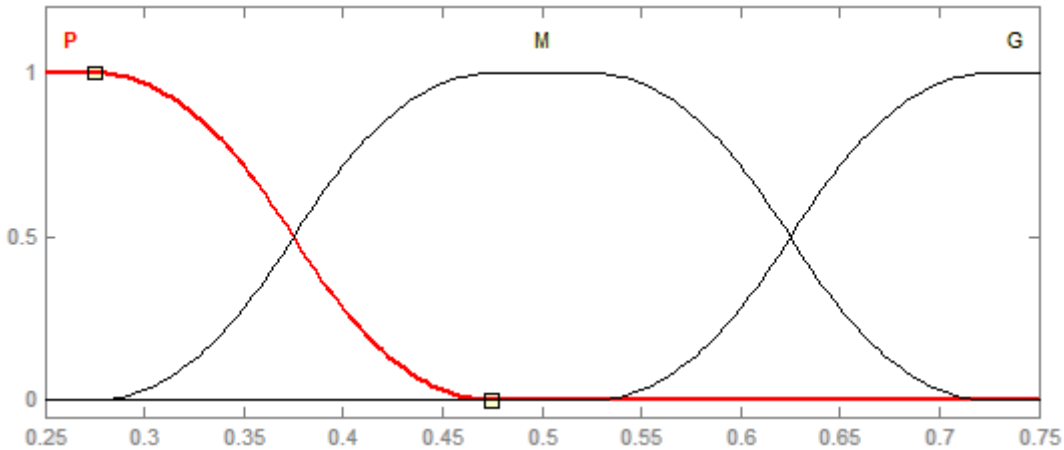


Figure IV .15 *Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour la profondeur de passe.*

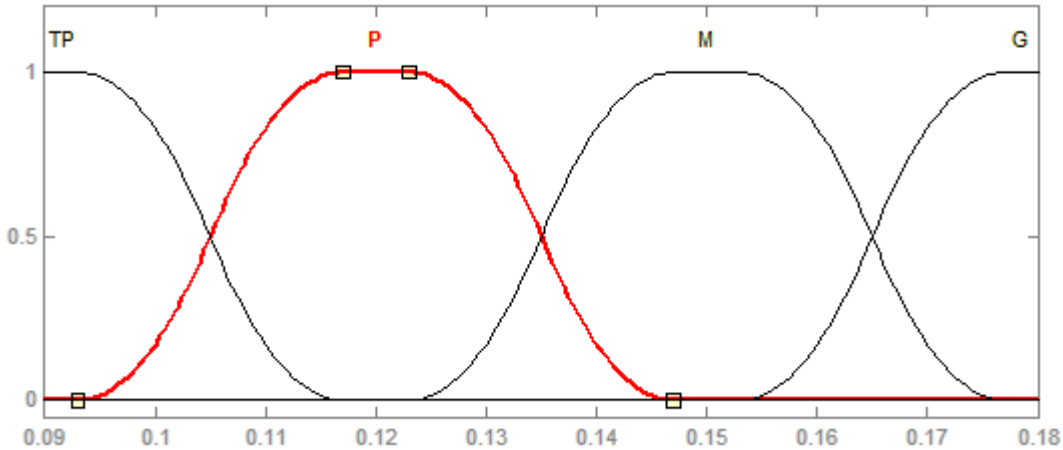


Figure IV .16 *Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour l'avance par dent.*

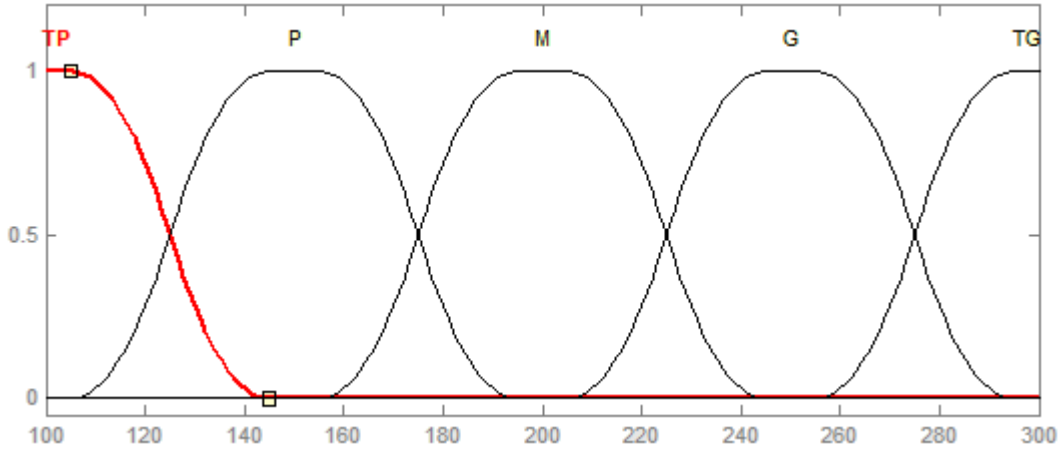


Figure IV .17 *Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour la vitesse de coupe.*

➢ Le paramètre de sortie

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

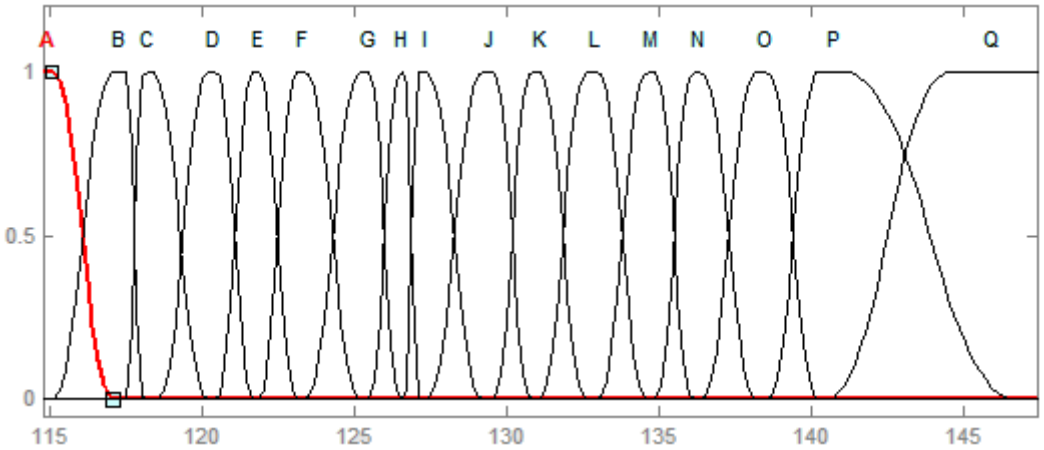


Figure IV .18 *Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour la microdureté.*

IV.5. Les règles floues

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

Chaque règle prend la forme suivante :

Si f_z (variable linguistique) et V_c (variable linguistique) et a_p est (variable linguistique) Alors H (variable linguistique).

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

Tableau IV.3 Les règles floues.

a_p		P	M	G
f_z	V_c			
TP	TP	G	-	J
	P	L	L	N
	M	H	P	J
	G	-	J	I
	TG	E	J	G
P	TP	K	I	L
	P	M	-	P
	M	B	O	-
	G	A	K	H

a_p		P	M	G
f_z	V_c			
P	TG	-	E	I
M	TP	K	K	K
	P	-	Q	N
	M	B	K	K
	G	I	E	G
	TG	H	I	I
G	TP	G	-	O
	P	N	F	L
	M	K	N	G
	G	F	G	F
	TG	N	M	E

IV.6. Résultats et discussion

Maintenant on va transformer les valeurs linguistiques issues du modèle flou à des valeurs numériques, c'est la défuzzification qui représente la dernière étape. Les valeurs de la microdureté obtenues en utilisant le modèle flou avec les trois types de fonctions d'appartenance sont présentés dans le tableau ci-dessus :

Tableau IV.4 Les résultats du système flou.

Essais	Paramètres de coupe			Résultats de la microdureté			
	V_c	f_z	a_p	H_{exp}	H_{trian}	H_{trap}	H_{gauss}
1	300	0,09	0,5	128,6	129	129	129
2	150	0,09	0,25	133,4	133	133	133
3	100	0,09	0,25	125,6	125	125	125
4	100	0,12	0,5	127,4	128	128	128
5	250	0,09	0,5	130,6	131	131	131
6	200	0,15	0,25	116,8	117	117	117
7	250	0,12	0,25	114,8	115	115	115
8	300	0,18	0,25	137,2	137	136	136
9	250	0,12	0,5	131,4	131	131	131
10	300	0,18	0,5	135,4	135	135	135
11	150	0,12	0,25	134,6	135	135	135

Essais	Paramètres de coupe			Résultats de la microdureté			
	V_c	f_z	a_p	H_{exp}	H_{trian}	H_{trap}	H_{gauss}
12	100	0,15	0,25	131,6	131	131	131
13	200	0,18	0,5	136,4	136	136	136
14	250	0,15	0,5	121,6	122	122	122
15	300	0,12	0,5	122,2	122	122	122
16	150	0,09	0,5	132,8	133	133	133
17	300	0,15	0,25	126,2	126	126	126
18	250	0,18	0,25	123	123	123	123
19	150	0,15	0,5	147,4	147	146	147
20	200	0,12	0,25	117,4	117	117	117
21	300	0,15	0,5	127,6	128	128	128
22	200	0,12	0,5	138,2	138	138	138
23	100	0,15	0,5	130,2	131	131	131
24	150	0,18	0,25	137,2	137	136	136
25	200	0,09	0,25	126,4	126	126	126
26	100	0,12	0,25	130,6	131	131	131
27	200	0,09	0,5	142,4	142	142	142
28	150	0,18	0,5	123,4	123	123	123
29	200	0,15	0,5	130,4	131	131	131
30	300	0,09	0,25	122	122	122	122
31	200	0,18	0,25	131,4	131	131	131
32	250	0,18	0,5	125,4	125	125	125
33	250	0,15	0,25	128,4	129	129	129
34	100	0,18	0,25	125	125	125	125
35	100	0,09	0,75	129,6	129	129	129
36	100	0,12	0,75	132,2	133	133	133
37	100	0,15	0,75	130,2	131	131	131
38	100	0,18	0,75	138,4	138	138	138
39	150	0,09	0,75	136,4	136	136	136
40	150	0,12	0,75	141,2	142	142	142
41	150	0,15	0,75	136,4	136	136	136

Essais	Paramètres de coupe			Résultats de la microdureté			
	V_c	f_z	a_p	H_{exp}	H_{trian}	H_{trap}	H_{gauss}
42	150	0,18	0,75	132,8	133	133	133
43	200	0,09	0,75	130	129	129	129
44	200	0,15	0,75	131,6	131	131	131
45	200	0,18	0,75	124,4	125	125	125
46	250	0,09	0,75	128,6	129	129	129
47	250	0,12	0,75	126,6	126	126	126
48	250	0,15	0,75	125,6	125	125	125
49	250	0,18	0,75	123,8	123	123	123
50	300	0,09	0,75	125,4	125	125	125
51	300	0,12	0,75	127,8	128	128	128
52	300	0,15	0,75	127,6	128	128	128
53	300	0,18	0,75	122	122	122	123

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

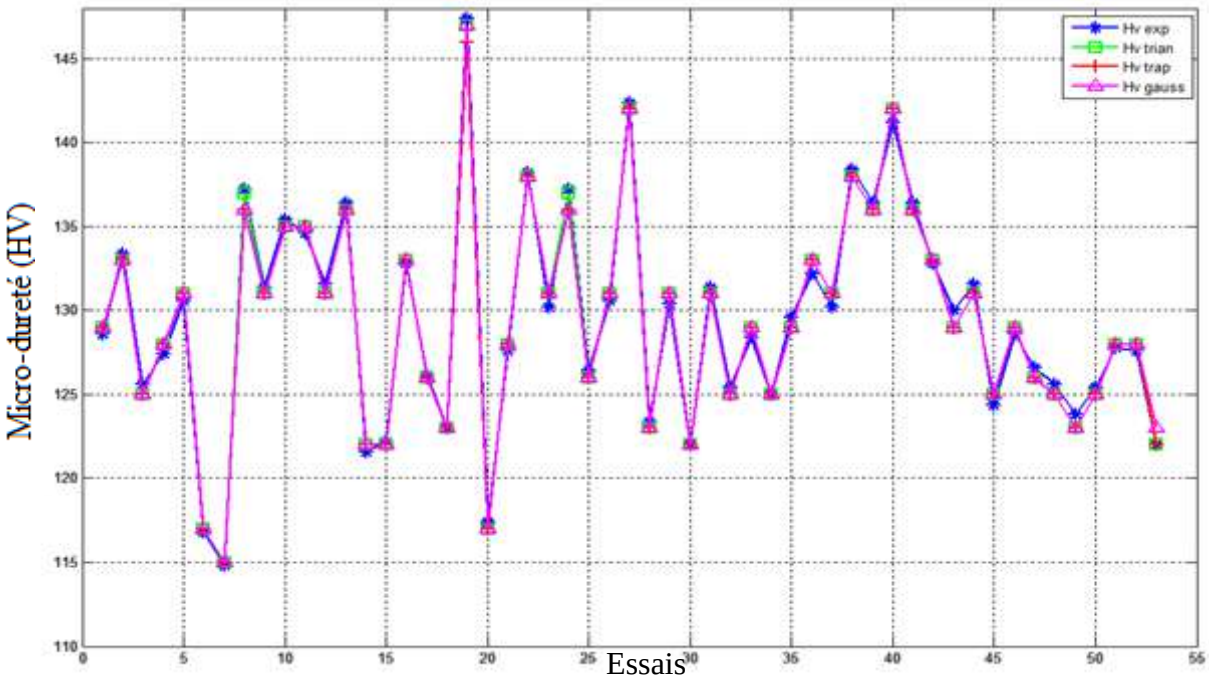


Figure IV .19 *Variation de la microdureté (trapézoïdale, triangulaire et Gaussienne) en fonction du nombre d'essais.*

IV.6.1. Validation des modèles élaborés

Pour la vérification du système on teste sept valeurs expérimentales qui ne sont pas utilisées dans la construction du modèle flou comme présente le tableau IV.5.

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

Tableau IV.5 Résultats du système flou pour les sept essais de vérification.

Essais	Paramètres de coupe			La microdureté			
	V_c	f_z	a_p	H_{exp}	H_{trian}	H_{trap}	H_{gauss}
1	250	0,09	0,25	120,2	122	119	122
2	300	0,12	0,25	125,2	126	123	126
3	150	0,15	0,25	134,6	136	133	136
4	100	0,09	0,5	117,4	119	115	119
5	150	0,12	0,5	137,4	135	136	138
6	100	0,18	0,5	140,8	142	138	142
7	200	0,12	0,75	130,3	133	129	133

La figure IV.20 montre des similitudes entre les valeurs de la microdureté de surface prédite et les valeurs expérimentales.

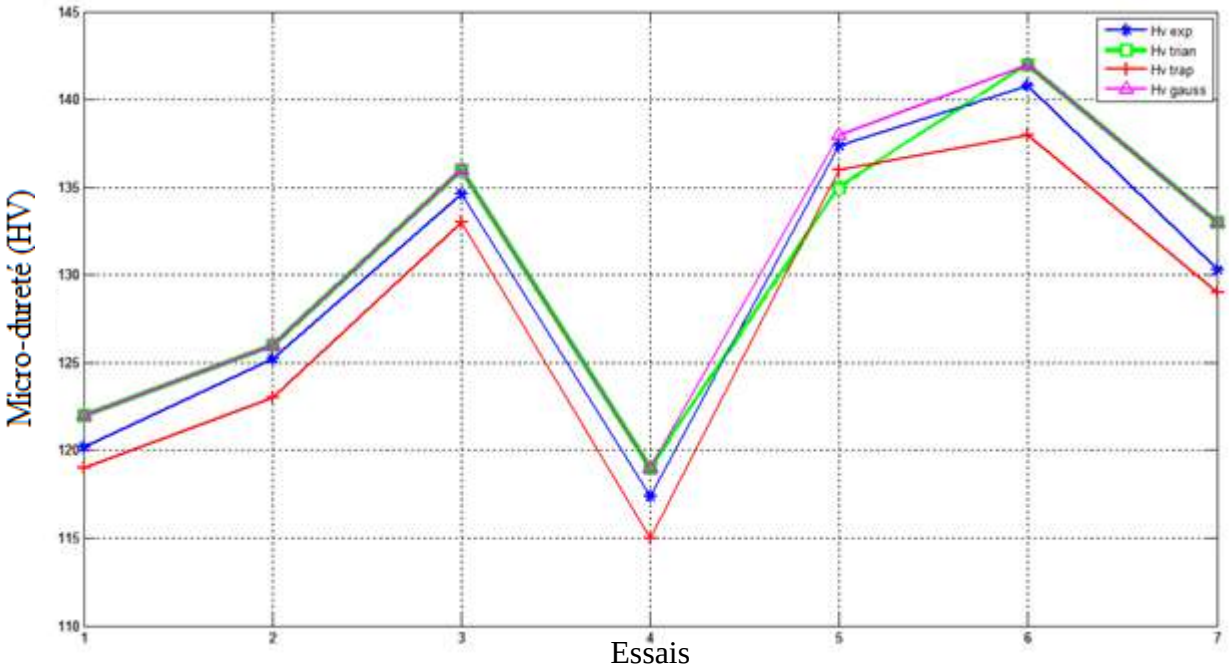


Figure IV .20 *Comparaison de la prédiction des modèles de logique floue avec les résultats mesurés de la microdureté.*

On remarque une similitude entre les valeurs de la microdureté en utilisant les trois types de fonctions d'appartenance, et on remarque que les fonctions d'appartenance triangulaire et gaussienne sont presque identiques. Donc pour faire le choix entre les fonctions d'appartenance de type : triangulaire, trapézoïdal et gaussienne, nous proposons d'utiliser l'écart-type afin de définir les valeurs les plus proches aux résultats expérimentaux.

La relation de L'écart-type est :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(H_{pré} - H_{\exp})^2} \qquad \text{(IV.1)}$$

$H_{\exp}$: La microdureté expérimentale.

$H_{pré}$: La microdureté prédite.

Dans notre cas N = 7 essais.

• L'écart-type des fonctions d'appartenance de type Triangulaire est de l'ordre de 1,8083

• L'écart-type des fonctions d'appartenance de type Trapézoïdale est de l'ordre de 1,9305

• L'écart-type des fonctions d'appartenance de type Gaussienne est de l'ordre de 1,5806

On remarque d'après l'écart-type que les résultats de la fonction d'appartenance de type Gaussienne sont les plus proches aux résultats expérimentaux par rapport aux résultats des fonctions d'appartenance de type Triangulaire et Trapézoïdale.

IV.6.2. Etude de la précision et de l'erreur du système flou

Pour calculer le pourcentage d'erreur des 7 tests, on utilise la formule suivante :

$$e_i = \left[\frac{|H_{\exp} - H_{pred}|}{H_{\exp}}\right] \times 100 \qquad \text{(IV.2)}$$

$H_{\exp}$: Microdureté expérimental

H_{pred} : Microdureté prédite

e_i : Taux d'erreur

Pour calculées le pourcentage de la précision des 7 tests, on utilise la formule suivante :

$$A = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[1 - \frac{|H_{\exp} - H_{pred}|}{H_{\exp}}\right] \times 100 \qquad \text{(IV.3)}$$

Dans notre cas N = 7 essai

A : La précision

Tableau IV.6 Les résultats du système flou.

Essais	Paramètres de coupe			Microdureté			
	V_c	f_z	a_p	H_{exp}	H_{gaus}	**Erreur %**	**Précision %**
1	150	0.09	0.25	120.2	122	1.4975	98.50
2	250	0.09	0. 5	125.2	126	0.6389	99.36
3	250	0.12	0.5	134.6	136	1.0401	98.95
4	150	0.09	0.5	117.4	119	1.3628	98.63
5	150	0.15	0.5	137.4	138	0.4366	99.56
6	250	0.15	0.25	140.8	142	0.8522	99.14
7	100	0.09	0.75	130.3	133	2.0721	97.92
					Précision moyenne		**98.87 %**

IV.6.3. Validation des résultats

La figure IV.21 compare les prédictions du modèle de logique floue avec la microdureté mesurée réelle lors du fraisage des pièces.

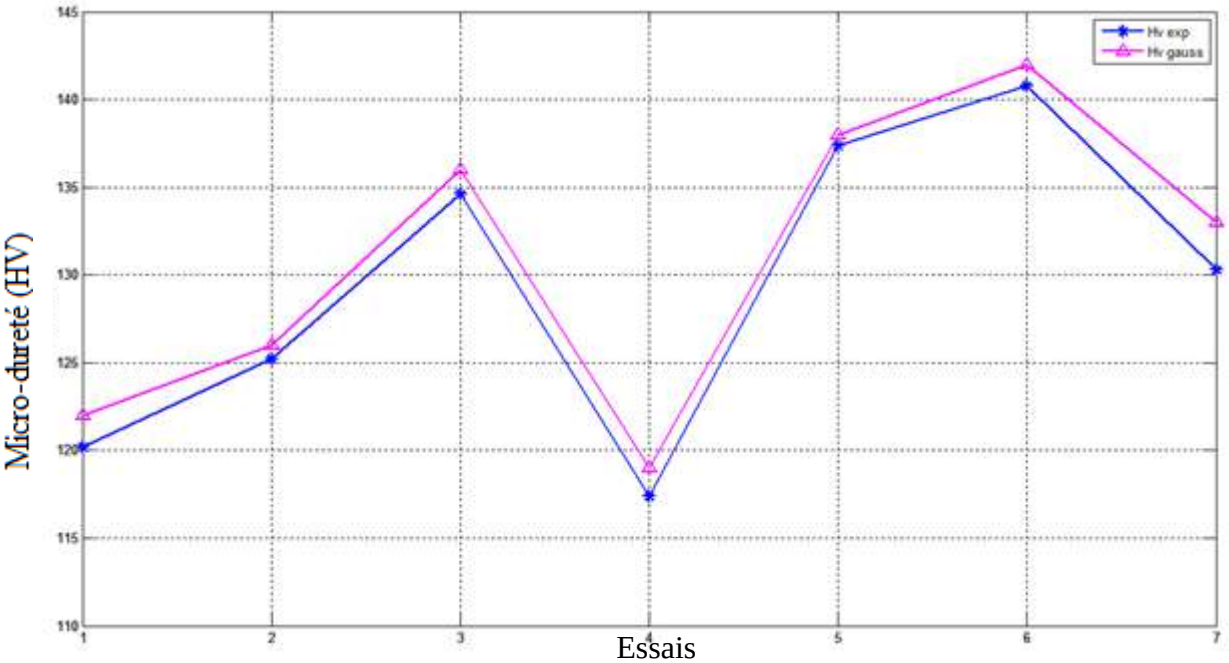


Figure IV .21 *Comparaison de la microdureté prédite et expérimental.*

D'après la figure IV.21 les courbes sont semblables c'est-à-dire que notre modèle de prédiction basé sur la logique floue fonctionne correctement et avec une grande précision et peut être utilisée comme une solution pour prédire la microdureté avant de commencer le

fraisage à condition de respecter une plage bien spécifique de paramètres (définie par l'univers de discours) lors de l'utilisation de ce modèle.

IV.7. Représentation schématique des résultats

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

- La surface (1) représente la variation de la microdureté de surface en fonction de l'avance par dent et la profondeur de passe pour une vitesse de coupe $V_c = 100\ m/\min$.
- La surface (2) représente la variation de la microdureté de surface en fonction de la profondeur de passe et la vitesse de coupe pour une avance par dent $F_z = 0.09\,mm/dent$.
- La surface (3) représente la variation de la microdureté de surface en fonction de l'avance par dent et la vitesse de coupe pour une profondeur de passe $a_p = 0.75\,mm$.

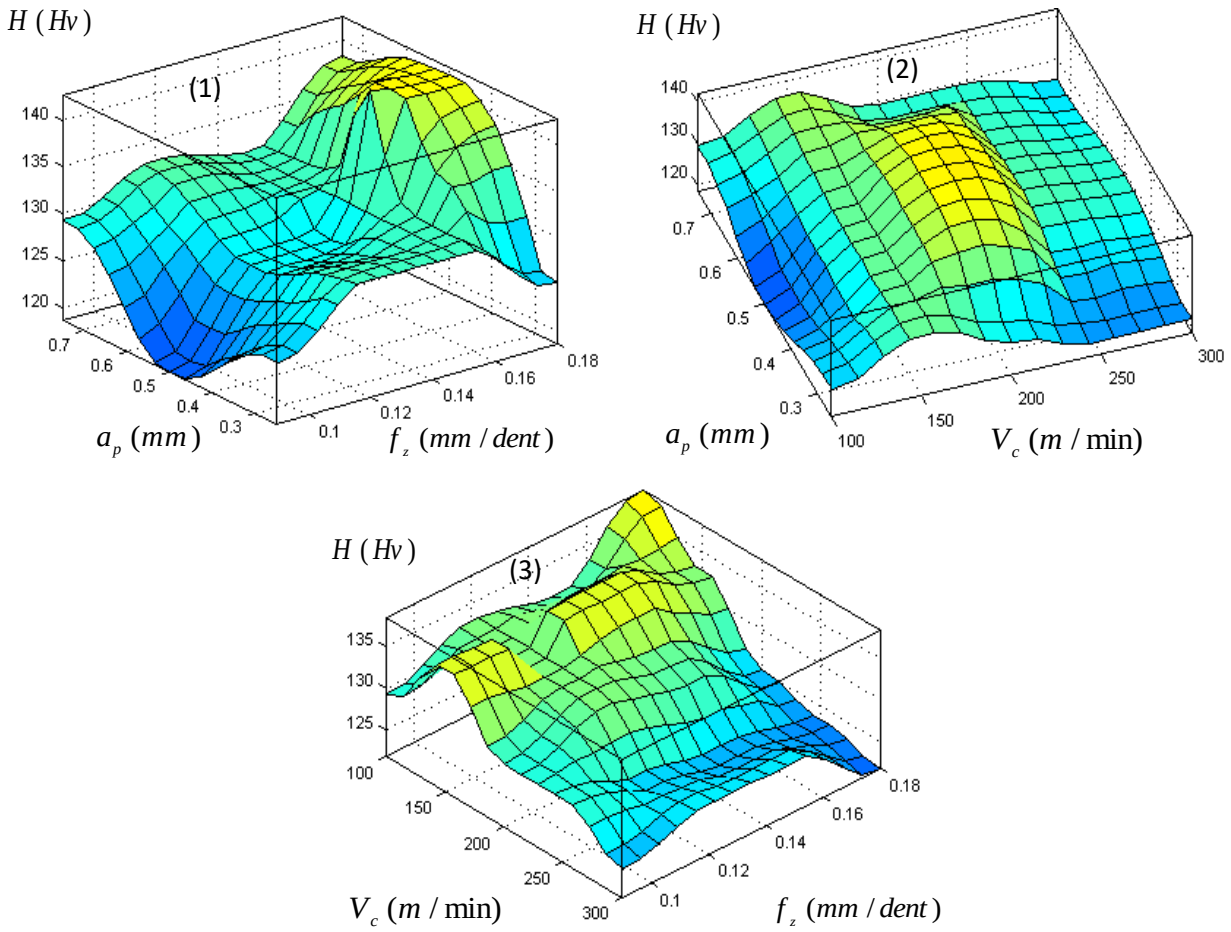


Figure IV .22 *Variation de la micro-dureté prédite avec le modèle de la logique floue en fonction des paramètres de coupe.*

La figure IV.22 illustre l'influence des paramètres de coupe sur la microdureté des surfaces usinées pendant les opérations de fraisage.

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

D'autre part, une avance par dent plus élevée entraîne une augmentation de la microdureté des surfaces usinées.

De la figure IV.22 (2) on constate que la valeur de la microdureté devienne minimale pour des valeurs minimales de vitesse de coupe et des valeurs moyennes de la profondeur de passe (d'ordre de 0.5 mm). Tandis que les valeurs maximales de la microdureté sont obtenues pour des valeurs moyennes de vitesse de coupe (d'ordre de 200 m/min) et des valeurs moyennes de la profondeur de passe.

De la figure IV.22 (3) on constate que la valeur de la microdureté devienne maximale pour des valeurs maximales de l'avance par dent et des valeurs minimales de vitesse de coupe. Tandis que les valeurs minimales de la microdureté sont obtenues pour des valeurs maximales de l'avance par dent et de vitesse de coupe.

D'autre part, une vitesse de coupe plus faible entraîne une augmentation de la microdureté des surfaces usinées quelle que soit l'avance par dent (l'effet de l'écrouissage et le ramollissement).

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé notre propre modèle de prédiction basé sur la logique floue, ou nous avons utilisé une base de données constituée de cinquante-trois essais expérimentales. Les variables d'entrées sont les paramètres de coupe et la variable de sortie est la microdureté des surfaces usinées, et pour validé notre modèle nous l'avons testé grâce à sept essais différentes des essais de la base de données utilisée pour la construction du modèle, les résultats obtenus ont confirmé que notre modèle de logique floue fonctionne correctement et avec une grande précision.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, une étude bibliographique détaillée sur le phénomène de changement de la micro-dureté des surfaces après fraisage a été effectuée, ainsi qu'une approche basée sur la logique floue a été réalisée dans le but de prédire les effets des conditions de coupe sur la micro-dureté des surfaces usinées par fraisage. Les principaux résultats de ce travail peuvent être résumés comme suit :

- La micro-dureté de la surface usinée est beaucoup plus élevée que celle de la pièce brute.
- Une déformation plastique sévère induite par une charge mécanique (l'effet de l'outil de coupe) serait le facteur prédominant déterminant la micro-dureté de la surface usinée par fraisage.
- La micro-dureté de la surface usinée par fraisage diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance par dent en raison des effets de ramollissement thermique.
- Le changement de la micro-dureté résulte des changements de microstructure dus aux effets de couplage mécanique-thermique.
- L'écrouissage induit par la déformation plastique de la surface devrait être le facteur prédominant pour la micro-dureté de la surface usinée par fraisage.
- Le modèle flou, élaboré au cours de cette étude, permet de prédire la micro-dureté des surfaces usinées par fraisage.
- Les résultats obtenus par le modèle flou ont été validés par une étude comparative avec des résultats expérimentaux.
- L'étude de l'efficacité du modèle flou a été confirmée par l'analyse du rapport erreur/ précision.
- Les valeurs prédites sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec un pourcentage d'erreur moyen de 1.13 % pour le calcul la micro-dureté des surfaces usinées par fraisage.

Références Bibliographiques

[1]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Usinage

[2]. Société SANDVIK-COROMANT, Procédés d'Usinage, Travail des Matériaux – Assemblage, Techniques de l'Ingénieur, Réf. Internet : 42190.

[3]. B. Remacle, Usinage : Tournage Fraisage, IFPM formation édition, 2018.

[4]. https://www.optimachines.com/fraiseuses-conventionnelles/8122-fraiseuse-universelle-optimum-mt-200.html

[5]. S. Gara, Cours interactif : le Fraisage, Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul, 2016.

[6]. https://www.leuco.com/leuco/cms/FR/FR/leuco/Cutter_with_Bore/ Finger_Joint_Cutters/Finger_Joint_cutters_HW_real_Z_4_resp_Z_6H

[7]. F. Remli, L'effet d'usinage par Tournage sur un Acier XC18, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2016.

[8]. D. Crochet, Schéma d'un Fraisage en opposition, 2008.

[9]. V. Chomienne, Etude de l'influence de l'Intégrité de Surface en Tournage de l'Acier 15-5PH sur la tenue en Fatigue en Flexion rotative, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2014.

[10]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté_(matériau)

[11]. Rocdacier, Essai de dureté – Brinell – Vickers –Rockwell, 2017.

[12]. L'essai de Dureté, Technologie des Matériaux, Dureté 2 mis à jour 2004 par JHF, lycée la fontaine des eaux.

[13]. www.someco.fr, contrôle de dureté, principe de base.

[14]. https://www.struers.com/fr-FR/Knowledge/Hardness-testing#

[15]. https://www.corrosionpedia.com/definition/775/microhardness

[16]. W. Huang et al, Comparison in Surface Integrity and Fatigue performance for hardened Steel Ball-end Milled with different Milling speeds, Procedia CIRP, Vol N° 71, pp. 267–271, 2018.

[17]. Y. Zhenchao et al, The effect of Milling Parameters on Surface Integrity in high-speed Milling of ultrahigh strength Steel, Procedia CIRP Vol N° 71, pp. 83–88, 2018.

[18]. I. Mathoho et al, Effect of Milling Parameters on Microhardness and Microstructure during Dry and Flood Milling of Ti-6Al-4V, Materials Science and Engineering Vol N° 423 012161, 2018.

[19]. W. Bouzid Saı et al, Influence of Machining by finishing Milling on Surface characteristics, International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol N° 41, pp. 443–450, 2001.

[20]. W. Akhtar et al, Effect of Machining Parameters on Surface Integrity in high speed Milling of Super Alloy GH4169/Inconel 718, Materials and Manufacturing Processes, 2014.

[21]. F. Dernoncourt, Introduction à la logique floue, Licence Creative Commons 6 2.0 Dernière mise à jour 2012.

[22]. A. Cornuéjols, Cours d'Intelligence Artificielle, Introduction à la Logique Floue, 2013.

[23]. F. Piette, La Logique Floue : intérêts et limites, les Systèmes Flous le fonctionnement, Intelligence Artificielle, 2011.

[24]. D. Giaouris, Industrial Automation, Fuzzy Logic, EEE 8005 – Student Directed Learning (SDL).

[25]. M. Berrahil et F.Z. Belhadji, Modélisation et réglage d'un Moteur Synchrone par Logique Floue, Mémoire de Master, Université d'Ain-Temouchent,2017.

[26]. A. Bouzidi, A. Rai, Diagnostic du cancer du sein à l'aide du classification Fuzzy – F.L.R., Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2015.

Résumé

Le manque de compréhension et de contrôle de la micro-dureté de la surface usinée est un obstacle important à l'utilisation généralisée de fraisage. En vue de l'optimisation du processus d'usinage par fraisage, ce travail de mémoire a mis l'accent sur le problème de changement de la micro-dureté des surfaces usinées par fraisage qui a fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques. Un modèle d'inférence floue a été développé afin d'étudier l'influences des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe) sur la micro-dureté surfaces usinées par fraisage. Les valeurs prédites, avec ce modèle floue, sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec un pourcentage d'erreur moyenne de 1.13%.

Mots clés : fraisage, micro-dureté, surface usinée, logique floue, paramètres de coupe, prédiction.

Abstract

The lack of comprehending and control of the micro-hardness of the machined surface is an important obstacle to the use of milling. In order to optimize the machining process by milling, this work has focused on the problem of micro-hardness changing of machined surfaces by milling, which has been the subject of several scientific works. A fuzzy inference model was developed to study the influence of cutting conditions (cutting speed, feed and depth of cut) on the micro-hardness of machined surfaces by milling. The predicted values, with this fuzzy model, are compatible with the experimental values, with an average error percentage of 1.13%.

Keywords : milling, micro-hardness, machined surface, fuzzy logique, cutting paramtres, pridiction.

الملخص

يعد عدم التحكم في صلادة الأسطح المصنعة عقبة رئيسية أمام الاستخدام الواسع للتفريز. يهدف هذا العمل إلى تحسين عملية التصنيع عن طريق التفريز وذلك عن طريق معالجة مشكلة تغيير الصلادة للأسطح المصنعة والذي كان موضوعًا لعدة أعمال علمية. تم خلال هذه الدراسة تطوير نموذج استدلال ضبابي لدراسة تأثير شروط القطع (سرعة القطع، التغذية وعمق التمريرة) على صلادة الأسطح المصنعة عن طريق التفريز. القيم المتوقعة بواسطة هذا النموذج الضبابي تتوافق إلى حد كبير مع القيم التجريبية بمعدل خطأ متوسط قدره 1.13٪.

الكلمات المفتاحية: التفريز، صلادة السطح، السطح المصنع، المنطق المضبب، شروط القطع، التنبؤ.