

**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 : Hammouya Tarek Baafou**

Boughaba Med Fares Eddin

**Thème**

**Prédiction de la Température de Coupe  
Pendant le Fraisage de l'Acier AISI 1060 en  
Utilisant la Logique Floue**

Soutenue publiquement le 09/06/2018 devant le jury :

ABDELKRIM Mourad	MCB	Université Kasdi Mearbah Ouargla	Président
BELLOUFI Abderrahim	MCA	Université Kasdi Mearbah Ouargla	Rapporteur
BENTALEB Fayçal	MCB	Université Kasdi Mearbah Ouargla	Examineur

Année Universitaires : 2017/2018



# *Remerciement*

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

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

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

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

*A à tous les étudiants de promotion, j'adresse un grand merci pour leur soutien et leurs aides.*

# *Dédicace*

*Nous tient à dédier ce modeste travail à :*

*À nos parents.*

*À nos frères,*

*À nos sœurs,*

*À nos familles,*

*À tous nos amis et nos collègues.*

# Table des Matières

<b>Nomenclature.....</b>	<b>01</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>03</b>

---

## Chapitre I

### Généralités sur le Procédé de Fraisage

---

I.1 Introduction.....	05
I.2 Le fraisage.....	05
I.2.1 Définition.....	05
I.2.2 Les opérations de fraisage.....	06
I.2.3 Les fraiseuses.....	06
I.2.4 Classification des fraiseuses.....	07
I.3 Les conditions de coupe.....	10
I.3.1 La vitesse de coupe $V_c$ .....	11
I.3.2 La vitesse d'avance $V_f$ et l'avance par tour $f$ .....	11
I.3.3 La profondeur de coupe.....	12
I.4 L'acier AISI 1060.....	13
I.4.1 Composition Chimique de l'acier AISI 1060.....	13
I.4.2 Caractéristiques physiques de l'acier AISI 1060.....	13
I.4.3 Caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 1060.....	13
I.4.4 Caractéristiques thermiques de l'acier AISI 1060.....	14
I.5 La température de coupe et ses effets.....	14
I.5.1 Temperature de coupe.....	14
I.5.2 Effets de la température de coupe.....	14
I.6 Phénomènes thermiques pendant la coupe.....	15
I.7 Méthodes de mesure de la température de coupe.....	16
I.7.1 Les méthodes expérimentales.....	16
I.8 Conclusion .....	18

---

## Chapitr II

### La Logique Floue

---

II.1 Introduction.....	19
II.2 La logique floue.....	19
II.2.1 Principe de la logique floue.....	19

II.2.2 L'utilisation de la logique floue.....	19
II.2.3 Logique floue et la logique classique.....	20
II.2.4 Les variables linguistiques.....	20
II.2.5 Sous ensembles flous.....	21
II.2.6 Fonction d'appartenance.....	22
II.2.7 Opérateurs de logique floue.....	23
II.2.8 Sstructure d'un système de commande floue.....	25
II.3 Conclusion .....	28

---

### Chapitre III

## Résultats et Interprétations

---

III.1 Introduction.....	29
III.2 Procédure et données expérimentales.....	29
III.3 Système floue.....	30
III.4 Modélisation floue.....	30
III.4.1 Les variables floues.....	30
III.4.2 Définition des variables linguistiques.....	30
III.4.3 Les fonctions d'appartenance.....	32
III.5 Les règles floues.....	37
III.6 Défuzzification.....	37
III.7 Résultats et discussion.....	38
III.7.1 Validation des résultats élaborées .....	40
III.7.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance....	42
III.7.3 Etude de la précision et de l'erreur du système flou.....	43
III.7.4 Validation des résultats présentation schématique des résultats.....	44
III.8 Conclusion .....	45
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>46</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>47</b>

# Liste des Figures

## Chapitre I

### Généralités sur le Procédé de Fraisage

<b>Figure I.1</b>	Mouvement de coupe et mouvement d'avance.....	05
<b>Figure I.2</b>	Fraiseuse horizontale.....	07
<b>Figure I.3</b>	Fraiseuse verticale.....	08
<b>Figure I.4</b>	Fraiseuse universelle.....	08
<b>Figure I.5</b>	Fraiseuse 3 axes.....	09
<b>Figure I.6</b>	Fraiseuse 4 axes.....	10
<b>Figure I.7</b>	Fraiseuse 5 axes.....	10
<b>Figure I.8</b>	La vitesse de coupe .....	11
<b>Figure I.9</b>	La vitesse d'avance.....	12
<b>Figure I.10</b>	Profondeur de passe .....	12
<b>Figure I.11</b>	La microstructure des aciers AISI 1060.....	14
<b>Figure I.12</b>	Exemple de cartographies thermiques (a) face latérale d'outil, (b) face de coupe.....	16

## Chapitre II

### La Logique Floue

<b>Figure II.1</b>	Variable linguistique «par exemple la description de la qualité du service.	20
<b>Figure II.2</b>	L'opérateur NON (complément).....	24
<b>Figure II.3</b>	L'opérateur ET (intersection).....	24
<b>Figure II.4</b>	L'opérateur OU (union).....	25
<b>Figure II.5</b>	Schéma d'une commande flou.....	25
<b>Figure II.6</b>	Defuzzification par valeur maximum.....	27
<b>Figure II.7</b>	Defuzzification par la Méthode moyenne de maximum.....	27
<b>Figure II.8</b>	Défuzzification par méthode le centre de gravité.....	28

## Chapitre III

### Résultats et Interprétations

<b>Figure III.1</b>	Entrées et sorties du système flou.....	30
<b>Figure III.2</b>	Variables linguistiques pour la profondeur de passe.....	31
<b>Figure III.3</b>	Variables linguistiques pour l'avance par dent.....	31
<b>Figure III.4</b>	Variables linguistiques pour la vitesse de coupe.....	31
<b>Figure III.5</b>	Les valeurs de la température de coupe pour l'ensemble des essais.....	32

<b>Figure III.6</b>	Variables linguistiques pour la température de coupe.....	32
<b>Figure III.7</b>	Fonction d'appartenance (de type triangulaire) pour la profondeur de passe.....	33
<b>Figure III.8</b>	Fonction d'appartenance (de type triangulaire) pour l'avance par dent.....	33
<b>Figure III.9</b>	Fonction d'appartenance (de type triangulaire) pour la vitesse de coupe.....	33
<b>Figure III.10</b>	Fonction d'appartenance (de type triangulaire) pour la température de coupe.....	33
<b>Figure III.11</b>	Fonction d'appartenance (de type trapézoïdale) pour la profondeur de passe.....	34
<b>Figure III.12</b>	Fonction d'appartenance (de type trapézoïdale) pour l'avance par dent.....	34
<b>Figure III.13</b>	Fonction d'appartenance (de type trapézoïdale) pour la vitesse de coupe...	34
<b>Figure III.14</b>	Fonction d'appartenance (de type trapézoïdale) pour la température de coupe.....	35
<b>Figure III.15</b>	Fonction d'appartenance (de type Gaussienne) pour la profondeur de passe.....	35
<b>Figure III.16</b>	Fonction d'appartenance (de type Gaussienne) pour l'avance par dent.....	36
<b>Figure III.17</b>	Fonction d'appartenance (de type Gaussienne) pour la vitesse de coupe....	36
<b>Figure III.18</b>	Fonction d'appartenance (de type Gaussienne) pour la température de coupe.....	36
<b>Figure III.19</b>	Défuzzification sous MATLAB.....	38
<b>Figure III.20</b>	Variation de la température (trapézoïdale, triangulaire et Gaussienne) en fonction du nombre essais.....	40
<b>Figure III.21</b>	Variation des températures (trapézoïdales, triangulaires, Gaussienne) en fonction du nombre d'essais .....	41
<b>Figure III.22</b>	Variation de la température prévue par la logique floue en fonction des paramètres de coupe.....	43
<b>Figure III.23</b>	Variation des températures (expérimentale, simulation) en fonction du nombre d'essais.....	44



# Liste des tableaux

---

## Chapitre I

### Généralités sur le Procédé de Fraisage

---

<b>Tableau I.1</b>	Les opérations de fraisage.....	06
<b>Tableau I.2</b>	Composition chimique de l'acier AISI 1060.....	13
<b>Tableau I.3</b>	Les caractéristiques physiques de l'acier AISI 1060.....	13
<b>Tableau I.4</b>	Les caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 1060.....	13
<b>Tableau I.5</b>	La caractéristique thermique de l'acier AISI 1060.....	14

---

## Chapitre II

### La Logique Floue

---

<b>Tableau II.1</b>	Les fonctions d'appartenance.....	22
---------------------	-----------------------------------	----

---

## Chapitre III

### Résultats et Interprétations

---

<b>Tableau III.1</b>	Données expérimentales pour la température de coupe.....	29
<b>Tableau III.2</b>	Valeurs limites pour les entrées et les sorties.....	30
<b>Tableau III.3</b>	Les règles floues.....	37
<b>Tableau III.4</b>	Les résultats du système flou .....	38
<b>Tableau III.5</b>	Les résultats du système flou pour 10 essais pour vérification .....	41
<b>Tableau III.6</b>	l'erreur et précision du système flou pour 10 essais de vérification	43

# Nomenclature

<u>Symbole</u>	<u>Unité</u>	<u>Désignation</u>
$V_c$	$m / \min$	vitesse de coupe
$f_z$	$mm / dent$	Avance par dent
$N$	$tr / \min$	vitesse de rotation
$D$	$mm$	Diamètre
$Z$		Nombre de dent de l'outil
$V_f$	$mm / \min$	vitesse d'avance
$f$	$mm / tr$	Avance par tour
$a_p$	$mm$	Profondeur de passe radial
$T$	$C^\circ$	Température
$r_\epsilon$	$\mu m$	Rayon du bec d'outil
$\gamma$	Degré	Angle d'attaque de l'outil
$\sigma$		L'écart type
$e_i$	%	Erreur
$A$	%	Précision
$a_r$	$mm$	Profondeur de passe axiale

# *Introduction Générale*

# Introduction générale

L'objectif des travaux de recherche en fabrication mécanique a toujours été de trouver des solutions pour améliorer la productivité et la qualité des pièces usinées : le plus rapidement possible, en réduisant au mieux les coûts et les défauts de production [1].

Les opérations de fraisage sont souvent exposées aux plusieurs difficultés comme l'augmentation de la température de coupe. Cette dernière doit être contrôlée depuis le début de l'opération jusqu'à la fin, à l'aide des instruments de mesures et de contrôles [2].

Le contrôle de la température de coupe est réalisé à partir des approches théoriques basées sur des données expérimentales. L'opérateur doit contrôler l'augmentation brusque de la température de coupe pendant l'usinage car elle influence sur la qualité de la pièce à usinée et sur la durée de vie de l'outil. Cette prédiction est basée sur l'expertise de l'opérateur, les expériences précédentes, ou bien sur les recommandations du concepteur. Ces approches sont abordées d'une part sur le plan expérimental en incluant la mesure de la température et d'autre part sur le plan de la simulation numérique thermique.

La logique floue suscite actuellement un grand intérêt de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, mais plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser les modes de raisonnement naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels capables d'effectuer les tâches habituellement prises en charge par les humains. Cette technique permet de modéliser, puis de remplacer l'expertise de surveillance et de conduite du processus provenant du concepteur ou de l'utilisateur [3].

L'objectif de ce travail est de proposer une méthode efficace, économique et facile pour la prédiction de la température de coupe pendant les opérations de fraisage de l'acier AISI1060 en se basant sur les paramètres de coupe (profondeur de passe, avance par dent et vitesse de coupe).

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre porte une étude bibliographique permet dans un premier temps de définir le procédé fraisage, les conditions de coupe, ensuite les aspects thermiques liés à ces procédés.

Le deuxième chapitre présente quelques informations sur la logique floue, les domaines d'application ainsi que leur utilisation de l'outil Fuzzy logic en MATLAB.

Le dernier chapitre, est consacré à l'interprétation et à la discussion des résultats obtenus. En conclusion, nous dresserons un bilan des résultats obtenus.

Chapitre I

# *Généralités sur le Procédé de Fraisage*

## I.1 Introduction

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisable sur des machines outils appelées fraiseuses. Il permet la réalisation des pièces prismatiques ou de révolution, de profils spéciaux telle que 'hélices, cames, engrenages... [4]

Dans ce chapitre nous présentons quelques généralités sur le procédé de fabrication par fraisage, à savoir, des définitions en présentant quelques détails liés aux opérations de fraisage ainsi que les conditions de coupe, les propriétés de l'acier AISI 1060 (C45) et quelques méthodes de mesure de la température de coupe.

## I.2 Le fraisage

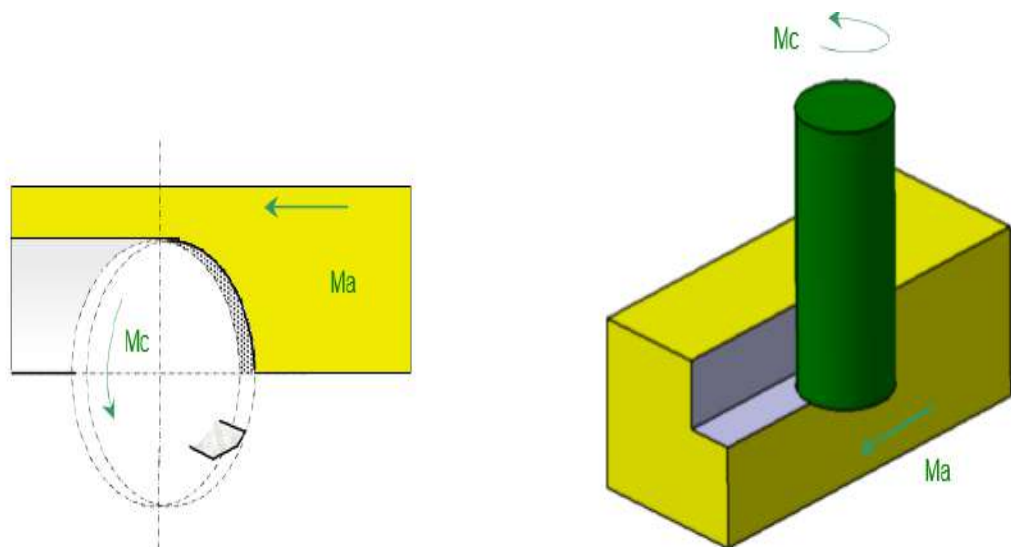
### I.2.1 Définition

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisé au moyen d'un outil multiple (à plusieurs arêtes de coupe) qui est animé d'un mouvement de rotation.

Le mouvement de rotation de la fraise est entraîné par la broche de la machine. Ce mouvement est appelé mouvement de coupe  $M_c$  (mouvement rapide circulaire de coupe).

Le mouvement de translation de la pièce qui est fixée sur la table de la machine. Ce mouvement est appelé mouvement d'avance  $M_a$  (mouvement lent rectiligne uniforme d'avance).











Le mouvement de translation est orienté de façon à pousser la pièce contre la fraise suivant une direction généralement perpendiculaire par rapport à son axe [5].



**Figure I.1** Mouvement de coupe et mouvement d'avance [5]

### I.2.2 Les opérations de fraisage

Tableau I.1 Les opérations de fraisage [6].

Dessin	Opérations	Outils
	<p><b>Surfaçage</b></p> <p>Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise. (surface rouge)</p>	<p>Fraise à surfacer</p> 
	<p><b>Plans épaulés</b></p> <p>C'est l'association de 2 plans perpendiculaires (surfaces vertes)</p>	 <p>Fraise de tailles</p>
	<p><b>Rainure</b></p> <p>C'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire au deux autres plans. (surfaces vertes)</p>	 <p>Fraise 3 tailles</p>
	<p><b>Poche</b></p> <p>La poche est délimitée par des surfaces verticales quelconques (cylindre et plan). C'est une forme creuse dans la pièce. (surface cyan)</p>	 <p>Fraise 2 tailles</p>
	<p><b>Perçage</b></p> <p>Ce sont des trous. Ils sont débouchant (surface bleu) ou borgnes (surface jaune).</p>	 <p>Foret Alésoir (pour le plastique)</p>

### I.2.3 Les Fraiseuses

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisable sur des machines outils appelées fraiseuses. Une fraiseuse est une machine-outil utilisée pour usiner des pièces mécaniques de forme prismatiques, de révolution intérieure et extérieure, de profils spéciaux et hélices, par enlèvement de matière à partir de blocs ou parfois d'ébauche 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 se voir équipée de foret, de taraud ou d'alésoir [7].

#### **I.2.4 Classification des fraiseuses**

##### **a. Ancienne classification**

Avant l'avènement de la commande numérique, les fraiseuses étaient catégorisées de la façon suivante [7] :

##### ***Fraiseuse horizontale***

Dans ce type de fraiseuses, l'axe de la broche est parallèle à la table. Cette solution permet aux copeaux de tomber et donc de ne pas rester sur la pièce. De cette manière, on n'usine pas les copeaux, et la qualité de la pièce est meilleure. Mais ce type de montage était surtout destiné à installer des fraises 3 tailles ou fraises disques dans le but de réaliser des rainurages de profilés plats [7].



**Figure I.2** Fraiseuse horizontale [9].

##### ***Fraiseuse verticale***

Elle est très semblable à une fraiseuse horizontale dans la construction comme il a les mêmes parties : la base, la colonne, la console le chariot et la table. La broche de la machine est positionnée verticalement. Les fraises sont montées sur la broche. La broche est entraînée en rotation par la puissance obtenue par le mécanisme placé à l'intérieur de la colonne. Les surfaces angulaires sont usinées par pivotement de la tête de broche.

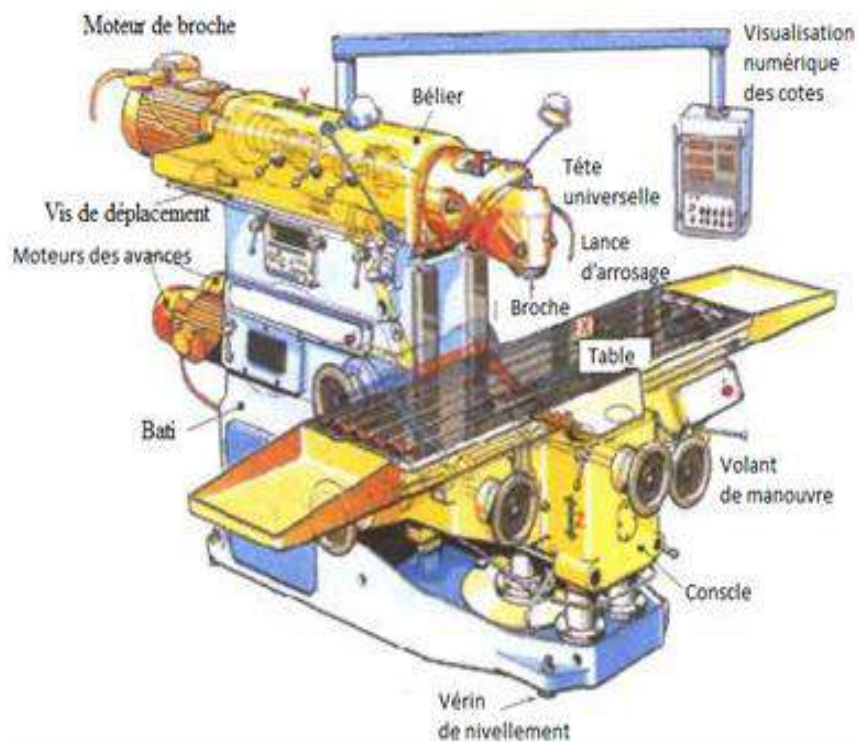


**Figure I.3** Fraiseuse verticale [7].

### *Fraiseuse universelle*

Dans ce type de fraiseuses, l'axe de la broche est réglable [7].

- Tête bi-rotative, avec 2 coulisses circulaires (perpendiculaires l'une par rapport à l'autre)
- Tête oblique, avec 2 coulisses circulaires (inclinée à 45°)
- Tête articulée



**Figure I.4** Fraiseuse universelle [8].

**b. Nouvelle classification**

Aujourd'hui les machines à manivelles ont quasiment disparu, la commande numérique permet de faire bouger simultanément des axes qui étaient autrefois presque systématiquement fixes. Cela a entraîné une révision des classifications plus dépendantes des contraintes rencontrées au niveau des opérations d'usinage [7].

***Fraiseuse 3 axes***

Deux types de ces fraiseuses est envisagés :

- Fraiseuse à broche verticale. L'axe Z est vertical.
- Fraiseuse à broche horizontale. L'axe Z est horizontal.

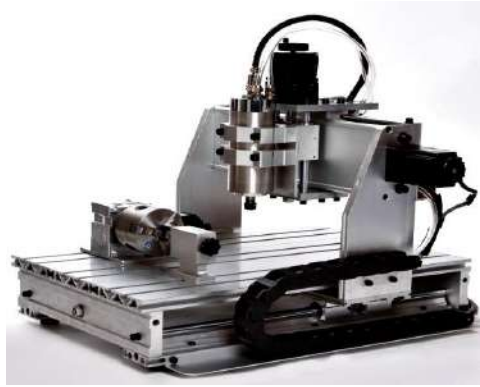
Dans les 2 cas, la fraise est perpendiculaire à la table, c'est la table qui se trouve positionnée de façon différente. Dans les cas de la broche horizontale il y a une meilleure évacuation des copeaux, et du liquide de lubrification qui sinon peut s'accumuler dans les parties creuses (Communément appelées baignoires) [7].



**Figure I .5** Fraiseuse 3 axes [11].

***Fraiseuse 4 axes***

C'est souvent une fraiseuse 3 axes à broche horizontale dotée d'un plateau tournant. C'est une configuration très pratique en production industrielle mécanique (Automobile, Aviation ...etc.) [7].



**Figure I.6** Fraiseuse 4 axes [12].

### ***Fraiseuse 5 axes***

On peut trouver sous cette catégorie plusieurs topologies de construction. Une fraiseuse 5 axes comporte toujours 3 axes linéaires (X, Y, Z) et 2 axes rotatifs à choisir parmi (A, B, C). Les machines vont se différencier par la position des axes rotatifs [7].



**Figure I.7** Fraiseuse 5 axes [13].

### **I.3 Les 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 [14].

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses, ...) ;
- La puissance de la machine ;
- La matière de l'outil (ARS, carbure...) ;
- La matière usinée (acier, aluminium...) ;
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfacage...).

- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement)

### I.3.1 La vitesse de coupe $V_c$

Elle indique la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné. La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par la formule suivante [14].

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

La vitesse de coupe est déterminée en fonction de différents facteurs :

- De la matière à usiner : en général plus elle est tendre et plus la vitesse est élevée.
- De la matière de l'outil de coupe.
- De la géométrie de l'outil de coupe.
- Du type d'usinage : ébauche, finition, filetage, etc.
- Du lubrifiant, qui permet une augmentation de la vitesse (qui ne s'utilise presque plus dans l'industrie moderne, remplacé par l'UGV).
- De la qualité du tour : plus il est rigide, plus il supportera des vitesses élevées.

### La vitesse de broche ( $n$ en tr/min)

Le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil effectue par minute, il s'agit là d'une valeur dépendant de la machine, qui ne renseigne guère sur ce qui se passe à la périphérie où l'arête de coupe fait son office [14].

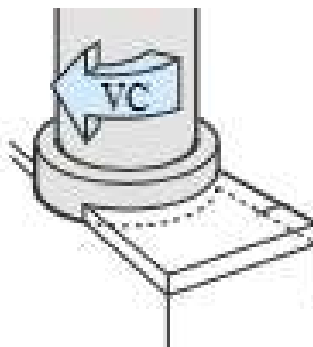


Figure I.8 La vitesse de coupe [14].

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

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



L'avance par tour ( $f$  en mm/tr) est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfacer à travailler en finition. Elle indique de combien l'outil avance au cours d'une rotation [14].

L'avance par dent ( $f_z$  en mm/dent) 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. 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 [14].

Lie par la formule suivant

$$V_f = n(mm/min) \times f_z(mm/dent) \times z \quad (I.2)$$

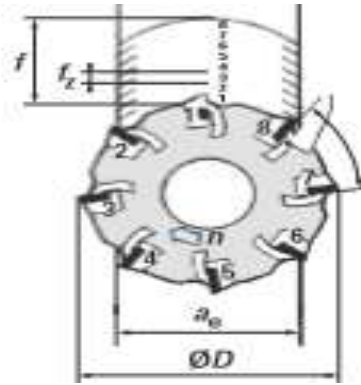


Figure I.9 La vitesse d'avance [14].

### I.3.3 La profondeur de coupe

On distingue deux types de profondeur de coupe en fraisage :

Profondeur de coupe axiale ( $a_p$ ) en surfacage pour le fraisage d'épaulements, est la distance parcourue par l'outil sur la surface de la pièce.

Profondeur de coupe radiale ( $a_e$ ) en surfacage pour le fraisage d'épaulements, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil, c'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce[14].

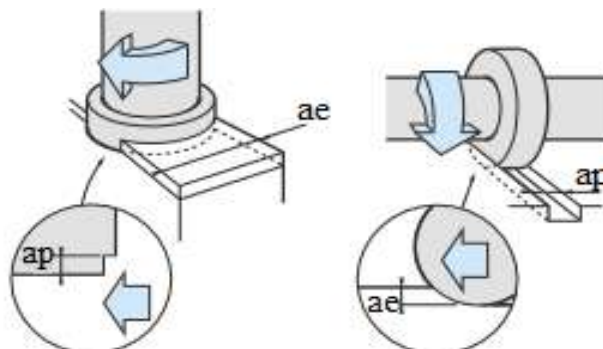


Figure I.10: La profondeur de coupe [14].

#### I.4 L'acier AISI 1060

L'acier AISI 1060 est un acier au carbone (non allié) élaboré pour le formage primaire en produits corroyés. 1060 est la conception dans les deux systèmes SAE et AISI pour ce matériau, la nuance d'un acier est C45 selon la norme AFNOR et 1.0601 est la conception numérique EN, et G10600 est le numéro UNS [15].

##### I.4.1 Composition Chimique de l'acier AISI 1060

La composition chimique de l'acier au carbone AISI 1060 est décrite dans le tableau I.2

**Tableau I.2** Composition chimique de l'acier AISI 1060 [16].

Elément	Contenu %
Fer. Fe	98.35-98.85
Manganèse. Mn	0.60-0.90
Carbone. C	0.55-0.660
Soufres. S	≤ 0.050
Phosphore. P	≤ 0.040

##### I.4.2 Caractéristiques physiques de l'acier AISI 1060

Les caractéristiques physiques de l'acier AISI 1060 est décrite dans le tableau I.3.

**Tableau I.3** Les caractéristiques physique de l'acier AISI 1060 [16].

Propriétés	Valeur
Densité	7.58 g/cm <sup>3</sup>
Point de fusion	1510 °C

##### I.4.3 Caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 1060

Le tableau I.4 présente les propriétés mécaniques de l'acier AISI 1060.

**Tableau I.4** Les caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 1060 [16].

Caractéristiques	Valeur
Résistance à la traction. Ultime	620 M Pa
Résistance à la traction. Rendement	485 M Pa
Module d'élasticité	210 G Pa
Module de masse (typique pour l'acier)	140 G Pa
Allongement à la rupture (en 50 mm)	10%
Réduction de la superficie	45%
Dureté, brinell	183 HV
Dureté, knoop (converti à partir de la dureté brinell)	204 HV
Dureté, Rockwell (converti à partir de la dureté brinell)	89 HV
Dureté, Vickers (converti à partir de la dureté brinell)	192 HV

#### I.4.4 Caractéristiques thermiques de l'acier AISI 1060

Les caractéristiques thermiques de l'acier au carbone AISI 1060 sont données dans le tableau I.5.

**Tableau I.5** Les caractéristiques thermique de l'acier AISI 1060 [16]

Caractéristique	Valeur
Coefficient de dilatation thermique	$11 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$
Conductivité thermique	$49.8 \text{ w /m}^\circ\text{k}$



**Figure I.11** La microstructure des aciers AISI 1060 [17].

### I.5 La température de coupe et ses effets

#### I.5.1 La température de coupe

Les zones de déformation du copeau et de frottement copeau/outil étant relativement restreintes, il en résulte d'importantes variations de température dans les volumes directement affectés par le dégagement de la chaleur. D'après les études de Boothroyd, le gradient de température, dans l'outil peut atteindre les  $800^\circ\text{C/mm}$ . Dans ces conditions, il est délicat de définir une température de coupe. Si bien qu'en général, la température de coupe représente une valeur moyenne du champ thermique d'une zone particulièrement sollicitée, telle que l'interface outil/copeau pour un outil [18].

#### I.5.2 Effets de la température de coupe

L'effet de la température de coupe, particulièrement quant elle est élevée, est nuisible pour l'outil de coupe et la pièce.

Les effets néfastes sur l'outil de coupe son [18] :

- L'usure, qui réduit la durée de vie de l'outil de coupe.
- La déformation plastique des arêtes de coupe si le matériau de l'outil n'est pas assez dur.
- Endommagement des arêtes de coupe dus aux chocs thermiques.

Les effets néfastes de la température sur la pièce [18] :



- Le manque de précision des dimensions de la pièce à cause de la distorsion.
- Expansion et contraction durant et après l'usinage.
- Endommagement de la surface par oxydation, corrosion rapide, inflammation.

## **I.6 Phénomènes thermiques pendant la coupe**

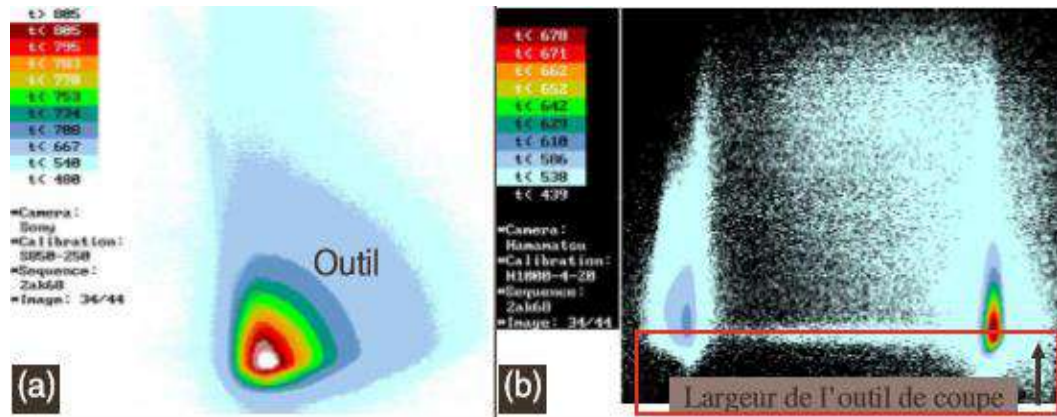
Deux phénomènes distincts contribuent au dégagement de la chaleur :

- La déformation plastique,
- Le frottement à l'interface outil/copeau.

Le premier phénomène affecte tout le volume du copeau produit, le second est localisé aux surfaces en mouvement relatif : écoulement du copeau le long de la surface d'attaque de l'outil. Accessoirement, le frottement entre la pièce usinée et les bords des faces en dépouille, au voisinage de l'arête tranchante, peut également être une cause d'élévation de température de l'outil [18].

Depuis les expériences de Joule, il est bien connu que le travail de frottement peut être considéré comme intégralement converti en chaleur. Cependant, en ce qui concerne le phénomène de déformation, le problème est un peu plus complexe. En effet, toutes les déformations entraînent des modifications de l'état physique du métal (écrouissage), auxquelles correspond une augmentation de l'énergie interne. L'énergie ainsi emmagasinée peut, au moins théoriquement, être récupérée lors du passage inverse de l'état écroui à l'état cristallin, passage qui s'effectue spontanément si la température est suffisamment élevée (recuit). Mais cette énergie ne correspond visiblement qu'à une partie de l'énergie mécanique qu'il a fallu fournir pour produire la déformation qui s'accompagne en effet d'un dégagement instantané de la chaleur [18].

La question importante est donc de connaître la proportion d'énergie mécanique de déformation qui se trouve être convertie directement en chaleur et la proportion emmagasinée dans le métal écroui sous forme d'énergie interne. La conclusion évidente de différentes recherches telles que Taylor est que l'énergie emmagasinée dans le métal écroui ne représente qu'une faible fraction de l'énergie de déformation. Le reste, soit la quasi-totalité, est converti instantanément en chaleur. Cette observation a été confirmée par de nombreux travaux plus récents [18].



**Figure I.12** Exemple de cartographies thermiques (a) face latérale d'outil, (b) face de coupe [19].

## I.7 Méthodes de mesure de la température de coupe

Durant l'usinage, il est supposé que la majorité de la puissance mécanique mise en œuvre se transforme en puissance thermique. Les zones de cisaillement (primaire, secondaire, et tertiaire) générées par la coupe sont le siège de production de chaleur. Les flux de chaleur issus de ces zones sources sont dissipés, d'une façon non équivalente, dans la pièce, l'outil de coupe, le copeau, et une partie minime est évacuée par l'air [20].

L'analyse de température dans la zone de coupe est très complexe et difficile. En effet, les forts gradients thermiques et le mouvement des différents antagonistes (pièce, outil, copeau) nécessitent d'avoir un système de mesure de température qui prend en compte toutes ces spécificités. Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes permettant de remonter à la température de l'arête de coupe de l'outil (mesurer l'élévation de température) [20].

### I.7.1 Les méthodes expérimentales

#### a. Mesures sans contact

##### *Pyrométrie optique*

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique (infrarouge ou visible) que ce corps émet [21].

L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet c'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques [21] :

- Mesures à grande distance ;
- Environnement très agressif ;
- Pièce en mouvement ;
- Localisation des points chauds ;

Les méthodes pyrométriques ne donnent en général qu'une information ponctuelle sur la température et la taille du point de mesure reste souvent importante par rapport à la dimension de la surface analysée. Le pyromètre monochromatique exige la connaissance des paramètres liés aux propriétés d'émissivité des matériaux. De plus les techniques de balayage posent des difficultés pour l'observation des zones à fort gradient thermique à cause du temps de réponse des cellules réceptrices et du temps nécessaire au balayage de la surface [21].

### ***Camera thermique***

Le développement de techniques de mesure par caméra thermique est déjà ancien mais reste d'actualité.

La technique de thermographie peut être définie selon quatre propriétés [21] :

- Elle permet une cadence d'acquisition très élevée
- Elle est discriminative par sa résolution spatiale et thermique
- Elle permet de fournir une cartographie thermique de la scène observée. On peut alors facilement détecter la position des points chauds lors du processus d'usinage.
- Elle est discrète au sens de la mesure puisqu'elle observe sans contact et de manière passive une scène thermique.

Afin de comprendre les phénomènes thermomécaniques issus de la coupe, il est intéressant de connaître la distribution des champs de température dans cette zone. C'est dans cette optique que plusieurs études ont été menées ces dernières années [21].

### **b. Mesures avec contact**

Il existe plusieurs méthodes de mesures thermiques avec contact. Ces méthodes sont actuellement utilisées dans le domaine de la recherche et l'industrie [21].

### ***Vernis et peinture thermosensibles***

Cette technique consiste à déposer sur l'outil un vernis thermosensible dont la couleur change à partir d'une certaine température. La frontière entre les deux couleurs du vernis matérialise l'isotherme correspondant à la température de changement de couleur. C'est une technique globale permettant de localiser les points chauds sur l'ensemble du dispositif mais l'étalonnage est fastidieux et la méthode discontinue [21].

### ***Thermocouples***

Pour mesurer une température élevée, la première méthode à laquelle on peut penser est l'utilisation de thermocouples. Cette méthode consiste à placer des thermocouples au plus près de la zone d'analyse sollicitée en y perçant des trous [21].

La mesure de la température par un thermocouple se base sur le principe suivant : si deux métaux sont soudés à leurs extrémités et si une de ces soudures est portée à une température bien déterminée, l'autre étant maintenue à une température différente, on observera alors une force électromotrice entre les deux jonctions. L'évaluation de cette force, qui dépend des matériaux utilisés, symbolise la température mesurée. L'avantage des thermocouples est la simplicité et la flexibilité de réalisation et d'utilisation pour de simple acquisition et ce à moindre coût. Il existe plusieurs types de thermocouples, les plus répandus sont les thermocouples standard et dynamique [20].

## **I.8 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce premier chapitre, les notions indispensables de la mise en forme par enlèvement de matière par fraisage. La majorité des études présentées concernent principalement le fraisage ainsi que certaines caractéristiques de l'acier AISI 1060.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté un aperçu sur la température de coupe et ses effets ainsi que quelques méthodes pour la mesurer de la température de coupe.

Chapitre II

# *Logique Floue*

## II.1 Introduction

La logique floue a contribué dans le développement de plusieurs domaines. En production industrielle, la logique floue utilisé pour résoudre les problèmes du diagnostic par la classification automatique des signaux vibratoires correspondant aux différents modes de fonctionnement des machines [2].

Le but de ce chapitre est de se familiariser avec la logique floue et ces étapes en donnant des exemples simples.

## II.2 La logique floue

La description d'une certaine situation imprécise ou incertaine peut contenir des expressions floues comme par exemple : très grand, grand, moyen, petit. Ces expressions forment les valeurs d'une variable  $x$ , appelée "linguistique", soumise à des fonctions appelées fonctions d'appartenance. 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, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes [22].

### II.2.1 Principe de la logique floue

Le principe du réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques, proches du langage humain de tous les jours. De plus ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font références à une certaine connaissance du comportement du système. Toute une série de notions fondamentales sont développées dans la logique floue. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base. Dans ce qui suit de ce chapitre, on ne retiendra que les éléments indispensables à la compréhension du principe du réglage par logique floue [22].

### II.2.2 L'utilisation de la logique floue

La logique floue est une technique de résolution de problèmes très puissants avec une large applicabilité dans le control et la prise de décision elle est aussi supposée de travailler dans les situations où il y a de large incertitude et des variations inconnues dans les paramètres et la structure du système [23].

Tandis que son application au niveau des systèmes de réglage et de commande est relativement récente, depuis quelques années la commande par la logique floue a connu, essentiellement au Japon à partir de 1985 un essor appréciable. En effet, elle a été appliquée dans des problèmes industriels pour résoudre des problèmes de régulation aussi divers, liés à l'énergie, le transport, les machines-outils, et la robotique, ... etc. [24]

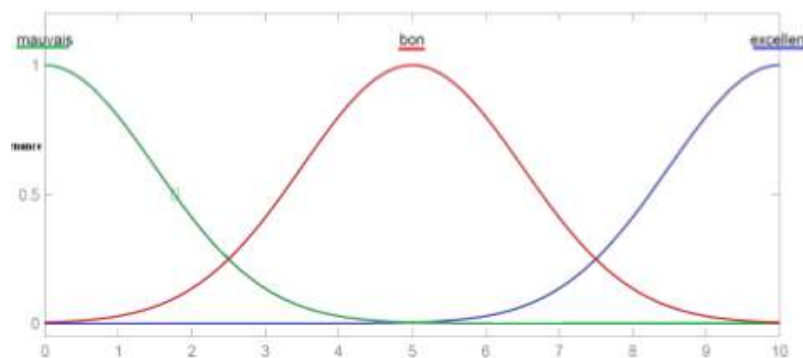
### II.2.3 Logique floue et la logique classique

Dans la logique classique, les variables gérées sont Booléennes. C'est à dire qu'elles ne prennent que deux valeurs 0 ou 1. La logique floue a pour but de raisonner à partir de connaissances imparfaites qui opposent résistance à la logique classique. Pour cela la logique floue se propose de remplacer les variables booléennes par des variables floues [25].

### II.2.4 Les Variables linguistiques

Une variable linguistique est caractérisée par un quintuple  $(V, T(V), G, M)$ , dans lequel [26] :

- $V$  est le nom de la variable définie sur l'univers du discours  $X$ .
- $T(V) = A_1, A_2, \dots, A_n$  est un ensemble des termes linguistiques qui sont des nombres flous, définissant des restrictions sur les valeurs que prend  $V$  dans  $X$ .
- $G$  est un ensemble de règles syntaxiques qui permettent de former d'autres termes linguistiques à partir de  $T(V)$ . On les appelle modificateurs linguistiques. Par exemple, pour définir la fonction d'appartenance du terme linguistique «pas  $A$ » on utilise l'expression  $\mu_{pasA} = 1 - A$ . On peut aussi définir des nouveaux termes linguistiques comme «très très  $A$ », «très  $A$ », «assez  $A$ », «comparable à  $A$ », «un peu  $A$ », «un petit peu  $A$ » en utilisant par exemple les fonctions d'appartenance :  $\mu A_4, \mu A_2, \mu A_{1.25}, \mu A_{0.75}, \mu A_{0.5}, \mu A_{0.25}$
- $M$  est l'ensemble des règles sémantiques qui permettent de définir les termes linguistiques.



**Figure II.1** Variable linguistique « par exemple la description de la qualité du service » [26].

### II.2.5 Sous ensembles flou

Dans la théorie ensembliste classique, l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble est définie par une valeur logique standard : 1 si l'élément appartient au sous-ensemble, 0 sinon. Dans la théorie floue, un élément peut appartenir en partie à un sous-ensemble : son degré d'appartenance est décrit par une valeur comprise entre 0 et 1 [27].

#### Définition

Un sous-ensemble flou A dans un univers du discours X est caractérisé par sa fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  qui associe à chaque élément x de X une valeur dans l'intervalle des nombres réels [0, 1] [27] :

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (\text{II.1})$$

Ainsi un sous-ensemble flou A dans X peut être représenté par un ensemble de couples ordonnés

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad (\text{II.2})$$

#### Propriétés des ensembles flous

- Égalité

Deux ensembles flous A et X sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tout élément de X [28]

$$\forall x \in X, \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (\text{II.3})$$

- Inclusion

Un ensemble flou A est inclus dans un ensemble flou B si toutes ses valeurs de fonction d'appartenance sont inférieures à celles de B sur tout le domaine X [28] :

$$\forall x \in X, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (\text{II.4})$$

- Support

Le support est défini comme l'ensemble des valeurs du domaine X pour lesquelles la fonction d'appartenance n'est pas nulle [28].

$$\text{supp}(A) = \{x \in X, \mu(x) \neq 0\} \quad (\text{II.5})$$

- Hauteur

La hauteur d'un ensemble flou A est la valeur max de la fonction d'appartenance sur le domaine X. Un ensemble flou A est dit normal si  $h(A) = 1$  [28]

$$h(A) = \max_{x \in X} \mu_A(x) \quad (\text{II.6})$$



- Noyau

Le noyau d'un ensemble flou  $A$  est l'ensemble qui contient tous les éléments qui appartiennent sûr et certain à  $A$  (leurs degrés d'appartenance sont égaux à 1) [28]

$$n(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\} \quad (\text{II.7})$$

- Cardinal

Le cardinal d'un ensemble flou  $A$  est la somme des fonctions d'appartenance [28]

$$\text{card}(A) = \sum_{x \in X} \mu_A(x) \quad (\text{II.8})$$

- Partition floue

Soit  $N$  ensembles flous  $A_j$  du référentiel  $X$ .  $(A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_N)$  est dite une partition floue si [28] :

$$\forall x \in X \sum_{j=1}^N \mu_{A_j}(x) = 1 \text{ avec } A_j \neq \emptyset \text{ et } A_j \neq X \quad \forall 1 \leq j \leq N \quad (\text{II.9})$$

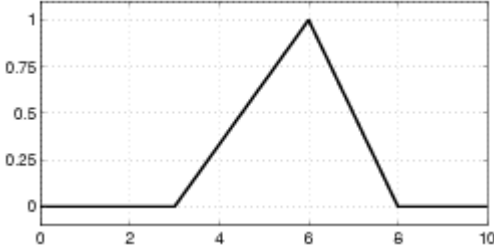
## II.2.6 Fonction d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance qui correspond à la notion de fonction caractéristique en logique classique, elle permet de mesurer le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble flou. En toute généralité, une fonction d'appartenance d'un ensemble flou est désignée par  $\mu_A(x)$ . L'argument  $x$  se rapporte à la variable caractérisée, alors que l'indice  $A$  indique l'ensemble concerné [25].

### a. Différentes formes pour les fonctions d'appartenance

En général, on utilise pour les fonctions d'appartenance 4 formes géométriques : trapézoïdale, triangulaire et de cloche.

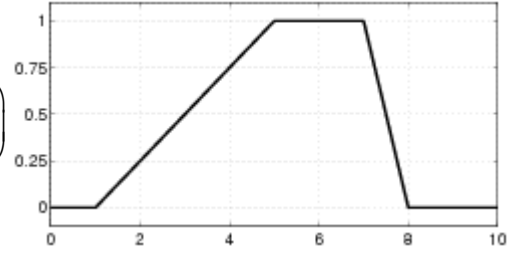
**Tableau II.1** Les fonctions d'appartenance. [22]

Fonction	forme algébrique	forme graphique
<b>Fonction triangulaire</b>	Elle est caractérisée par trois paramètres $(a, b, c)$ : les sommets du triangle $\mu(x) = \left( \min \left( \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-a}{c-b} \right), 0 \right)$	

**Fonction trapézoïdale**

Définie par quatre paramètres (a, b, c, d)

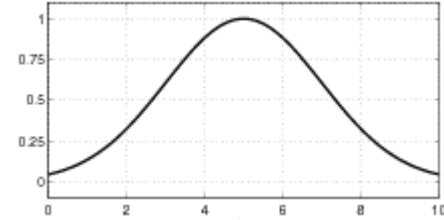
$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$

**fonction Gaussienne**

Définie par c et  $\sigma$  le centre, et l'épaisseur

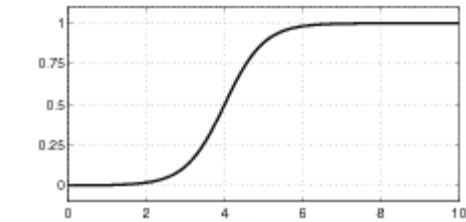
$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{\sigma^2}\right)$$

$\sigma$  : L'écart type

**Fonction sigmoïdale**

Elle est définie par deux paramètres {a, c}

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))}$$

**II.2.7 Opérateurs de logique floue**

Dans la théorie des ensembles classiques, on utilise différentes opérations tel que compléments, union, intersection, les mêmes opérations sont également définies dans la théorie des ensembles flous. Donc, la valeur sur l'intervalle [0 1]. Ces opérations ne peuvent pas être définies de la même manière que celles des ensembles classiques. Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs. Cependant les plus répandus sont ceux dites de Zadeh décrites ci-dessus [29].

- On définit l'union et l'intersection de deux ensembles flous A et B, comme respectivement le plus petit ensemble flou contenant A et B, et le plus grand ensemble flou contenu dans A et dans B d'autre part. En d'autres termes [29] :

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A, \mu_B) \quad (II.10)$$

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A, \mu_B)$$

- Le complémentaire d'un ensemble flou A dans un ensemble de référence E est naturellement défini par la relation (nous utiliserons le symbole de négation) [29] :

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

**a. L'opérateur NON (complément)**

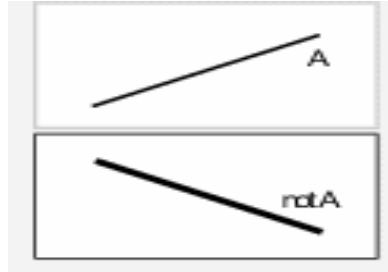
Il est défini mathématiquement par [30] :

$$\bar{A} = \{x / x \notin A\} \quad (II.12)$$

Il est représenté par la fonction

$$\text{non}(\mu_A(x)) = \mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II.13})$$

La figure II.2 montre graphiquement l'opérateur NON (complément) sur une fonction d'appartenance.



**Figure II.2** L'opérateur NON (complément).

### b. L'opérateur ET (intersection)

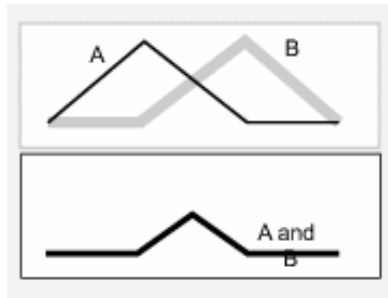
Il est défini mathématiquement par :

$$A \cap B = \{X / X \in A \wedge X \in B\} \quad (\text{II.14})$$

Il est représenté par la fonction

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.15})$$

La figure II.3 montre graphiquement l'opérateur ET (intersection) sur une fonction d'appartenance



**Figure II.3** L'opérateur ET (intersection).

### c. L'opérateur OU (union)

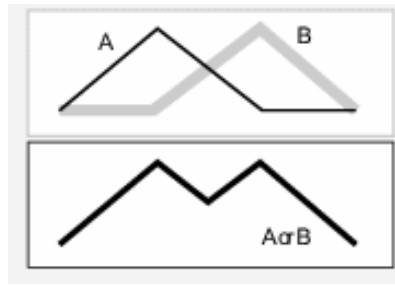
Il est défini mathématiquement par :

$$A \cup B = \{X / X \in A \vee x \in B\} \quad (\text{II.16})$$

Il est représenté par la fonction

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.17})$$

La figure II.4 montre graphiquement l'opérateur OU (Union) sur une fonction d'appartenance



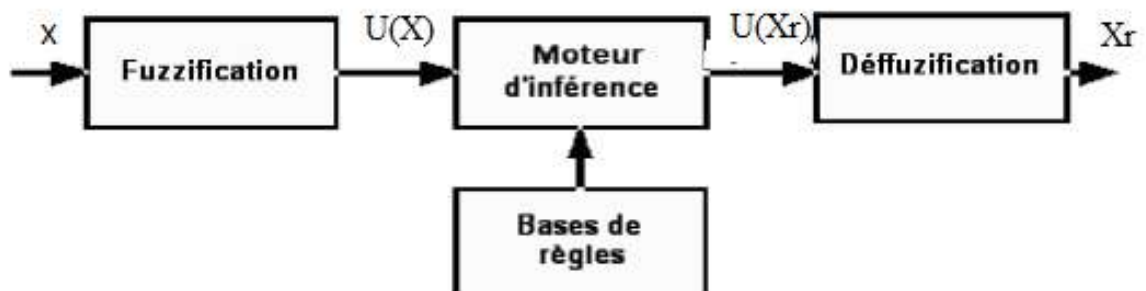
**Figure II.4** L'opérateur OU (union).

### II.2.8 Structure d'un système de commande floue

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

On peut distinguer trois parties principales constituant la structure d'un régulateur floue [22] :

- Une interface de fuzzification,
- Un mécanisme d'inférence,
- Une interface de Defuzzification



**Figure II.5** Schéma d'une commande floue.

#### a. Fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du contrôleur flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant des règles sémantiques définies par un expert. Durant la phase de normalisation, chaque mesure issue du système est modifiée pour fournir une valeur appartenant à un univers du discours relativement simple. On peut choisir comme univers du discours un intervalle centré sur zéro :  $[-c, +c]$ . Si la mesure initiale  $x$  est comprise dans un autre intervalle  $[a, b]$ , la normalisation est souvent réalisée par transformation linéaire, selon [26] :

$$y = \frac{2c}{b-a} \left[ x - \frac{a+b}{2} \right] \quad (\text{II.18})$$

L'univers du discours est ensuite représenté par une variable linguistique, qui comporte un nombre assez restreint de termes (en général trois, cinq ou sept) de façon à limiter le nombre de règles. Enfin, les valeurs normalisées déduites de chacune des entrées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant les variables linguistiques correspondantes [26].

### **b. Moteur d'inférence**

Cette étape consiste à relier les variables physiques d'entrée du régulateur (grandeurs mesurées ou estimées), qui sont transformées en variables linguistiques pendant l'étape de fuzzification, la variable de sortie du contrôleur sous sa forme linguistique, par des règles mentales traduisant une action ou une décision linguistique sur la commande à la sortie du régulateur, face à toute situation se présentant à l'entrée de ce régulateur [22].

Ces inférences sont basées sur plusieurs règles établies par l'expertise et le savoir-faire humain concernant le système à régler. Elles sont structurées sous forme compacte dans une matrice multidimensionnelle dite matrice d'inférence [22].

On exprime les inférences généralement par une description linguistique et symbolique à base de règles pré définies dans la matrice d'inférence. Chaque règle est composée d'une condition précédée du symbole 'SI' appelée prémisses, et d'une conclusion (action, décision, opération ou commande) précédée du symbole 'ALORS' [22].

Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement [22].

- La méthode d'inférence max-min,
- La méthode d'inférence max-prod,
- La méthode d'inférence somme-prod.

Chacune de ces trois méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs de la logique floue.

### **c. défuzzification**

Cette étape consiste à réaliser l'opération inverse de la fuzzification, c'est-à-dire, obtenir une valeur physique de la sortie à partir de la surface obtenue. Plusieurs méthodes de défuzzification existent. Comme pour tous les opérateurs flous, le concepteur du système ou doit choisir parmi plusieurs définitions possibles de défuzzification [22].

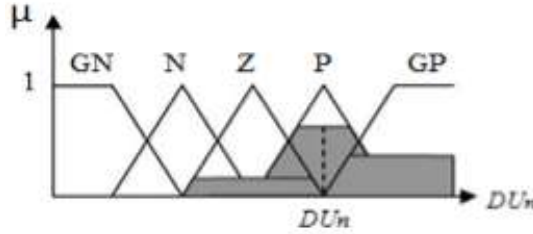
Les plus utilisées sont :

- Méthode du maximum.
- Méthode de la moyenne des maximums.

- Méthode du centre de gravité

### **La défuzzification de Méthode valeur maximum**

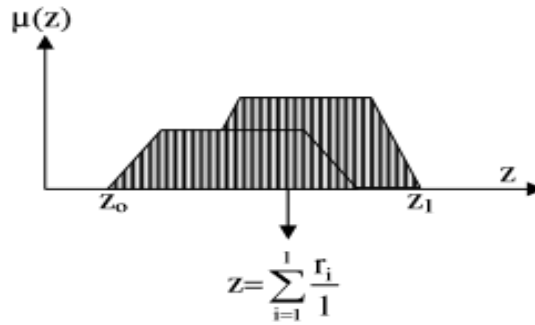
Cette méthode est beaucoup plus simple. La valeur de sortie est choisie comme l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance [31].



**Figure II.6** Defuzzification par valeur maximum [31].

### **La défuzzification de Méthode moyenne**

Cette méthode génère une commande précise en calculant la moyenne des valeurs pour lesquelles l'appartenance est maximale [23].



**Figure II.7** Defuzzification par la Méthode moyenne de maximum [23].

### **La défuzzification par méthode de gravité**

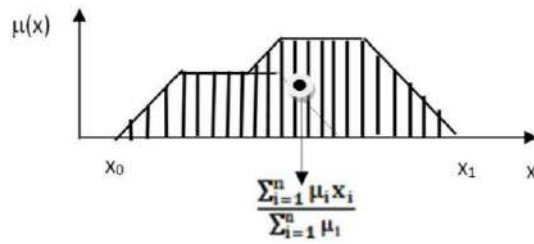
Consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance selon [26]

$$y_{cg} = \frac{\int y \cdot \mu B_{res}(y) dy}{\int y \cdot B_{res}(y) dy} \quad (\text{II.19})$$

En pratique, on estime le centre de gravité en calculant la moyenne d'un certain nombre de points échantillonnés sur la fonction [26]

$$y_{cg} = \frac{\sum y_i \cdot \mu B_{res}(y_i)}{\sum \mu B_{res}(y_i)} \quad (\text{II.20})$$

Le temps nécessaire au traitement est directement proportionnel au nombre de points retenus pour le calcul de la moyenne. Selon les contraintes fixées par l'application, il y a un compromis à réaliser entre la précision souhaitée et le temps de calcul disponible [26].



**Figure II.8** Défuzzification par méthode le centre de gravité [25].

### II.3 conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions fondamentales et les principes de base de la logique floue, cela se fait pour expliquer les détails des étapes, et les méthodes les plus répandus pour la réalisation d'un système basé sur la logique floue.

Chapitre III

# ***Résultats et Interprétations***



### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous utilisons la logique floue, pour prédire la température de coupe, pendant les opérations de fraisage de l'acier AISI1060 en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe). L'objectif étant la surveillance de la température de coupe pendant le fraisage des aciers AISI1060.

### III.2 Procédure et données expérimentales

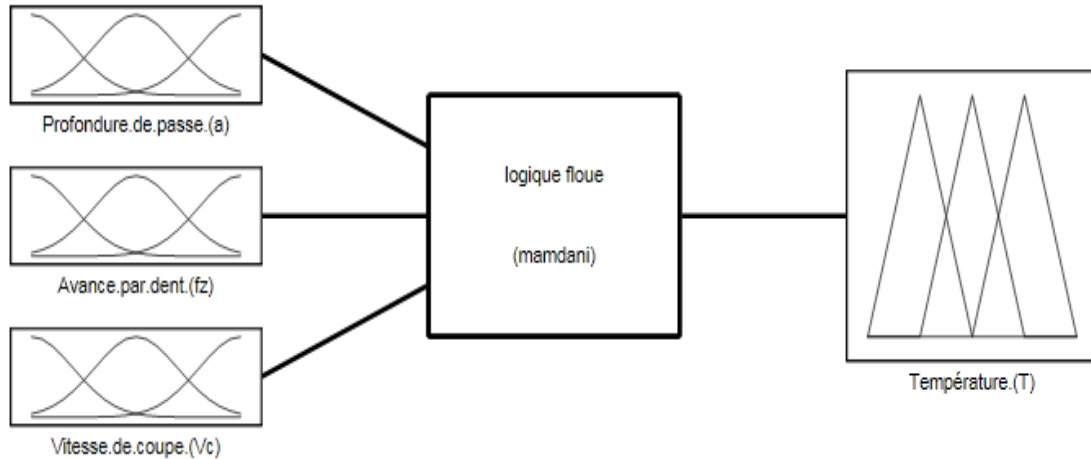
Les données ci-dessous (Tableau III.1) représentent les résultats obtenus à partir de d'une étude expérimentale de mesure de la température de coupe lors du surfacage d'une pièce d'acier AISI1060 en utilisant une caméra infrarouge.

**Tableau III.1** Données expérimentales pour la température de coupe

a (mm)		0.25	0.5	0.75
$f_z$	$V_c$			
0.09	100	74,73	101,00	91,55
	150	91,62	101,50	117,80
	200	90,10	107,90	112,00
	250	99,54	114,60	125,50
	300	101,40	119,30	127,30
0.12	100	79,23	88,59	105,40
	150	85,59	98,96	114,10
	200	93,00	102,40	117,00
	250	96,65	109,40	120,80
	300	101,50	113,00	123,10
0.15	100	78,46	86,33	104,20
	150	83,90	97,00	112,20
	200	91,14	100,20	122,60
	250	94,49	102,90	118,10
	300	101,60	104,30	122,40
0.18	100	80,39	88,83	103,00
	150	84,25	97,83	110,20
	200	94,59	102,10	120,50
	250	91,50	102,90	123,00
	300	99,65	105,80	126,10

### III.3 Système flou

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



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

### III.4 Modélisation floue

#### III.4.1 Les variables floues

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

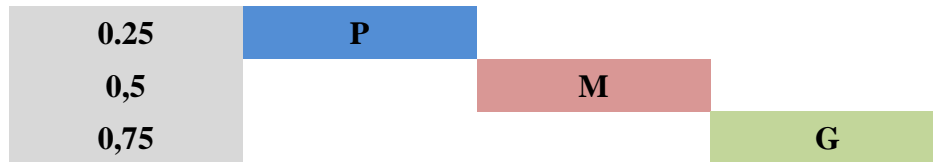
Tableau III.2 Valeurs limites pour les entrées et les sorties		
Paramètres	Valeur Min	Valeur Max
Profondeur de passe : $a$ (mm)	0,25	0,75
Avance par dent : $f_z$ (mm/dent)	0,09	0,18
Vitesse de coupe : $V_c$ (m/min)	100	300
Température : $T$ (°C)	74,73	127,3

#### III.4.2 Définition des variable linguistiques

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

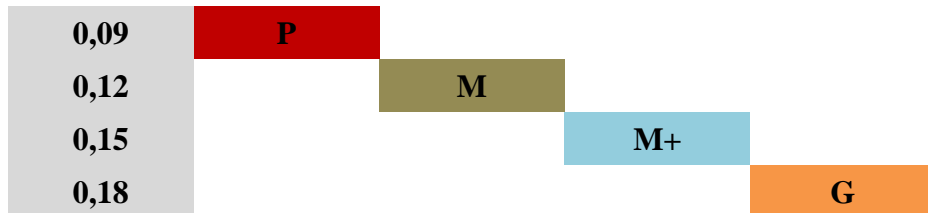
##### *Les variables d'entrées*

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



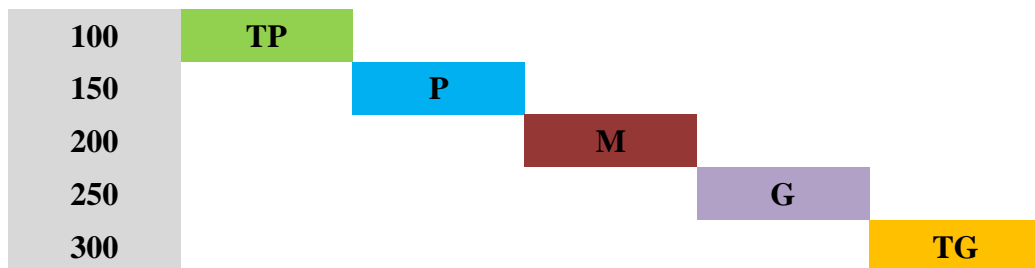
**Figure III.2** Variables linguistiques pour la profondeur de passe.

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



**Figure III.3** Variables linguistiques pour l'avance par dent.

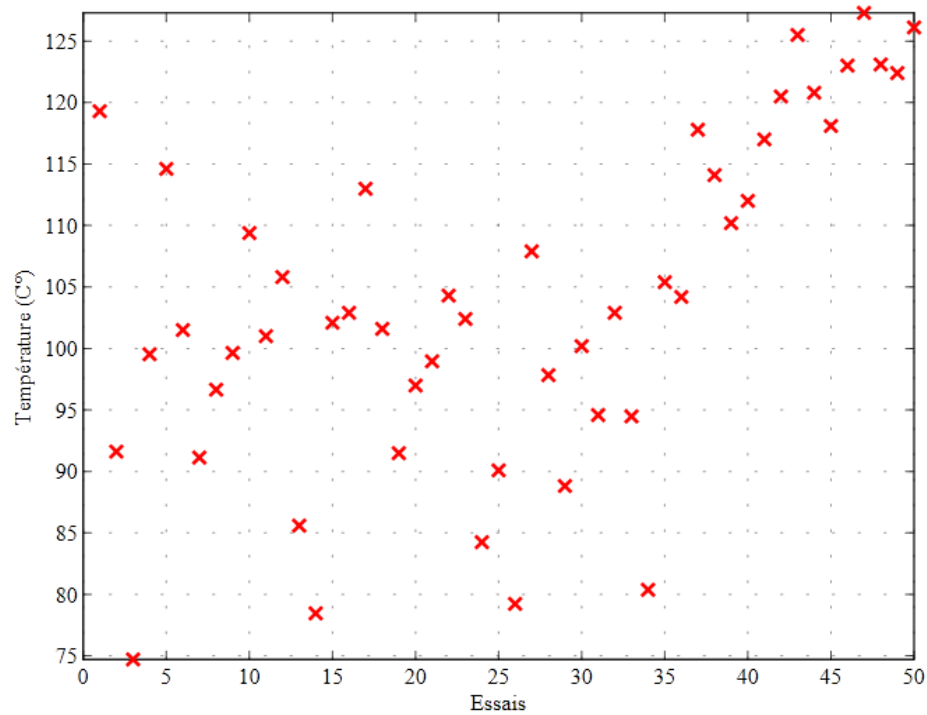
Les variables linguistiques qui définissent les valeurs expérimentales du troisième paramètre (vitesse de coupe) sont illustrées dans la figure III.4.



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

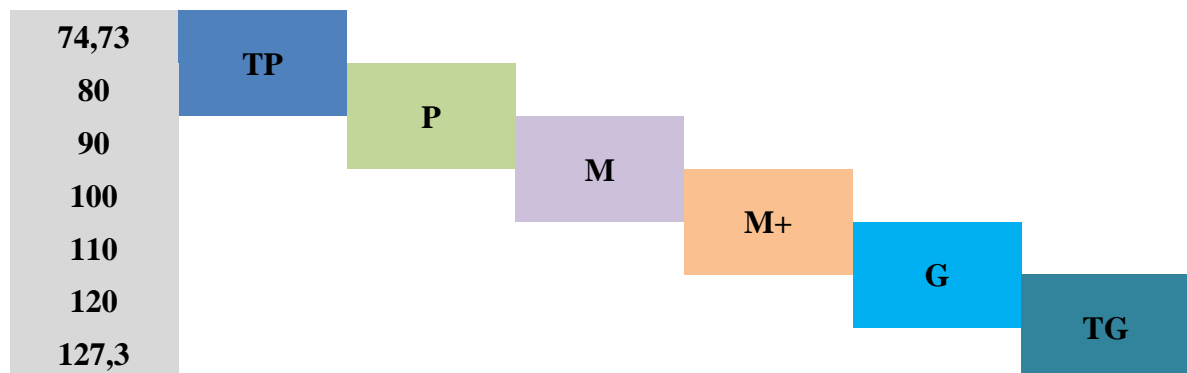
Pour bien définir les variables linguistiques associées au paramètre de sortie (température de coupe), nous proposons, de représenter les valeurs expérimentales de la température de coupe pour tous les essais expérimentaux sous forme d'un nuage de points.

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



**Figure III.5** Les valeurs de la température de coupe pour l'ensemble des essais.

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



**Figure III.6** Variables linguistiques pour la température de coupe.

### III.4.3 Les fonctions d'appartenance

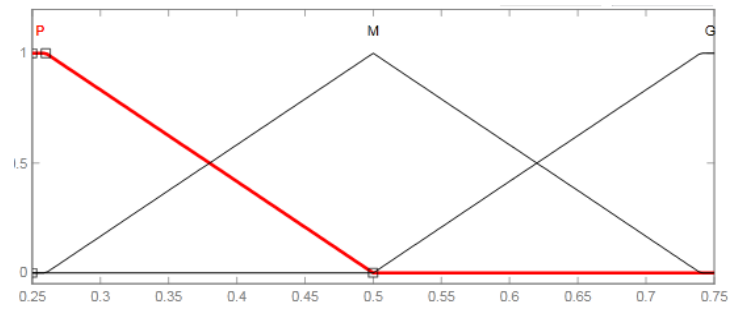
Trois types de fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale et Gaussienne) sont utilisés dans cette étude.

#### a. Utilisation des fonctions d'appartenance de type triangulaire

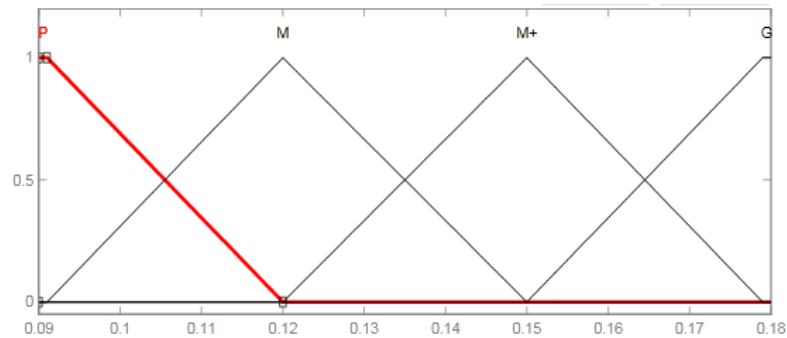
##### *Les paramètres d'entrées*

Les fonctions d'appartenance utilisées pour les paramètres d'entrées sont représentées dans les figures III.7, III.8 et III.9

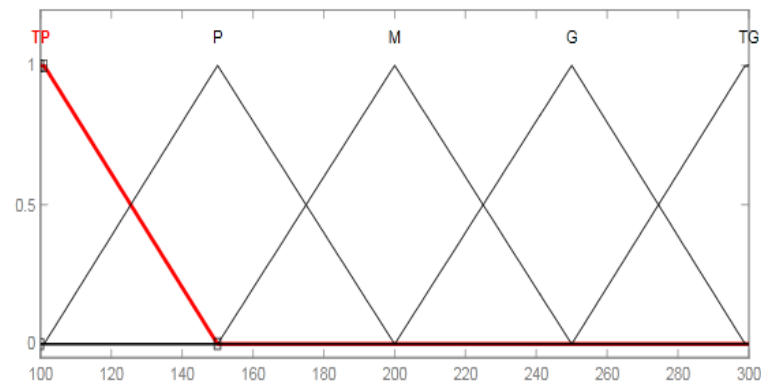
En utilisant les intervalles flous présentés précédemment, les fonctions d'appartenance de type triangulaire pour les paramètres d'entrée sont présentées dans les figures III.7, III.8 et III.9 :



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



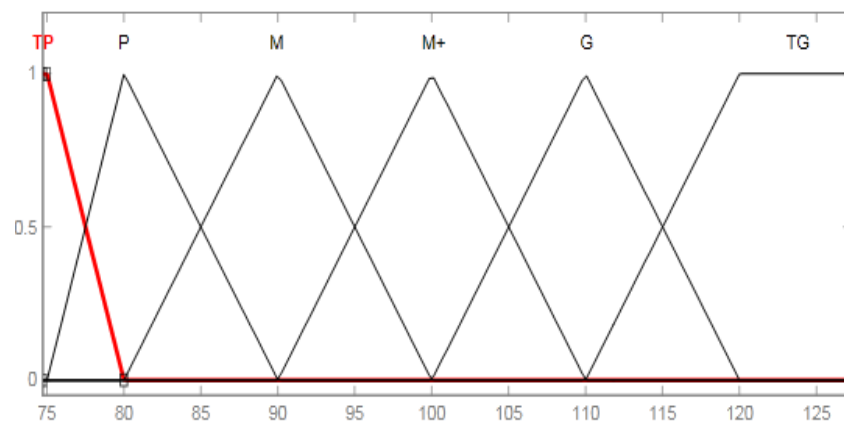
**Figure III.8** Fonctions d'appartenance (de type triangulaire) pour l'avance par dent.



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

### *Le paramètre de sortie*

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



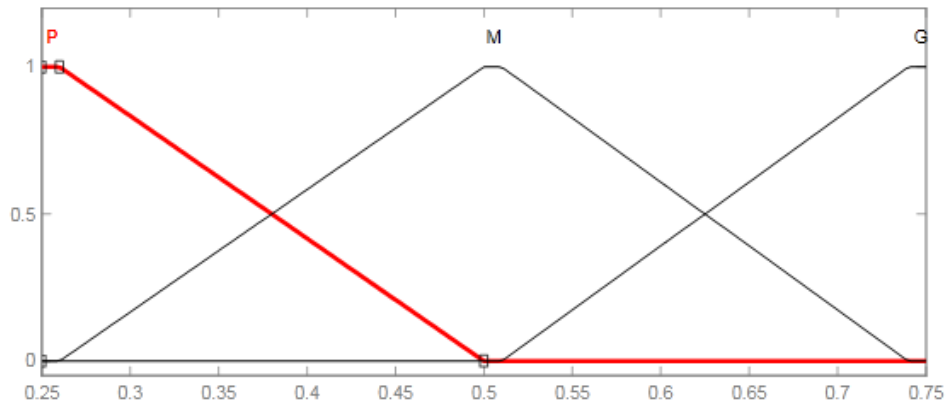
**Figure III.10** Fonctions d'appartenance (de type triangulaire) la température de coupe.

## b. Utilisation des fonctions d'appartenance de type trapézoïdale

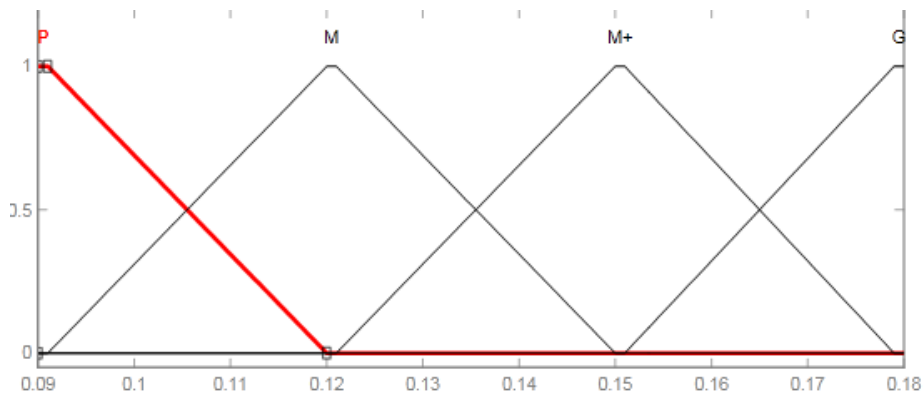
### *Les paramètres d'entrées*

Les fonctions d'appartenance utilisées pour les paramètres d'entrées sont représentées dans les figures III.11, III.12 et III.13

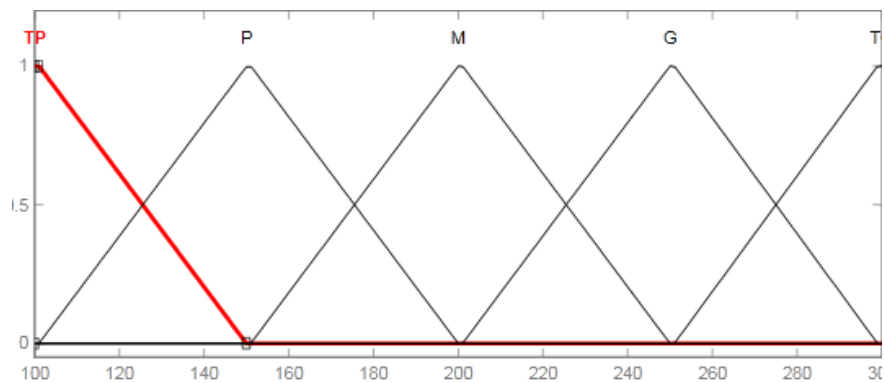
En utilisant les intervalles flous présentés précédemment, les fonctions d'appartenance de type trapézoïdal pour les paramètres d'entrée sont présentées dans les figures III.11, III.12 et III.13 :



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



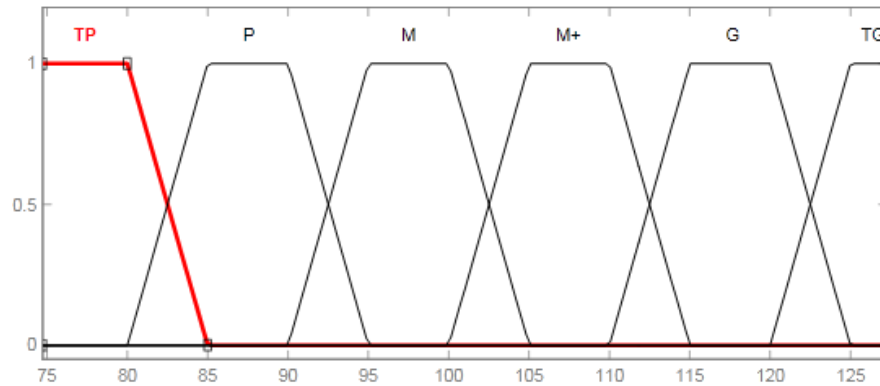
**Figure III.12** Fonctions d'appartenance (de type trapézoïdale) pour l'avance par dent.



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

### *Le paramètre de sortie*

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



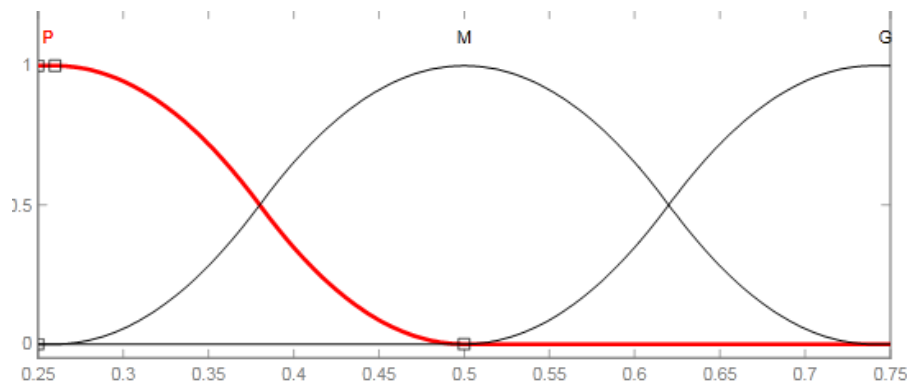
**Figure III.14** Fonctions d'appartenance (de type trapézoïdales) pour la température de coupe.

### **c. Utilisation des fonctions d'appartenance Gaussienne**

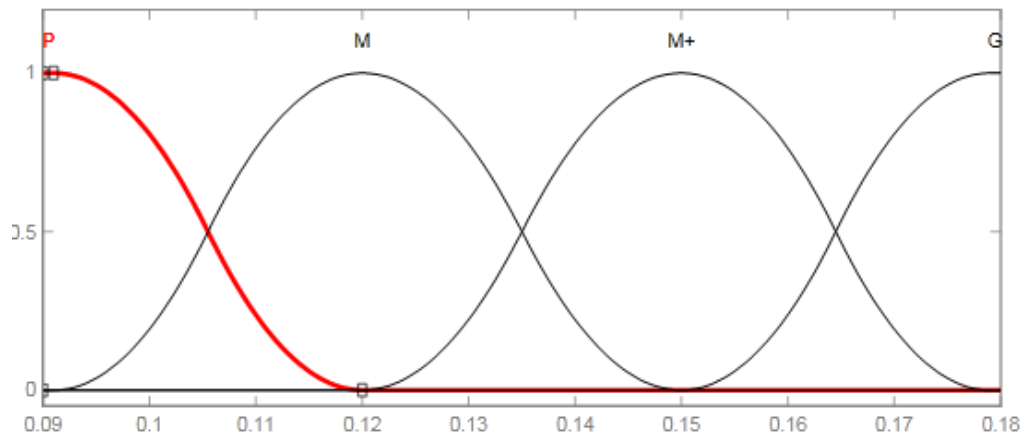
#### *Les paramètres d'entrée*

Les fonctions d'appartenance utilisées pour les paramètres d'entrées sont représentées dans les figures III.15, III.16 et III.17.

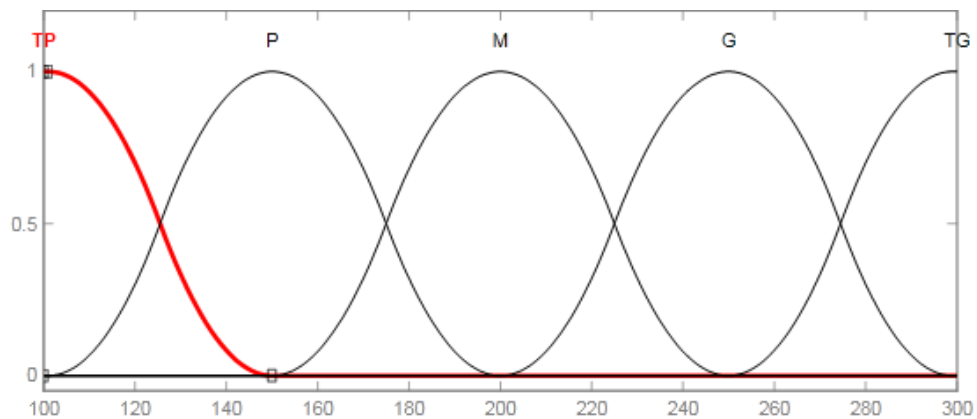
En utilisant les intervalles flous présentés précédemment, les fonctions d'appartenance de type gaussienne pour les paramètres d'entrée sont présentées dans les figures III.15, III.16 et III.17 :



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



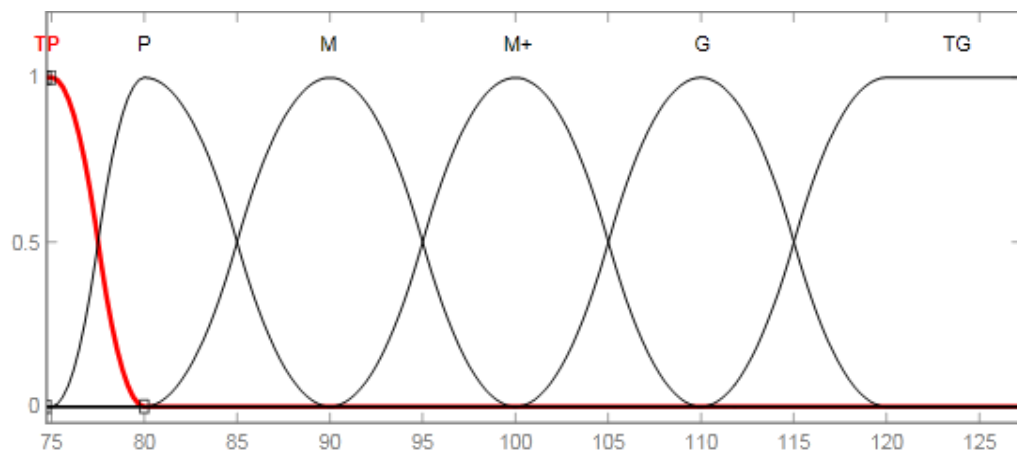
**Figure III.16** Fonctions d'appartenance (de type gaussienne) pour l'avance par dent.



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

### *Le paramètre de sortie*

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



**Figure III.18** Fonctions d'appartenance (de type gaussienne) pour la température de coupe.



### III.5 Les règles floues

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

Chaque règle prend la forme suivante :

**Si**  $f_z$  est (variable linguistique) **et**  $V_c$  est (variable linguistique) **et**  $a$  est (variable linguistique) **Alors**  $T$  est (variable linguistique), L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.3 Les règles floues				
<b>a (mm)</b>		<b>P</b>	<b>M</b>	<b>G</b>
<b><math>f_z</math></b>	<b><math>V_c</math></b>			
<b>P</b>	TP	TP	M+	-
	P	M	-	TG
	M	M	G	G
	G	M+	G	TG
	TG	-	TG	TG
<b>M</b>	TP	P	-	G
	P	M	M+	G
	M	-	M+	TG
	G	M+	G	TG
	TG	M+	G	TG
<b>M+</b>	TP	P	-	M+
	P	-	M+	-
	M	M	M+	-
	G	M	M+	TG
	TG	M+	M+	TG
<b>G</b>	TP	P	M	-
	P	P	M+	G
	M	M	M+	TG
	G	M	M+	TG
	TG	M+	G	TG

### III.6 Défuzzification

Dans cette étape, nous utilisons la méthode de « Mamdani ». Avec cette étape le moteur d'inférence utilise la méthode du centre de gravité pour la défuzzification des valeurs linguistiques.

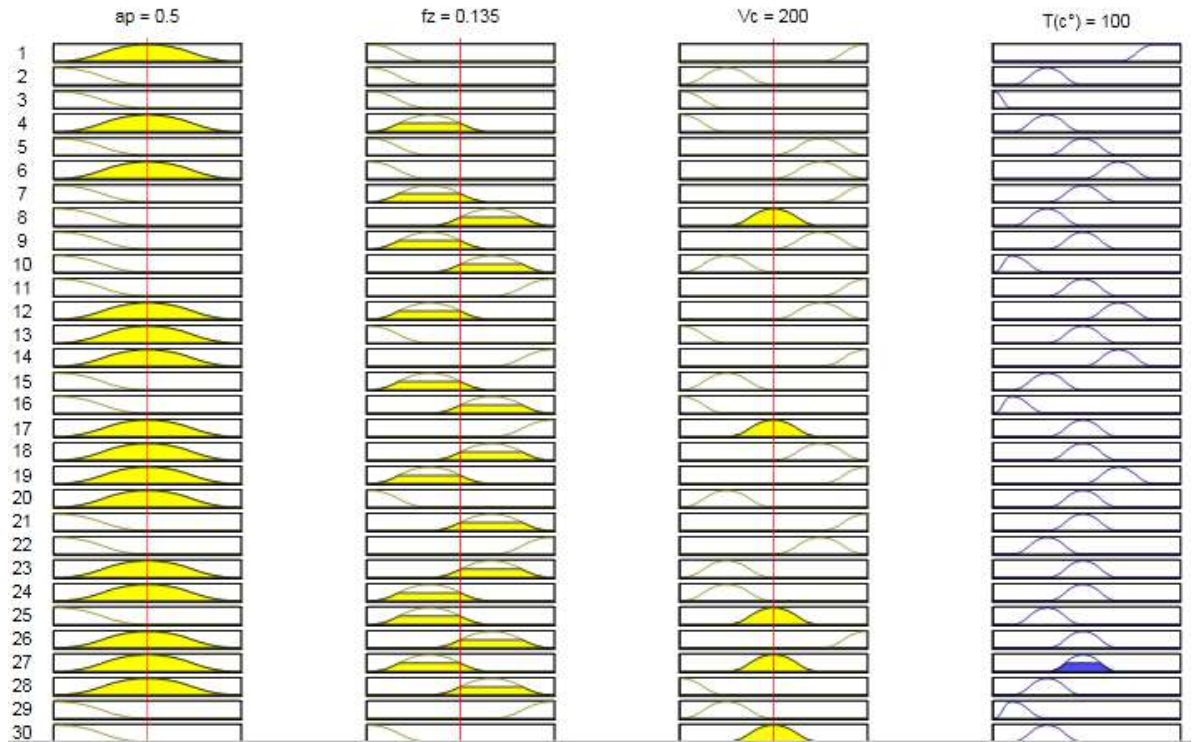


Figure III.19 Défuzzification sous MATLAB.

### III.7 Résultats et discussion

Les résultats de la défuzzification, qui est la dernière étape dans la logique floue, sont obtenus de la conversion des valeurs linguistiques à des valeurs numériques.

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

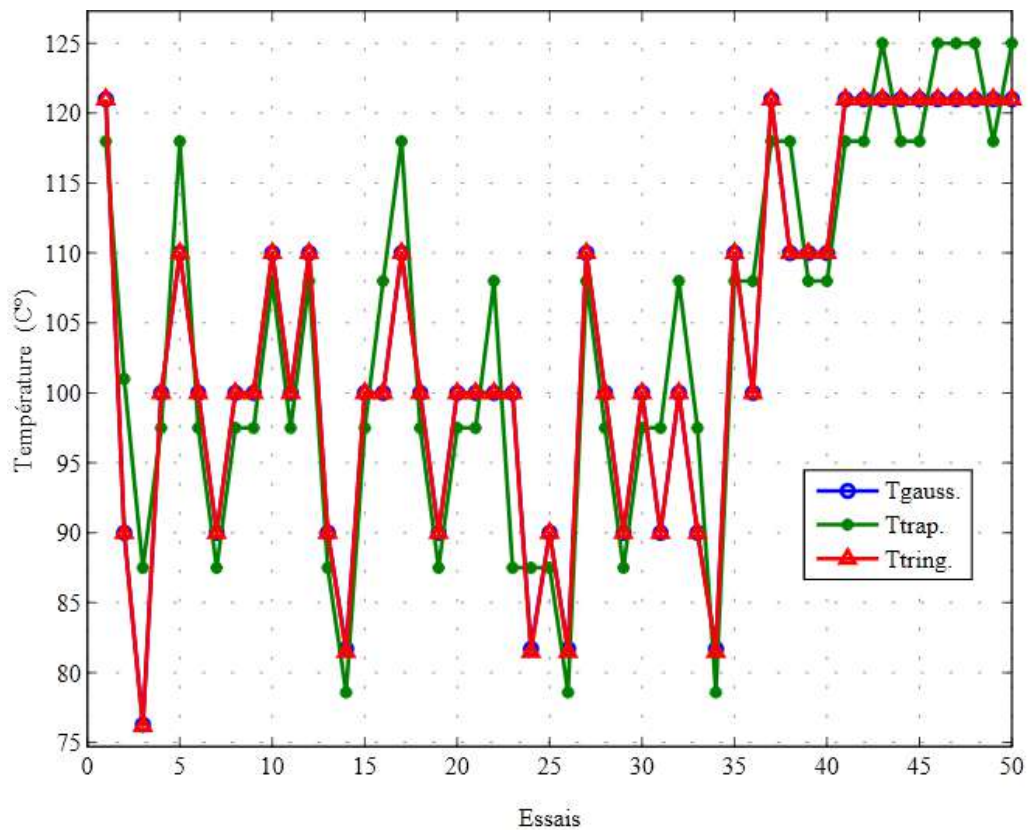
Tableau III.4 Les résultats du système flou

Essais	Paramètres de coupe			Résultats de la température			
	$V_c$	$f_z$	$a_p$	$T_{Exp}$	$T_{tring}$	$T_{trap}$	$T_{Gauss}$
1	300	0,09	0,5	119,3	121	118	121
2	150	0,09	0,25	91,62	90	101	90
3	100	0,09	0,25	74,73	76,3	87,5	76,2
4	250	0,09	0,25	99,54	100	97,5	100
5	250	0,09	0,5	114,6	110	118	110
6	300	0,12	0,25	101,5	100	97,5	100
7	200	0,15	0,25	91,14	90	87,5	90
8	250	0,12	0,25	96,65	100	97,5	100
9	300	0,18	0,25	99,65	100	97,5	100
10	250	0,12	0,5	109,4	110	108	110
11	100	0,09	0,5	101	100	97,5	100

Essais	Paramètres de coupe			Résultats de la température			
	$V_c$	$f_z$	$a_p$	$T_{Exp}$	$T_{tring}$	$T_{trap}$	$T_{Gauss}$
12	300	0,18	0,5	105,8	110	108	110
13	150	0,12	0,25	85,59	90	87,5	90
14	100	0,15	0,25	78,46	81,7	78,6	81,5
15	200	0,18	0,5	102,1	100	97,5	100
16	250	0,15	0,5	102,9	100	108	100
17	300	0,12	0,5	113	110	118	110
18	300	0,15	0,25	101,6	100	97,5	100
19	250	0,18	0,25	91,5	90	87,5	90
20	150	0,15	0,5	97	100	97,5	100
21	150	0,12	0,5	98,96	100	97,5	100
22	300	0,15	0,5	104,3	100	108	100
23	200	0,12	0,5	102,4	100	87,5	100
24	150	0,18	0,25	84,25	81,7	87,5	81,5
25	200	0,09	0,25	90,1	90	87,5	90
26	100	0,12	0,25	79,23	81,7	78,6	81,5
27	200	0,09	0,5	107,9	110	108	110
28	150	0,18	0,5	97,83	100	97,5	100
29	100	0,18	0,5	88,83	90	87,5	90
30	200	0,15	0,5	100,2	100	97,5	100
31	200	0,18	0,25	94,59	90	97,5	90
32	250	0,18	0,5	102,9	100	108	100
33	250	0,15	0,25	94,49	90	97,5	90
34	100	0,18	0,25	80,39	81,7	78,6	81,5
35	100	0,12	0,75	105,4	110	108	110
36	100	0,15	0,75	104,2	100	108	100
37	150	0,09	0,75	117,8	121	118	121
38	150	0,12	0,75	114,1	110	118	110
39	150	0,18	0,75	110,2	110	108	110
40	200	0,09	0,75	112	110	108	110
41	200	0,12	0,75	117	121	118	121
42	200	0,18	0,75	120,5	121	118	121
43	250	0,09	0,75	125,5	121	125	121

Essais	Paramètres de coupe			Résultats de la température			
	$V_c$	$f_z$	$a_p$	$T_{Exp}$	$T_{tring}$	$T_{trap}$	$T_{Gauss}$
44	250	0,12	0,75	120,8	121	118	121
45	250	0,15	0,75	118,1	121	118	121
46	250	0,18	0,75	123	121	125	121
47	300	0,09	0,75	127,3	121	125	121
48	300	0,12	0,75	123,1	121	125	121
49	300	0,15	0,75	122,4	121	118	121
50	300	0,18	0,75	126,1	121	125	121

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



**Figure III.20** Variation de la température (trapézoïdale, triangulaire et Gaussienne) en fonction du nombre d'essais.

### III.7.1 Validation des modèles élaborés

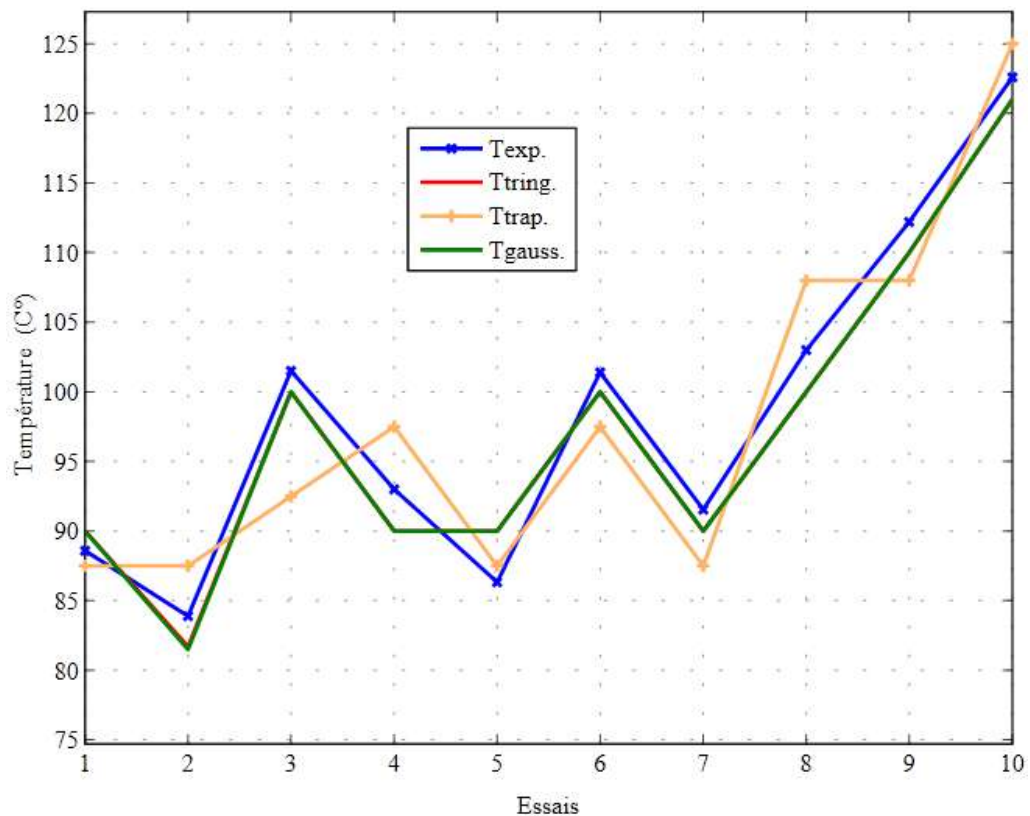
Pour la vérification du système en teste dix valeurs expérimentales du modèle flou comme le présente le tableau III.5.

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

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

Essais	Paramètres de coupe			Température de coupe			
	$V_c$	$f_z$	$a_p$	$T_{exp}$	$T_{tring}$	$T_{ptrap}$	$T_{pGauss}$
1	100	0,12	0,50	88,59	90	87,5	90
2	150	0,15	0,25	83,90	81,7	87,5	81,5
3	150	0,09	0,50	101,5	100	92,5	100
4	200	0,12	0,25	93,00	90	97,5	90
5	100	0,15	0,50	86,33	90	87,5	90
6	300	0,09	0,25	101,4	100	97,5	100
7	100	0,09	0,75	91,55	90	87,5	90
8	100	0,18	0,75	103,0	100	108	100
9	150	0,15	0,75	112,2	110	108	110
10	200	0,15	0,75	122,6	121	125	121

La figure III.21 montre des similitudes entre les valeurs de la température de coupe prédite et expérimentale. Les valeurs obtenues avec des fonctions d'appartenance triangulaires et Gaussiennes sont plus proches des valeurs expérimentales que les valeurs obtenues en utilisant des fonctions d'appartenance trapézoïdales.



**Figure III.21** Comparaison de la prédiction des modèles de logique floue avec les résultats mesurés de la température de coupe.

Pour faire le choix entre les fonctions d'appartenance de type : triangulaire, trapézoïdale et gaussienne, nous proposons d'utiliser l'écart-type afin de définir les valeurs les plus proches aux résultats expérimentaux.

L'écart-type est donnée par la formule suivante :

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

$T_{exp}$  : La température expérimentale.

$T_{pré}$  : La température prédite.

Dans notre cas  $N = 10$  essais.

- L'écart-type des fonctions d'appartenance triangulaires est de l'ordre de 2.2871
- L'écart-type des fonctions d'appartenance trapézoïdale est de l'ordre de 4.4359
- L'écart-type des fonctions d'appartenance Gaussienne est de l'ordre de 2.3071

Alors les résultats des fonctions d'appartenance de type Triangulaire sont les plus proches aux résultats expérimentaux.

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

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

$$e_i = \left[ \frac{|T_{exp} - T_{sim}|}{T_{exp}} \right] \times 100 \quad (III-2)$$

$T_{exp}$  : Température expérimental

$T_{sim}$  : Température simulation

$e_i$  : Taux d'erreur

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

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ 1 - \frac{|T_{exp} - T_{sim}|}{T_{exp}} \right] \times 100 \quad (III-3)$$

Dans notre cas  $N = 10$  essais

$T_{exp}$  : Température expérimental

$T_{sim}$  : Température simulation

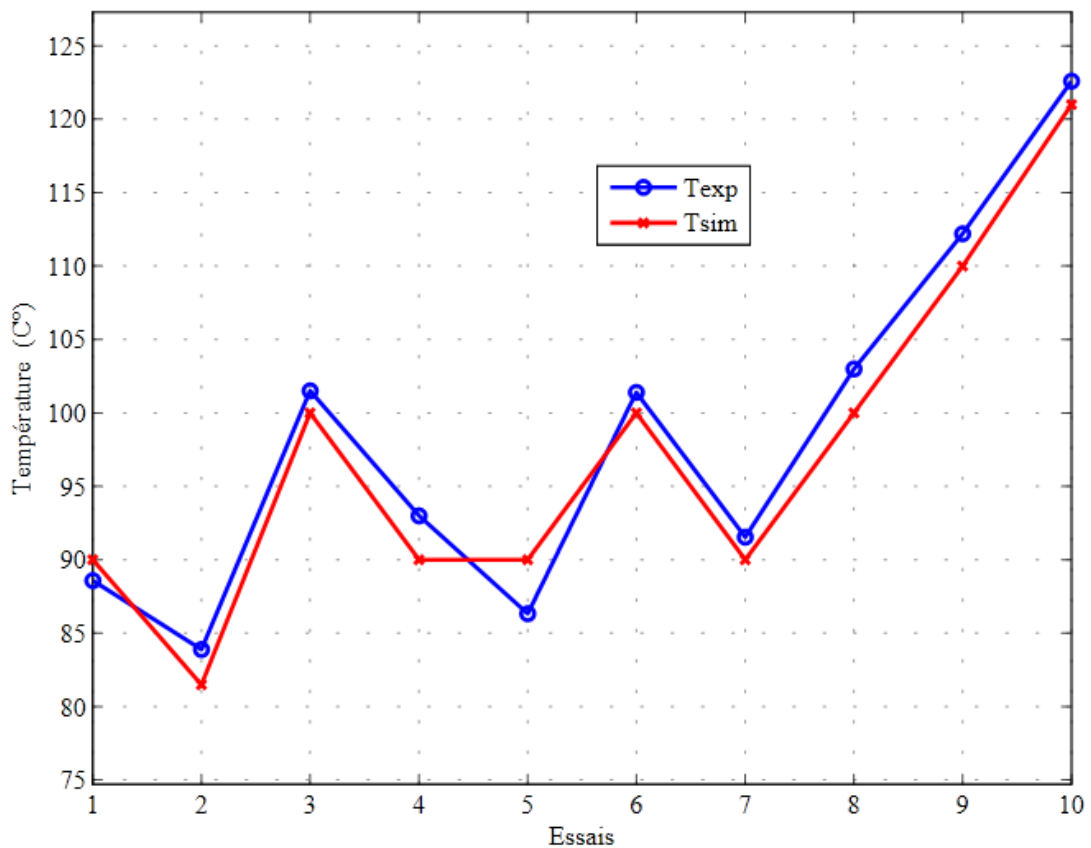
$A$  : La précision

**Tableau III.6** Erreur et précision du système flou pour les dix essais de vérification

Essais	Paramètres des coupes			Résultats de la Température			
	$V_c$	$f_z$	$ap$	$T_{exp}$	$T_{pring}$	Erreur %	Précision%
1	100	0.12	0.5	88.59	90	1.5916	98.4083
2	150	0.15	0.25	83.9	81.7	2.6221	97.3778
3	150	0.09	0.5	101.5	100	1.4778	98.5221
4	200	0.12	0.25	93	90	3.2258	96.7741
5	100	0.15	0.5	86.33	90	4.2511	95.7488
6	300	0.09	0.25	101.4	100	1.3806	98.6193
7	100	0.09	0.75	91.55	90	1.6930	98.3069
8	100	0.18	0.75	103	100	2.9126	97.0873
9	150	0.15	0.75	112.2	110	1.9607	98.0392
10	200	0.15	0.75	122.6	121	1.3050	98.6949
Précision moyenne							97.7579

### III.7.3 Validation des résultats

La figure III.22 compare les prédictions du modèle de logique floue avec la température mesurée réelle pendant le fraisage des pièces.

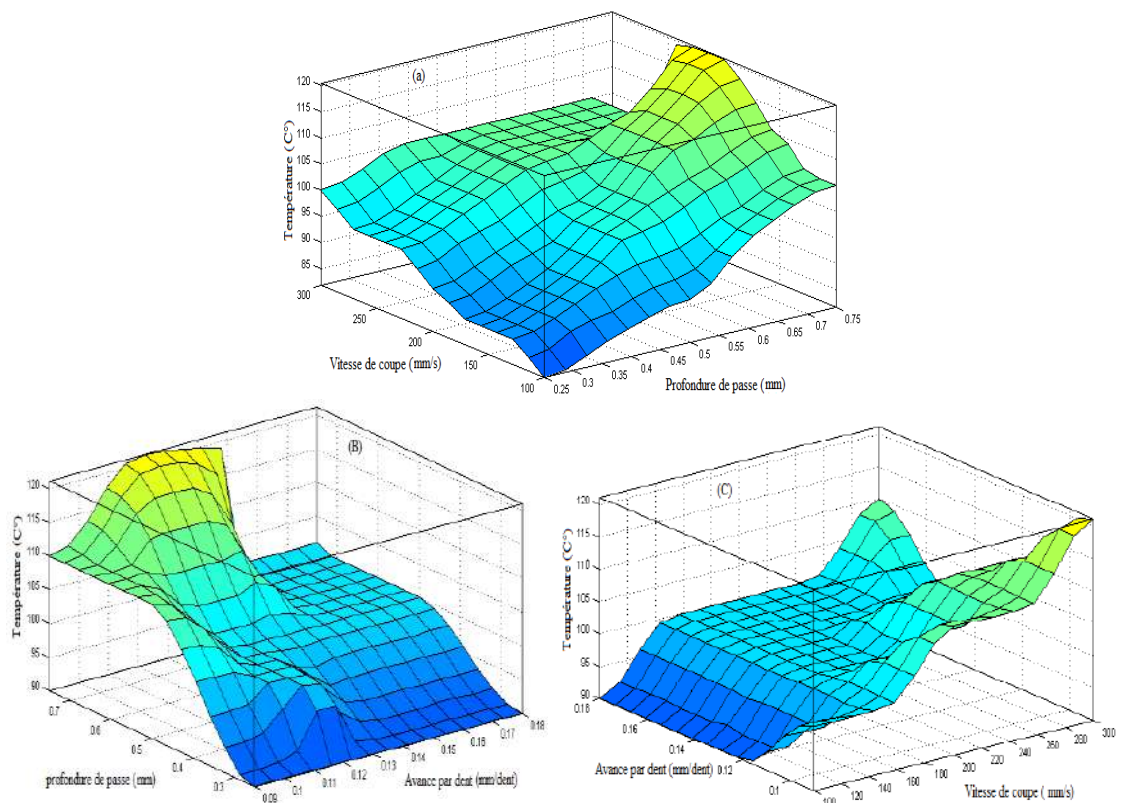
**Figure III.22** Comparaison de la température de coupe prédite et expérimentale.

La figure III.22 montre que le modèle proposé était capable de prédire avec précision la température de coupe pendant les opérations de fraisage. Les similitudes entre les valeurs de la température de coupe signifient que le modèle de logique floue est une solution efficace qui peut être utilisée pour prédire les valeurs de la température de coupe pour une plage spécifique de paramètres.

#### III.7.4 Représentation schématique des résultats

La figure III.23 représente les fonctions obtenues en utilisant une simulation par logique floue comme suite :

- La surface (a) représente la variation de la température de coupe en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe
- La surface (b) représente la variation de la température de coupe en fonction de la profondeur de passe et l'avance par dent.
- La surface (c) représente la variation de la température de coupe en fonction de l'avance par dent et la vitesse de coupe.



**Figure III.23** Variation de la température prévue par logique floue en fonction des paramètres de coupe.

La figure III.23 illustre l'effet des paramètres d'usinage et leur interaction sur la température de coupe pendant les opérations de fraisage.



De la figure III.23 (a) on constate que la valeur de la température de coupe devienne maximale pour des valeurs moyennes de la vitesse de coupe (d'ordre de 200 m/min) et des valeurs maximales de la profondeur de passe. Tandis que les valeurs minimales de la température de coupe sont obtenues pour des valeurs minimales de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe.

D'autre part, une profondeur de passe plus élevée entraîne une augmentation de la température de coupe. Les figures III.23 (a) et (b) montrent comment la température augmente à cause de l'augmentation de la profondeur de passe pour des valeurs constantes des deux autres paramètres.

De la figure III.23 (b) on constate que la valeur de la température de coupe devienne maximale pour des valeurs maximales de la profondeur de passe et des valeurs minimales de l'avance par dent.

L'avance par dent à un effet limité sur la température de coupe pour des valeurs minimales de la profondeur de passe.

Les températures de coupe minimales sont obtenues pour des valeurs maximales de l'avance par dent.

De la figure III.23 (c) l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une augmentation de la température de coupe quelle que soit la valeur de l'avance par dent.

L'influence de l'avance par dent n'est pas claire que pour des valeurs maximales de la vitesse de coupe.

Le facteur le plus important sur la température de coupe est la profondeur de passe. De la figure III.23 on observe clairement, que la profondeur de passe affecte fortement la température de coupe. La profondeur de coupe a un effet croissant.

### III.8 Conclusion

Ce chapitre dissèque le concept et la modélisation de la température de coupe pendant les opérations de fraisage. De même que la majorité des approches présentées dans la littérature, le modèle présenté dans ce chapitre relie les éléments des paramètres de coupe. La construction du model flou nécessite une étude expérimentale longue et coûteuse, car elle doit surveiller la température de coupe jusqu'à la fin de l'opération.

## Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons développé un système flou pour sélectionner les paramètres de coupe pour les opérations de fraisage en vue de prédire la température de coupe. Le modèle flou a été développé pour l'acier AISI 1060.

Les fonctions d'appartenance et les règles flous élaborés ont été basées sur des mesures de la température de coupe au cours des essais.

Le système d'inférence floue a été utilisé pour identifier les valeurs initiales des paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe) en utilisant la température de coupe comme sortie. L'effet de ces paramètres et de leurs interactions dans l'usinage est analysé en détail et présenté dans ce mémoire.

L'adéquation du modèle a été vérifiée et jugée adéquate à un niveau de précision de 97.757%, ce qui prouve que le modèle peut être utilisé pour prédire la température de coupe de l'acier AISI 1060.

Les résultats ont montré que lors de l'usinage de l'acier AISI 1060, la température de coupe augmentait avec l'augmentation de la profondeur de coupe et la vitesse de coupe. Le paramètre restant (avance par dent) à moins d'influence sur la température de coupe.

L'étude effectuée dans ce mémoire montre que le facteur le plus influant sur la température de coupe est la profondeur de passe.

La comparaison et la validation des résultats flous avec les résultats des essais ont confirmé la grande précision du modèle. La technique de modélisation floue pourrait être une méthode économique et efficace pour la prédiction des paramètres de sortie des opérations de fraisage en fonction des variables d'entrée.

# ***Bibliographique***

## Bibliographique

- [1]. A. Lamarat, L. Touggourt, Prédiction de la Température de Coupe de l'Acier AISI D3 : Application au Tournage en Utilisant la Méthode de Surface de Réponse (RSM), Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [2]. M. Arbaoui, A. Tebib, Surveillance de la Température de Coupe Pendant le Tournage de l'Acier AISI 1060 en Utilisant la Logique Floue, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [3]. T. Amieur, Commande des Systèmes Non Linéaires par Mode Glissant Flou, Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2009.
- [4]. S. Gara, Cours Interactif : Le Fraisage, Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul Institut Supérieur des Études Technologiques de Nabeul, Tunisie, 2016
- [5]. A. Belloufi, Cours procédés de Fabrication, Master Maintenance Industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2010.
- [6]. K. Ben Sellam, Technologie mécanique : Fraisage, 3<sup>ème</sup> année BAC AESI Electromécanique, Ecole Normale Technique Moyenne, Morlanwelz.
- [7]. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=72695479>
- [8]. H. Aouici S. Benlahmidi, Fraisage, TP Production 2<sup>ème</sup> Année GMP, Ecole Nationale Supérieure de Technologie, 2013.
- [9]. [https://fr.made-in-china.com/co\\_songenmachinery/product\\_Table-1600X360mm-Plain-Horizontal-Milling-Machine\\_heohsrysy.html](https://fr.made-in-china.com/co_songenmachinery/product_Table-1600X360mm-Plain-Horizontal-Milling-Machine_heohsrysy.html)
- [10]. Y. Charles, Dossier Technique, Manuel d'Utilisation Fraiseuse Universelle Model QTXQ 6226B, OTMT, France, 2012
- [11]. <http://www.directindustry.fr/prod/knuth-machine-tools/product-27150-235904.html>
- [12]. <https://www.usinenouvelle.com/expo/centre-d-usinage-cnc-5-axes-normaprofi-p5831.html>
- [13]. <https://www.usinenouvelle.com/expo/centre-d-usinage-cnc-5-axes-normaprofi-p5831.html>
- [14]. Société SANDVIK-COROMANT, Fraisage, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 7 082, pp. 1-5, 2001.
- [15]. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/SAE-AISI-1060-S58C-C60-1.0601-G10600-Carbon-Steel>
- [16]. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6542>

- 
- [17]. A. Çalik, Effect of Cooling Rate on Hardness and Microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels, International Journal of Physical Sciences Vol. 4 (9), pp. 514-518, 2009
- [18]. F. Benabid, Etude des Transferts Thermiques au Cours d'une Opération d'Usinage - Influence sur l'Usinage à Grande Vitesse, Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2015.
- [19]. M. Habak, Etude de l'Influence de la Microstructure et des Paramètres de Coupe sur le Comportement en Tournage Dur de l'Acier a Roulement 100Cr6, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure D'arts et Métiers de Paris ,2006.
- [20]. S. Benchiheb, Etude de l'Interaction «Outil - Pièce lors de l'Usinage des Matériaux Durcis, Thèse de Doctorat Université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
- [21]. T.B. Bouchnak, Etude du Comportement en Sollicitation Extrêmes et de l'Usinabilité d'un Nouvel Alliage de Titane Aéronautique, Thèse de Doctorat École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2010.
- [22]. K. Taliouine, Effets des Paramètres d'Electrodéposition sur les Dépôts de Chrome, Mémoire de Master, Université d'Ouargla, 2015.
- [23]. N. Tkouti, Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Connectes au Réseau par la Logique Flous, Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2004.
- [24]. Z. Zouaoui, Commande des Convertisseurs Statiques DC/DC Par La Logique Floue Mémoire Magister, Université de Batna, 2007.
- [25]. H. Bouzid, S. Benmeriem, Application de la Technique de La Logique Floue Pour la Prédiction de l'Amorçage des Intervalles d'Air Pointes-Plans, Mémoire Master, Université d'Ouargla, 2013.
- [26]. D. Mokeddem, Contrôle Flou des Processus, Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2010
- [27]. H. Merabti, Etude des Systèmes Flous à Intervalle, Mémoire de Magistère, Université de Constantine, 2008.
- [28]. Y. Bourek, Détermination des Conditions d'Ionisation Caractérisant le Seuil de Claquage de l'Air par La Logique Flou, Magister de Magister, Université de Batna 2005.
- [29]. S. Aoufi, Modalisation et Commande d'un Système de Pompage photovoltaïque, Mémoire de Magister, Université Sétif 1, 2014.
- [30]. F. Harrouche, Application de la Logique Floue aux Machines Tournantes, Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [31]. L. Baghli, Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques, Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2009.

## Résumé

Cette étude propose une méthode pour l'identification des paramètres de coupe à l'aide d'un système d'inférence floue multi-entrées. Le système d'inférence floue a été utilisé pour identifier les valeurs initiales des paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de passe) en utilisant la température de coupe comme sortie. L'objectif était de déterminer l'influence des paramètres de coupe sur la température de coupe. Le modèle a été formé (règles floues) et testé en utilisant des données expérimentales. L'erreur moyenne du modèle était de l'ordre de 2.242%. Les paramètres utilisés pour la validation du modèle étaient différents des données utilisées pour la construction des règles floues. Les résultats des tests ont montré que le modèle flou proposé peut être utilisé avec succès pour la sélection des paramètres de coupe. L'effet des paramètres et de leurs interactions dans l'usinage est analysé en détail dans cette étude.

**Mots clés :** fraisage, température de coupe, logique floue, paramètres de coupe

## Abstract

This study provides a method for identifying cutting parameters using a fuzzy multi-input inference system. The fuzzy inference system was used to identify the initial values of the cutting parameters (cutting speed, feed rate and depth of cut) using the cutting temperature as output. The objective was to determine the influence of the cutting parameters on the cutting temperature. The model was formed (fuzzy rules) and tested using experimental data. The average error of the model is of the order of 2.242%. The parameters used to validate the model were different from the data used for modeling fuzzy rules. The test results showed that the proposed blur model can be used successfully for the selection of cutting parameters. The effect of the parameters and their interactions in the machining is analyzed in detail in this study.

**Keyword:** milling, cutting temperature, fuzzy logic, cutting parameters

## الملخص

تتيح هذه المذكرة طريقة لتحديد شروط القطع باستخدام نظام المنطق الضبابي متعدد المداخل. تم استخدام نظام الاستدلال الغامض لتحديد القيم الابتدائية لشروط القطع (سرعة القطع، التغذية وعمق التمريرة) باستخدام درجة الحرارة كمخرج للنموذج. الهدف هو تحديد تأثير شروط القطع على درجة حرارة القطع. تم تشكيل النموذج (القواعد الغامضة) واختبارها باستخدام المعطيات التجريبية. متوسط خطأ النموذج المقترح يساوي 2.242 %. أظهرت نتائج التجارب أنه يمكن استخدام النموذج المقترح بنجاح لاختيار شروط القطع. تأثير شروط القطع وتفاعلاتها حلت بالتفصيل في هذه المذكرة.

**الكلمات المفتاحية:** التفريز، خفض درجة الحرارة، المنطق الضبابي، شروط القطع