

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**

**Faculté des Sciences Appliquées**

**Département de Génie Mécanique**



**Mémoire**

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences Techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

**Présenté par : MECHEHAT Nada El Rihane**

**FEKROUNE Omar**

**Thème**

**Estimation de la dureté des couches minces  
déposées**

Soutenue le : 15/06/2021

Devant le jury :

GUEBAILIA Moussa	MCA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Président
REZGUI Imane	MCA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Encadreur
CHIBA Elhocine	Doctorant	Université Kasdi Merbah Ouargla	Co-Encadreur
GHERFI Abdelhafid	MAA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examineur

Année universitaire 2020/2021

## *Remerciement*

*Tout d'abord, nous remercions le dieu nos créateur.*

*Nous tenant à exprimer toute nos gratitude et reconnaissance à notre encadreur : **Dr. REZGUI Imane** qui d'avoir accepté de diriger ce travail et d'avoir mis à nos dispositions tous les moyens qui permis de mener à terme cette étude et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.*

*Nous tenons aussi à remercier : **Mr. GUEBALIA** pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il n'a fait en présidant le jury.*

*Nos remerciements vont également à : **Mr. A. GhERFI** pour s'être intéressé à ce travail et d'avoir bien voulu n'honorer de leur présence dans ce jury.*

*Mes remerciements s'adressent également à **Mr. CHIBA Elhoucine** et **Mr. SOUALAH Moundire** qui nous avons aidé faire aboutir ce travail.*

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

## *Dédicace*

*J'offre ce modeste travail :*

*A ceux qui m'ont mis au monde, que je respect et qui M'honorent,  
ma mère Bouchera et mon père Abdelhakim.*

*A mes chers frères Mohammed Amin et Yahia Zineddine et à mes  
chères sœurs Raouia Rim, Tamader et Fatima el Zahra.*

*A ma tante Mouna, mon oncle Mohammed, son fils Moundire et  
l'adorable chahinez.*

*A mes copines : Karima, Maroua, Roumaïssa, Amira et Souna  
elles sont nombreuses, elles se reconnaîtront Sûrement.*

*Ceux qui m'ont encouragé et soutenu morale matériellement  
pendant les moments les plus difficiles et Ceux que J'aime et je  
respecte.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce propre travail à mes chers parents Mebarka et*

*Abdellah.*

*A mes chers frères Mohammed, Khaled, Aïssa, Fares et*

*Abderrahmane et mes chers sœurs Malak et Dina.*

*A mes amis Yahia, Moussa, Belkhir, Ahmed, Saleh, Laid, Ibrahim,*

*Riad et Sayeh.*

*A tous mes collègues qui m'encourage.*

# Tableau de matière

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I</b>	
<b>Étude bibliographique</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition des couches minces.....	3
I.3 Applications des couches minces.....	3
I.4 Principe de dépôt des couches minces.....	4
I.4.1 Solide.....	4
I.4.2 Milieu liquide.....	4
I.4.3 Gaz ou vide.....	4
I.5 Mécanisme de formation d'une couche mince.....	5
I.6 Technique d'élaboration des couches minces.....	6
I.6.1 Dépôt en phase vapeur physique (PVD).....	6
a. En milieu vide poussée.....	6
b. En milieu plasma.....	8
I.6.2 Dépôt en phase vapeur chimique (CVD).....	8
a. En milieu gaz réactif.....	8
b. En milieu liquide.....	10
I.7 Avantages et inconvénients des deux techniques (PVD/CVD).....	11
I.8 Qu'est-ce qu'un revêtement ?.....	12
I.8.1 Revêtements durs en couche mince.....	13
I.9 Le titane.....	13
I.9.1 Généralités.....	13
I.9.2 Les films minces de titane :application et propriétés.....	13
I.10 Le nitrure de titane.....	15

I.10.1 Généralités.....	15
I.10.2 Diagramme d'équilibre de phase du système TiN.....	15
I.10.3 Structure cristalline.....	16
I.10.4 Propriétés mécaniques du nitrure de titane.....	17
I.10.5 Contexte industriel et applications.....	18
I.11 Conclusion.....	19

## Chapitre II

### La logique floue

II.1 Introduction.....	20
II.2 La logique floue.....	20
II.2.1 Historique.....	20
II.2.2 Concept de la logique floue.....	21
II.2.3 Utilisation de la logique floue.....	21
II.2.4 Comparaison entre la logique classique et la logique floue.....	21
II.2.5 Théorie de ensembles floue.....	22
II.2.6 Fonctions d'appartenance.....	23
II.2.7 Opérateurs en logique floue.....	24
II.2.8 Modèle floue.....	26
II.2.9 Commandes floues.....	27
II.2.10 Variables linguistiques.....	35
II.2.11 Avantages et inconvénients de réglage par logique floue.....	36
II.3 Conclusion.....	37

## Chapitre III

### Résultats et Discussions

III.1 Introduction.....	38
III.2 Données expérimentales.....	38
III.2.1 Système flou.....	40

III.2.2 Modélisation floue.....	41
III.3 Les règles floues.....	46
III.4 Résultats et discussions.....	48
III.4.1 Etude de la précision et de l'erreur du système flou.....	48
III.4.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales).....	49
III.4.3 Représentation schématique des résultats.....	52
III.4.4 Validation des résultats.....	55
III.5 Conclusion.....	56
Conclusion Générale.....	57
Bibliographie.....	58

# Liste des figures

## Chapitre I

### Étude bibliographique

Figure I.1	Processus de dépôt des couches minces.....	5
Figure I.2	Diagrammes schématiques des techniques d'évaporation.....	6
Figure I.3	Schéma principe de l'ablation laser.....	7
Figure I.4	Schéma de principe de la technique de dépôt des couches minces par pulvérisation cathodique.....	8
Figure I.5	Schéma de principe d'une installation phase vapeur chimique CVD.....	9
Figure I.6	Schéma de principe de la radiation Laser.....	10
Figure I.7	Schéma de principe de dépôt par Spin-coating et Dip-coating.....	10
Figure I.8	Schéma d'une équipement de dépôt par spray pyrolyse.....	11
Figure I.9	Projet musical d'expérience d'entrée (Seattle).....	14
Figure I.10	Diagramme d'équilibre de phases du système TiN.....	16
Figure I.11	Réseau cristallin du TiN.....	17

## Chapitre II

### La logique floue

Figure II.1	Classification des températures d'une pièce en deux ensembles (A) logique classique (B) logique floue.....	22
Figure II.2	Différentes formes pour les fonctions d'appartenance.....	24
Figure II.3	(A) opérateur NON, (B) opérateur ET et (C) opérateur OU.....	26
Figure II.4	Schéma synoptique du modèle floue.....	27
Figure II.5	Exemple d'inférence Max-Min.....	31
Figure II.6	Exemple d'inférence Max-Produit.....	32
Figure II.7	Méthode d'inférence somme-produit.....	33



## Chapitre III

### Résultats et Discussions

Figure III.1	Système floue pour les couches minces de TiN.....	41
Figure III.2	Variables linguistiques pour le temps de bombardement ionique.....	42
Figure III.3	Variables linguistiques pour la pression de travail.....	42
Figure III.4	Variables linguistiques pour la pression de la chambre .....	42
Figure III.5	Variables linguistiques pour la température de sous couche.....	42
Figure III.6	Variables linguistiques pour la rugosité.....	42
Figure III.7	Variables linguistiques pour la géométrie des pièces revêtues.....	43
Figure III.8	Variables linguistiques pour la dureté des couches minces.....	43
Figure III.9	Les fonctions d'appartenance triangulaires.....	44
Figure III.10	Les fonctions d'appartenance trapézoïdale.....	45
Figure III.11	Variation de la dureté pour les fonctions d'appartenance trapézoïdale et triangulaire en fonction des essais.....	49
Figure III.12	L'influence des paramètres d'élaboration sur la dureté des couches minces de TiN déposées.....	54
Figure III.13	Les courbes des résultats expérimentaux et de simulation des couches minces de TiN.....	55

---

# Liste des tableaux

## Chapitre I

### Etude bibliographiques

Tableau I.1	Comparaison des propriétés des modes de déposition.....	12
Tableau I.2	Variétés allotropiques du titane.....	13
Tableau I.3	Propriétés physico-chimiques.....	17

## Chapitre II

### La logique floue

Tableau II.1	Matrice d'inférences complètes.....	30
--------------	-------------------------------------	----

## Chapitre III

### Résultats et Discussions

Tableau III.1	Données expérimentales des couches minces de TiN.....	38
Tableau III.2	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou des couches minces de TiN déposées..	41
Tableau III.3	Les règles floues pour les couches minces de TiN.....	46
Tableau III.4	Les résultats du système flou pour les couches minces de TiN.....	50

# Nomenclature

Symbole	Unité	Désignation
PVD		Dépôt en phase vapeur physique
CVD		Dépôt en phase vapeur chimique
CM		Couche mince
SiO <sub>2</sub>		Dioxyde de silicium
TiN		Nitride de titane
SiO <sub>2</sub>		Oxyde de silicium
t	s	Temps de bombardement ionique
PW	MPa	La pression de travail
PC	MPa	La pression de la chambre
T	°C	La température de sous-couche
Ra		La rugosité
G		La géométrie
H	HV	La dureté de couche mince

# **Introduction Générale**

# Introduction générale

Le traitement de surface par le dépôt des couches minces dures est la méthode la plus utilisée pour améliorer les performances et la durée de vie des pièces industrielles, tel que des outils de coupe, des pistons d'automobile, ainsi que pour différentes pièces de machines. Ces revêtements doivent allier une haute dureté mécanique, une bonne adhérence combinée à une stabilité thermique et chimique à haute température [1].

Les procédés de revêtement CVD/PVD ou d'injection d'ions sont devenus l'une des technologies clés les plus importantes et significatives pour protéger la surface des dispositifs mécaniques ou électriques contre divers mécanismes d'usure et prolonger la durée de vie.

Le titane comme élément chimique est connu depuis plus de 200 ans, mais c'est seulement depuis 1920 que ses propriétés réelles sont découvertes par Van Arckel et De Boer. Le titane n'est pas réellement une substance rare car il se classe comme le neuvième élément le plus commun et le quatrième métal le plus abondant dans la croûte terrestre, dépassé seulement par l'aluminium, le fer et le magnésium. Le titane peut être allié entre autres avec du fer, de l'aluminium, du vanadium, du molybdène.

L'évolution des technologies de ces dernières années a conduit à un développement majeur des matériaux utilisés dans tous les domaines de l'ingénierie. Dans le domaine mécanique.

Le revêtement des outils de coupe et des surfaces des composants résistants à l'usure avec des matériaux durs est devenu de plus en plus important. Les revêtements durs sont un moyen rentable de résoudre les problèmes d'usure et d'abrasion. Les métaux de transition (Cr, Ti, Mo, etc.), les nitrures et les carbures formés par dopage à l'azote ou au carbone sont les matériaux les plus largement utilisés.

Il existe de très nombreuses applications pour les films de nitrure de titane. Le but étant d'augmenter la durée de vie des outils de coupe et de formage et leur performance de travail. Ces outils sont ainsi généralement revêtus d'une couche protectrice de TiN de façon à améliorer la résistance à l'usure et à l'abrasion, la dureté la stabilité chimique, le coefficient de frottement et la conductivité thermique afin d'évacuer plus rapidement la chaleur.

Le choix des conditions opératoires (Temps de bombardement ionique, Pression de chambre, la Pression de travail et Température de sous-couche) joue un rôle important pour estimer la dureté des couches minces. Les études expérimentales effectuées par plusieurs

travaux ont permis de choisir de façon aléatoire ces paramètres, les méthodes et les techniques d'essai sont énormément difficiles et nécessitent beaucoup de temps

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. Cette technique nous a permis de prédire conditions opératoires sans recours à réaliser beaucoup d'essais expérimentales.

L'objectif principal de cette mémoire est d'étudier les paramètres influant sur l'estimation de la dureté des couches minces.

Ce travail se divise en trois parties (chapitres) :

Le premier chapitre porte sur une étude bibliographique sur les couches minces et leurs importances sans oublier l'utilisation et les applications dans les différents domaines de l'industrie. En plus de ça ; l'intérêt des dépôts (CVD " Chemical Vapor Deposition" /PVD "Physical Vapor Deposition") et les revêtements.

Le deuxième chapitre on utilise ce modèle flou basé la méthode de Mamdani ; afin d'étudier l'influence (effet) des paramètres (Temps de bombardement ionique, pression de travail, pression de la chambre, température de sous couche) appliquée sur les couches minces pour estimer la dureté du revêtement (H).

Dans le troisième chapitre, les discussions soulevées par les résultats d'application de la logique floue basée sur les données expérimentales de la littérature.

## **Chapitre I**

# **Etude bibliographique**

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une étude bibliographique sur les couches minces et leurs importances sans oublier l'utilisation et les applications dans les différents domaines de l'industrie. En plus de ça ; l'intérêt des dépôts (CVD "Chemical Vapor Deposition" /PVD "Physical Vapor Deposition") et les revêtements.

## I.2 Définition des couches minces

Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau est déposée sur un autre matériau, appelé « substrat ». L'une des dimensions de cette couche est son épaisseur qui a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques "µm" (typiquement ce sont des couches de 10 ... 100 nanomètres d'épaisseur). Cette faible distance entre les deux surfaces limites entraîne est une perturbation de la majorité des propriétés physiques, très souvent un tel petit nombre de couches atomiques possède des propriétés d'un corps massif très différentes. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige généralement [2].

La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et à l'état de couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige généralement avec raison le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince ce sont au contraire les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants [3].

## I.3 Application des couches minces

Ce type des couches on l'utilisées dans des plusieurs domaines différents grâce à leurs importances en peut citer des exemples :

- **Technologies pour les capteurs**

L'exploitation des technologies couches minces pour la réalisation de capteurs physiques ou chimiques est très importante. On peut distinguer les applications impliquant des substrats métalliques, ou des substrats de silicium, ou de céramique.

- **Couches pour l'optique**

En optique la technologie couche mince est principalement exploiter pour deux types d'application, d'une part les couches réflectrices et, d'autre part, les couches au contraire antireflet.



- **Couches de protection**

Les dépôts en couche mince peuvent aussi être employés, lorsqu'il s'agit de matériaux inaltérables pour protéger ou renforcer une surface métallique.

1. Couches anticorrosion
2. Surfaces dures
3. Surfaces de frottement

Mais ses domaines d'applications des C.M se ne sont pas les seuls, car il existe d'autres secteurs là où la technologie des C.M a été vastement employer comme :

**Thermique** : l'utilisation d'une couche barrière thermique diminue par exemple la température de surface du métal des ailettes des réacteurs permettant ainsi d'améliorer les performances des réacteurs (augmentation de la température interne),

**Biologie** : micro capteurs biologiques, bio puces, matériaux biocompatibles ...

**Décoration** : montres, lunettes, bijoux, équipements de maison... [4]

#### **I.4 Principe de dépôt de couches minces**

Pour former une couche mince sur une surface solide (substrat). Les particules du matériau du revêtement doivent, dans certains processus, traverser un milieu conducteur jusqu'à un contact intime avec le substrat. Alors que dans d'autres processus un milieu neutre est suffisant. A l'arrivée sur le substrat, une fraction de la particule de revêtement adhère (grâce aux forces de van des Waals) ou réagissent chimiquement avec le substrat.

Les particules peuvent être des atomes, molécules, ions ou fragments de molécules ionisées. Le milieu de transport peut être solide, liquide, gaz ou le vide.

##### **I.4.1 Solide**

Dans cette situation le substrat est en contact avec le solide, seules les particules qui diffusent du solide vers le substrat qui forment une couche. Souvent il est très difficile d'obtenir des films minces par contact entre solide exemple : la diffusion de l'oxygène de la silice pour former une couche mince  $\text{SiO}_2$  sur un substrat de silicium.

##### **I.4.2 Milieu liquide**

Il est facilement utilisable que le premier cas, car le matériau est plus versatile dans cet état (épitaxie en phase liquide, électrochimique et le sol gel).

### I.4.3 Gaz ou vide

Dépôt CVD (Chemical Vapor Deposition) la différence entre le milieu gazeux et le vide est le libre parcours moyen des particules [2].

### I.5 Mécanisme de formation d'une couche mince

Il existe différentes techniques de dépôt de couches minces. Elles peuvent être divisées en deux catégories basées sur la nature du processus qui est soit physique ou chimique. Parmi les méthodes physiques on peut citer : le dépôt à vapeur physique dit "PVD" (Physical Vapor Deposition), évaporation sous vide, l'ablation laser et la pulvérisation Cathodique "Sputtering". Les méthodes chimiques incluent, les méthodes à dépôt en phase gazeuse et les techniques à solution. Les méthodes en phase gazeuse sont plasma CVD, laser CVD et le dépôt à vapeur chimique (Chemical Vapor Deposition CVD), tandis que les méthodes de spray pyrolyse, sol-gel (spin-coating et dip-coating) emploient des solutions comme précurseurs. La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la figure I.1[5].

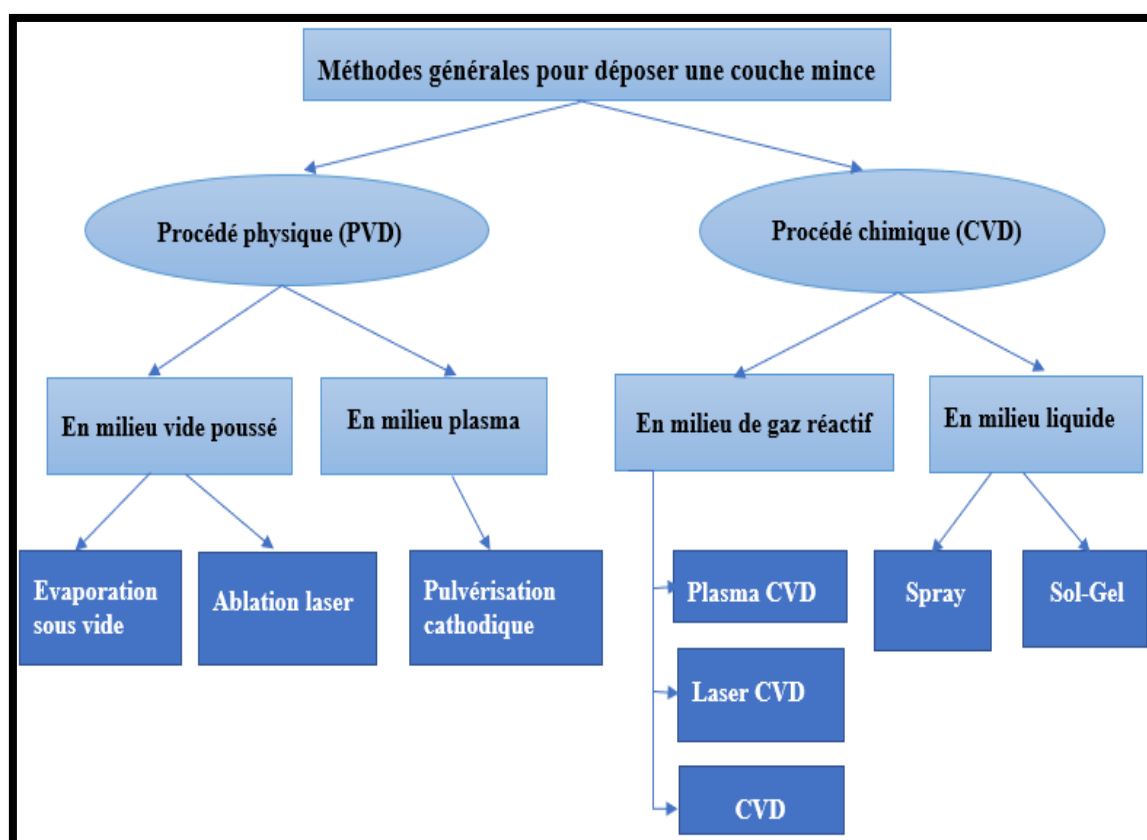


Figure I.1 Processus de dépôt des couches minces [2].

## I.6 Techniques d'élaboration des couches minces

### I.6.1 Dépôt en phase vapeur physique (PVD)

#### a. En milieu vide poussé

##### ➤ Evaporation sous vide

L'évaporation est une technique d'obtention des films sous vide qui consiste à évaporer ou sublimer un matériau. L'énergie nécessaire à l'évaporation est le plus souvent fournie par bombardement électronique. Le dépôt se fait par condensation de la phase vapeur sur un substrat.

Cette technique permet l'obtention de films à une vitesse de dépôt élevée. Les matériaux les plus souvent produits par ces techniques sont les oxydes, carbures et nitrures d'aluminium, de titane et de zirconium avec une excellente pureté. Les différents modes de chauffage sont présentés sur la figure I.2[6].

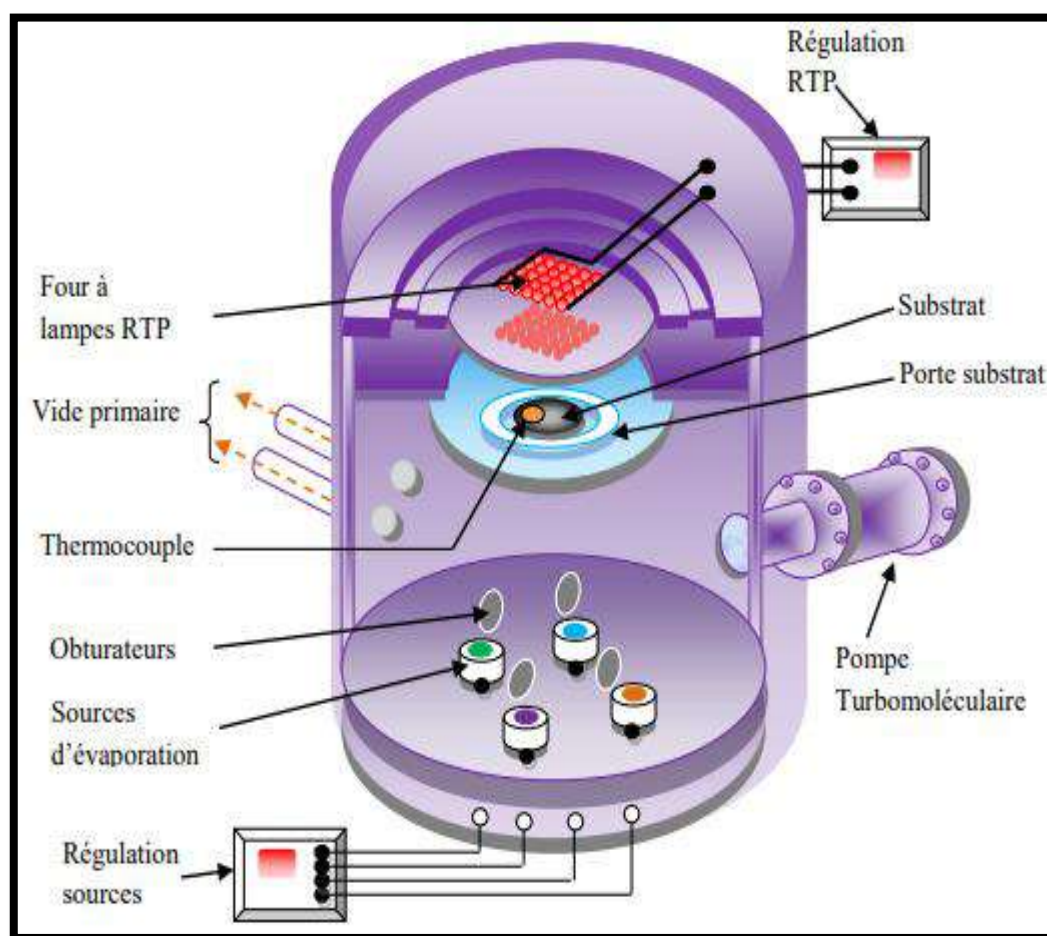


Figure I.2 Schéma du système du dépôt des couches minces par évaporation sous vide [7].

### ➤ Ablation Laser

L'ablation laser (PLD pour Pulsed Laser Deposition) consiste à focaliser un faisceau laser sur un matériau dans le but de le vaporiser (figure I.3) puis de condenser les particules ionisées sur un substrat chauffé ou non. Il est à noter que les particules ionisées ont une haute énergie cinétique (quelques dizaines d'électron volts) [7].

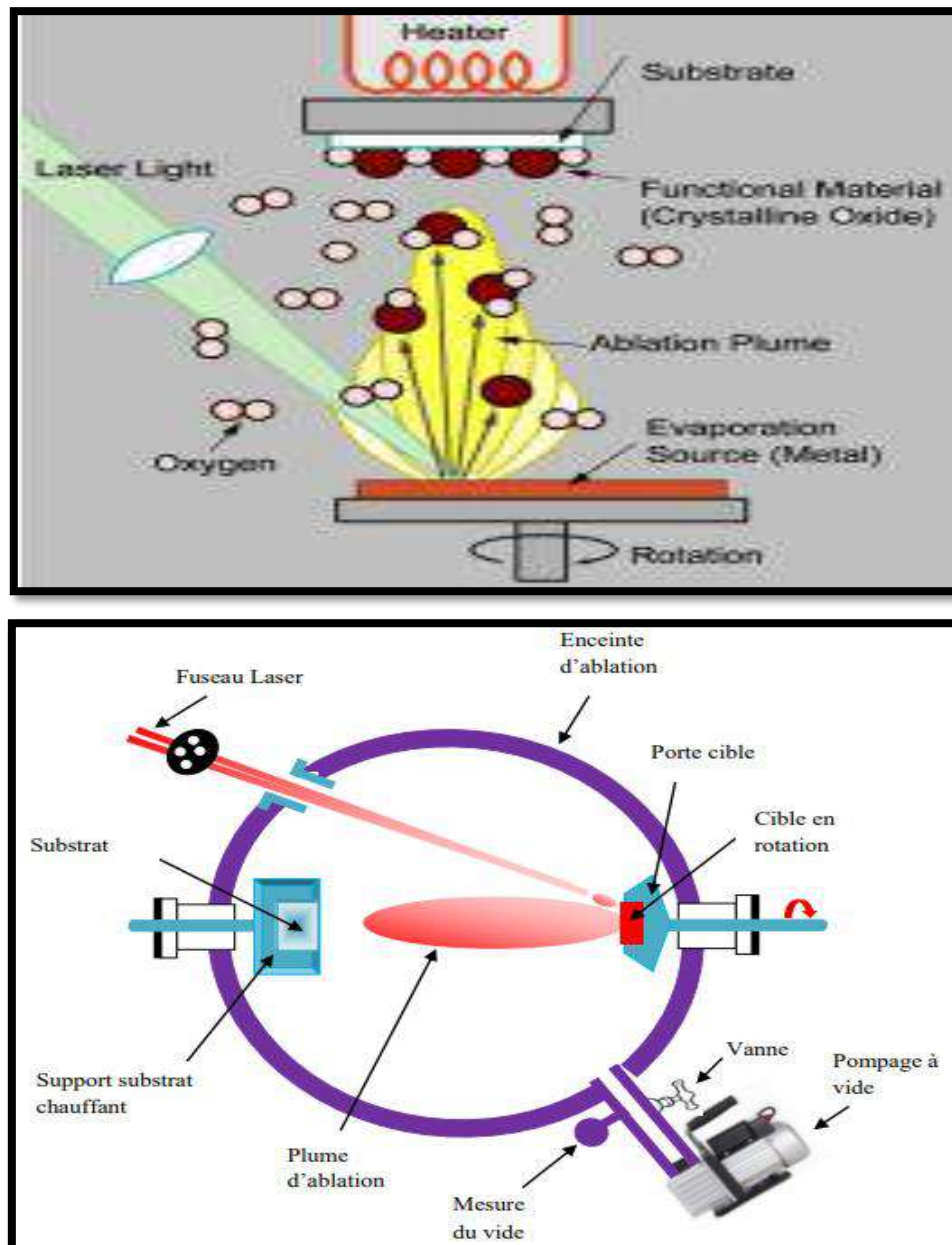


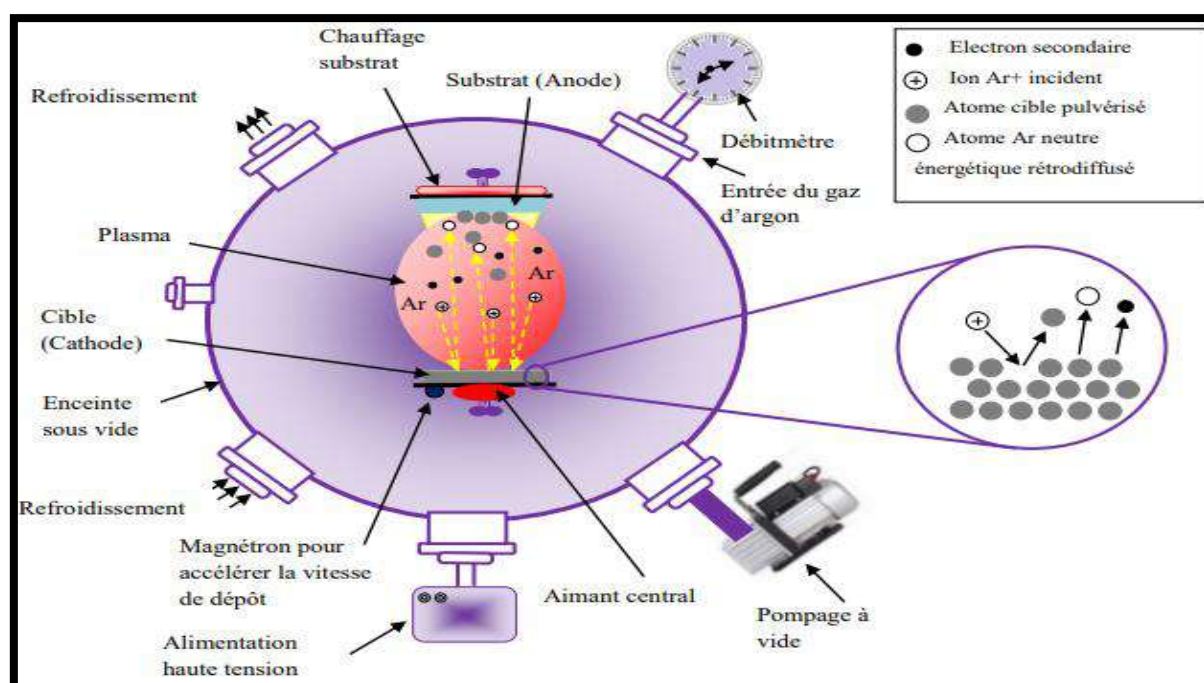
Fig. I.3 Principe de l'ablation laser [7] [8].

## b. En milieu plasma

### ➤ Pulvérisation cathodique (Sputtering)

La pulvérisation cathodique est une technique qui consiste à bombarder une cible avec des ions de manière à ce que la vapeur ainsi obtenue vienne se condenser sur un substrat. Le bombardement a lieu sur la cible qui est placée sur la cathode attirant les ions positifs générés dans un plasma de gaz à basse pression. Pour les films de TiC et de TiN, le plasma est souvent produit avec un gaz neutre (Ar) et/ou un gaz réactif (azote, méthane, propène, etc.).

De la même façon que pour l'évaporation, diverses modifications apportées à la pulvérisation cathodique donnent lieu à divers procédés d'élaboration (figure I.). Ainsi, les techniques de dépôt physique en phase vapeur sont devenues très nombreuses [6].



**Figure I.4** Schéma de principe de la technique de dépôt des couches minces par pulvérisation cathodique [7].

### I.6.2 Dépôt en phase vapeur chimique (CVD)

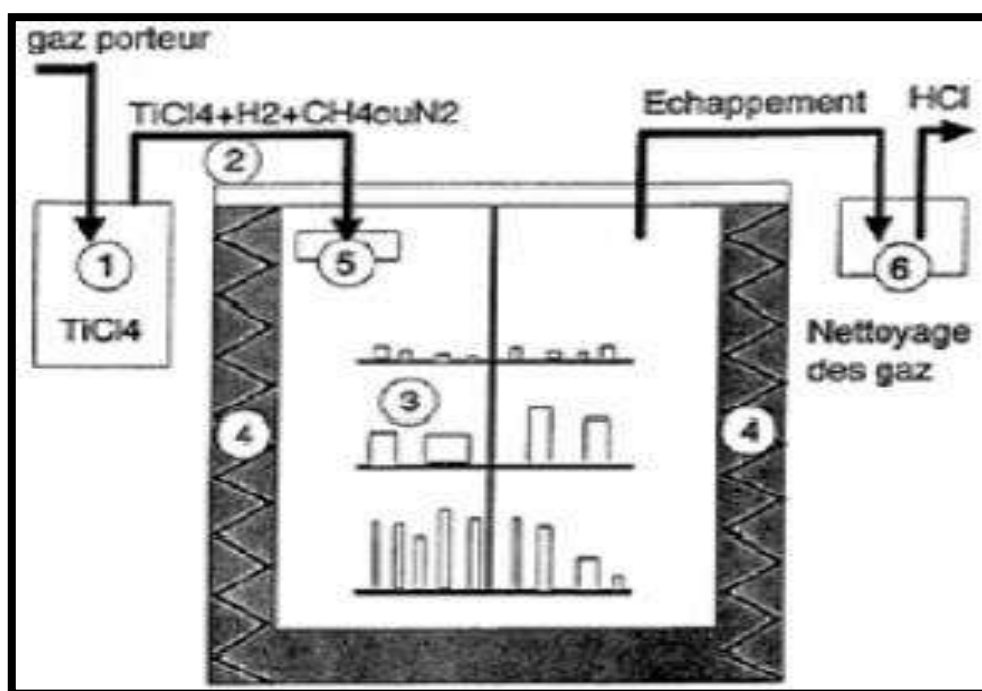
Ce procédé est souvent utilisé dans l'industrie du semi-conducteur pour produire des couches minces. Les méthodes CVD sont basées sur la réaction chimique d'un ou de plusieurs précurseurs en phase gazeuse. Dans un procédé CVD typique, le substrat est exposé à un ou plusieurs précurseurs en phase gazeuse, qui réagissent entre eux pour former ainsi un matériau solide [9].

### a. En milieu de gaz réactif

#### ➤ La CVD thermique

Dans ce cas, c'est la température du substrat qui fournit l'énergie nécessaire à l'activation de la réaction ainsi que la diffusion dans le substrat des atomes apportés à la surface. Cette température peut être obtenue par [10] :

- Chauffage direct par passage d'un courant électrique dans le substrat ;
- Chauffage par induction haute fréquence : limite le choix du substrat puisque celui-ci doit être conducteur électrique et thermique
- Chauffage par radiation thermique : peut s'appliquer aux substrats mauvais conducteurs électriques [10].



**Figure I.5** Schéma de principe d'une installation phase vapeur chimique CVD [5].

#### ➤ LCVD (Laser CVD)

Cette technique consiste à irradier, grâce à un faisceau laser continu ou pulsé, soit très localement la surface du substrat (auquel cas la réaction chimique a lieu par simple activation thermique), soit la phase vapeur de façon à provoquer l'excitation des molécules et ainsi augmenter la réactivité des espèces gazeuses. Cette technique est aussi utilisée pour obtenir des dépôts dans des zones très localisées, notamment en micro-électronique, mais très limitée industriellement du fait de son coût [10].

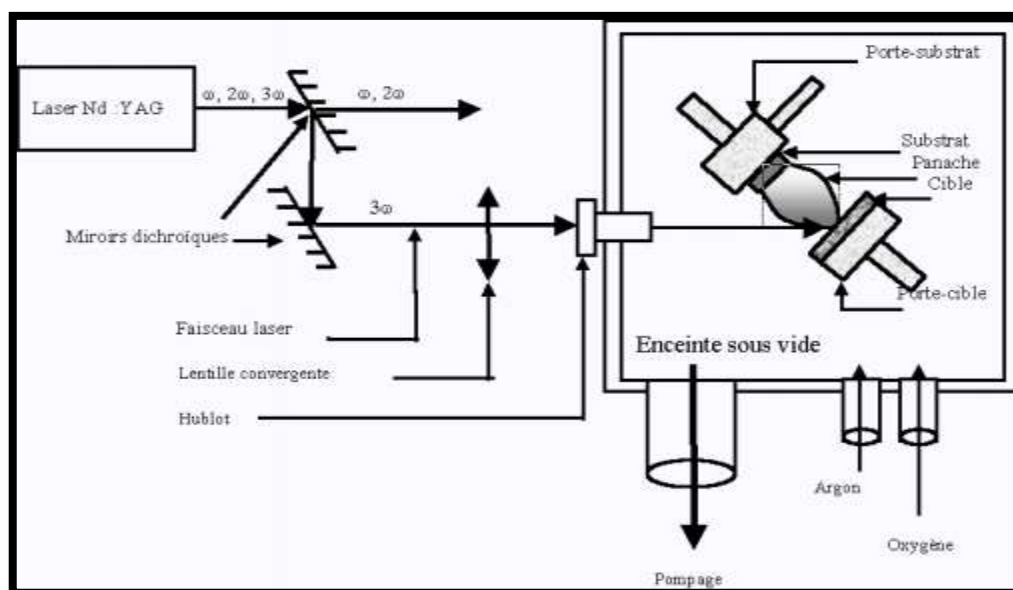


Figure I.6 Schéma de principe de la radiation Laser [4]

## b. En milieu liquide

### ➤ Sol-Gel

La technique correspond à l'abréviation de « solution gélification ». L'idée de base est simple : un mélange de précurseurs liquides se transforme en un solide par une réaction. Le « spin-coating » (Figure I.7. a) et le « dip-coating » (Figure I.7. b) sont les deux techniques les plus utilisées pour le sol gel [9].

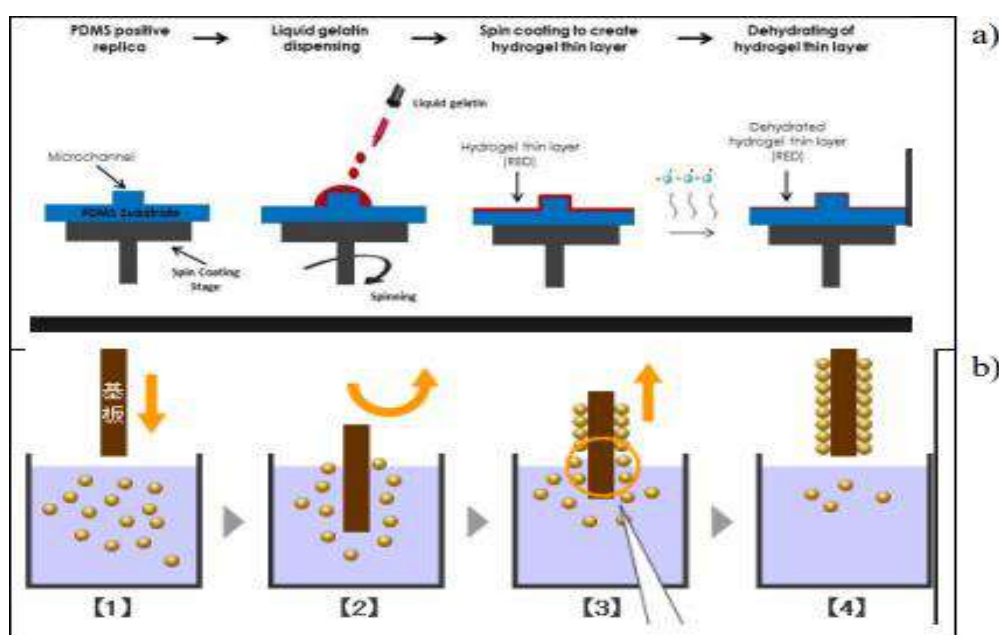
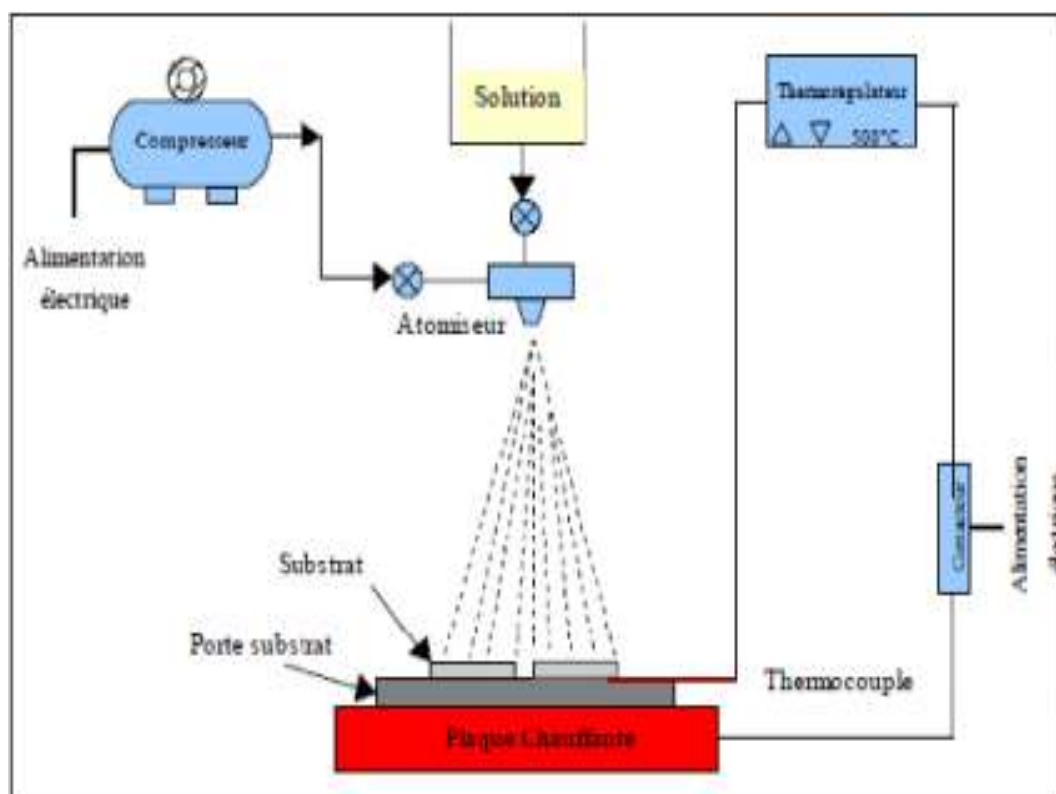


Figure I.7 Représentation schématique du principe de dépôt par (A) Spin-coating et (B) Dip-coating [9].

### ➤ Spray

Le spray pyrolyse est une technique de dépôt utilisée pour préparer les films minces et épais, Les revêtements en céramique et les poudres. À la différence de beaucoup d'autres techniques de dépôt de films, le spray pyrolyse représente une méthode très simple et relativement rentable.

C'est une technique extrêmement facile pour la préparation de couches de toute composition. La méthode a été utilisée pour le dépôt des films denses, et la production de poudres, même des dépôts multicouches peuvent être facilement préparés en utilisant cette technique Le spray pyrolyse a été employé pour plusieurs décennies dans l'industrie du verre et dans la production de pile solaire [9].



**Figure I.8** Schéma d'un équipement de dépôt par spray pyrolyse [9].

L'équipement typique du spray pyrolyse se compose d'un atomiseur, une solution de précurseur, réchauffeur de substrat et un régulateur de température.

### I.7 Avantages et inconvénients des deux technique (PVD /CVD)



**Tableau I.1** : Comparaison des propriétés des modes de dépôt [8].

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>PVD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investissement limité ;</li> <li>• Faible température de dépôt ;</li> <li>• Bonne adhérence de dépôt ;</li> <li>• Couches en contraintes compressives ;</li> <li>• Nombreuse possibilités de dépôt ;</li> <li>• Bonne acuité d'arête des outils.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessité de réaliser les dépôts sur des pièces de forme voisines ;</li> <li>• Vitesse de dépôt est faible ;</li> <li>• Dépôt non uniforme ;</li> <li>• Difficultés pour revêtir des outils à géométries complexe.</li> </ul>
<b>CVD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grand pureté des dépôts ;</li> <li>• Grande variété de composition ;</li> <li>• Possibilité de dépôt sur des pièces complexe ;</li> <li>• Bonne adhérence sur substrat.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Température de déposition élevée ;</li> <li>• Investissement élevé ;</li> <li>• Résidus toxiques de déposition ;</li> <li>• Temps de cycle long ;</li> <li>• Mauvaise acuité d'arête des outils ;</li> <li>• Couches en contraintes de traction ;</li> <li>• Risque d'attaque des substrats par gaz corrosifs.</li> </ul>

### I.8 Qu'est-ce qu'un revêtement ?

Un revêtement est un matériau ou une substance déposée uniformément sur une surface pour la couvrir ou entre deux surfaces pour les délimiter. L'utilisation des revêtements pour les pièces mécaniques est dans le but de les protéger de l'oxydation, de la corrosion, des températures extrêmes et de l'usure. En fonction de leurs applications, il existe deux types de revêtements :

- Les revêtements de protection : ils ont un rôle de protection du substrat. Parmi eux, on rencontre les films résistant à l'usure ou à l'oxydation et les films décoratifs,
- Les revêtements fonctionnels : ils ont un rôle thermique, optique, électrique, micro-électronique ou magnétique spécifique [11].

### I.8.1 Les revêtements durs en couche mince

Les matériaux durs sont devenus de plus en plus importants pour revêtir les outils de coupe et les surfaces des pièces résistant à l'usure. Les revêtements durs offrent une solution économique aux problèmes d'usure et d'abrasion. Les matériaux les plus utilisés sont les métaux de transition (Cr, Ti, Mo, etc.), les nitrures et les carbures qui en découlent par dopage à l'azote ou au carbone.

En général, les revêtements durs se subdivisent en deux groupes : les revêtements possédant une dureté  $< 40\text{GPa}$  et les revêtements super durs avec des duretés  $> 40\text{GPa}$  [8].

## I.9 Le titane

### I.9.1 Généralités

Le titane comme élément chimique est connu depuis plus de 200 ans, mais c'est seulement depuis 1920 que ses propriétés réelles sont découvertes par Van Arckel et De Boer. Le titane n'est pas réellement une substance rare car il se classe comme le neuvième élément le plus commun et le quatrième métal le plus abondant dans la croûte terrestre, dépassé seulement par l'aluminium, le fer et le magnésium. Le titane peut être allié entre autres avec du fer, de l'aluminium, du vanadium, du molybdène. Il présente deux variétés allotropique (voir tableau I.2) : une phase notée  $\alpha$  (hexagonale compacte), stable dans les conditions standard de température et pression et une phase notée  $\beta$  (cubique centrée), stable au-dessus de la température de transformation allotropique  $882,5\text{ }^\circ\text{C}$  [12].

**Tableau I.2** : Variétés allotropiques du titane [12].

Titane	A	B
Structure cristallographique	Hexagonal compact	Cubique centré
Paramètres de maille (Å)	$a = 2,9503$	$a=3,3132$

### I.9.2 Les films minces de titane : applications et propriétés

#### a. Applications

La résistance élevée/faible densité du titane font de lui un matériau essentiel dans l'industrie aérospatiale. Ses applications principales dans les moteurs de turbines à gaz, bagues de compresseur, disques, et gaines de distance, les conduits et les enveloppes de protection. Dans les avions, des charpentes structurelles en alliages de titane sont utilisées dans les pièces

du dessous de la carlingue, les supports de moteur, et les pièces de mécanisme de contrôle, les feuilles et boulons de fixation pour la construction externe de la carcasse.

La résistance à la corrosion et la biocompatibilité remarquables du titane en font le matériau idéal pour l'industrie chimique, médicale et alimentaire, et pour la recherche et le développement marin. Avec son film passif aux oxydes, il montre une résistance élevée à la corrosion contre les solutions de salines, les solutions d'acide nitrique, l'eau de mer, les fluides corporels, les jus de fruit et de végétaux. Des produits typiques sont les cuves de réaction, les échangeurs de chaleurs, soupapes et pompes ; les dispositifs prosthétiques tels que les implants, les os artificiels, les stimulateurs cardiaques artificiels et les éléments de soupape. L'alliage le plus largement utilisé pour ces produits est le Ti-6Al-4V.

Son poids léger, associé à son aspect esthétique, en fait un métal de prédilection pour les produits de consommation hauts de gamme, tels que la bijouterie et l'architecture : clubs de golf, lunettes de vue, vélos et montres et en architecture, il est utilisé pour les façades décoratives (Figure I.9) [13].



**Figure I.9** Projet musical d'expérience d'entrée, Seattle[13].

### **b. Propriétés**

Le titane est un matériau industriel de pointe possédant des propriétés remarquables. Plus particulièrement :

- ❖ Densité faible ;
- ❖ Très haute résistance mécanique ;
- ❖ Très bonne résistance en fatigue ;
- ❖ Excellentes propriétés à basse température ;

- ❖ Excellente résistance au fluage ;
- ❖ Excellente résistance à la corrosion marine, chimique et atmosphérique ;
- ❖ Excellente résistance à l'oxydation ;
- ❖ Bas coefficient de transfert thermique ;
- ❖ Bonne résistance à l'érosion et à la cavitation ;
- ❖ Bonne transmission de l'énergie ultrasonique ;
- ❖ Faible coefficient d'expansion thermique ;
- ❖ Non magnétique [14].

## **I.10 Le nitrure de titane**

### **I.10.1 Généralités**

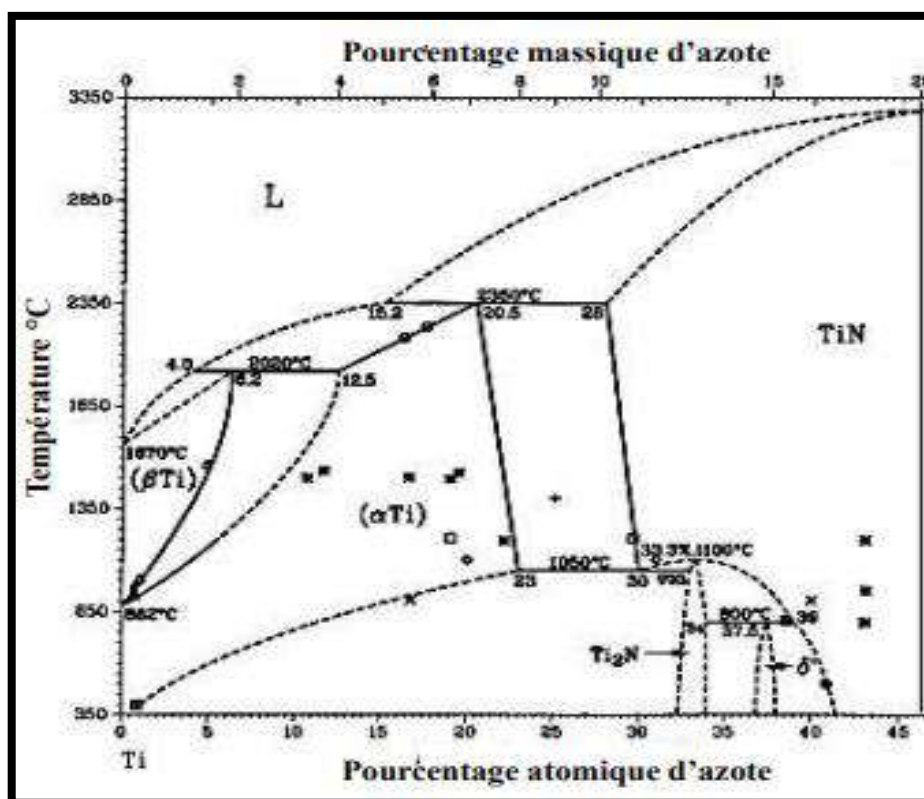
Il existe de très nombreuses applications pour les films de nitrure de titane. Le premier domaine d'application des dépôts TiN est la mécanique et reste un domaine important d'application, le but étant d'augmenter la durée de vie des outils de coupe et de formage et leur performance de travail. Ces outils sont ainsi généralement revêtus d'une couche protectrice de TiN de façon à améliorer la résistance à l'usure et à l'abrasion, la dureté la stabilité chimique, le coefficient de frottement et la conductivité thermique afin d'évacuer plus rapidement la chaleur.

Le nitrure de titane est aussi très couramment utilisé en microélectronique où la miniaturisation des dispositifs électroniques à des dimensions nanométriques nécessite l'emploi de barrières de diffusion. En effet, la métallisation des circuits intégrés et des transistors MOS (Metal Oxide Semiconductor) est généralement assurée par des dépôts d'aluminium et de cuivre, du fait de leur excellente conductivité électrique et de leur bonne adhérence sur SiO<sub>2</sub>.

Enfin, les propriétés optiques du TiN sont exploitées pour la transmission sélective de la lumière mais aussi pour des raisons esthétiques et décorative. Le nitrure de titane stœchiométrique étant de couleur jaune dorée, il est répandu en bijouterie où il remplace l'or. Sa haute résistance aux rayures et à la corrosion sont des atouts supplémentaires [12].

### **I.10.2 Diagramme d'équilibre de phases du système TiN**

La Figure I.10 présente le diagramme d'équilibre TiN théorique sous 1 bar de pression tracé par Wriedt et al. Les différents points apparaissant sur ce diagramme correspondent à une comparaison par rapport à des tracés antérieurs provenant de la littérature [15].



**Figure I.10** Diagramme d'équilibre de phases du système TiN [15].

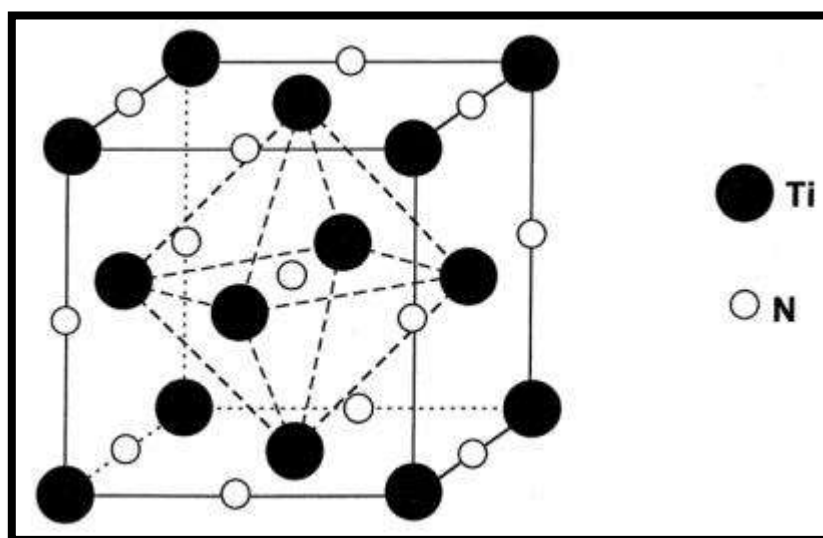
Ce diagramme est moins complexe que celui du système Ti-O présenté précédemment. Comme pour l'oxygène, la phase  $\beta$ -Ti est moins avide d'azote par rapport à la phase  $\alpha$ -Ti. Les limites de solubilité d'azote sont d'environ 32 %at dans  $\alpha$ -Ti et d'environ 6 %at dans  $\beta$ -Ti. La phase TiN présente un vaste domaine d'existence entre  $\text{TiN}_{0,6}$  et  $\text{TiN}_{1,1}$  [15].

### I.10.3 Structure cristalline

La structure cristallographique du nitrure de titane est cubique à faces centrées, de type Na-Cl (figure I.11). Le paramètre de maille du nitrure de titane stœchiométrique est de 0,424 nm. Les liaisons chimiques dans le nitrure de titane sont d'une grande complexité et sont à l'origine des propriétés particulièrement intéressantes de ce matériau. En effet les liaisons ont à la fois un caractère covalent, conduisant à une grande dureté, un caractère métallique, conférant une excellente conductivité électrique à TiN, supérieure à celle du titane, mais également à caractère ionique. Ses principales propriétés physico-chimiques sont répertoriées ci-dessous [16] :

**Tableau I.3** : les propriétés physico-chimiques.

<b>Température de fusion</b>	2930 °C
<b>Résistivité électrique</b>	18 $\mu\Omega$ .cm à 293 K
<b>Conductivité thermique</b>	29,3 W.m-1.K-1
<b>Micro dureté</b>	200 kg.mm-2

**Figure I.11** Réseau cristallin du TiN [16].

#### I.10.4 Propriétés mécaniques du nitrure de titane

Grâce aux liaisons covalentes, le TiN possède des propriétés mécaniques très intéressantes, en particulier une dureté et un module de Young particulièrement élevés. La dureté d'un matériau représente sa résistance à la pénétration par un autre matériau, tandis que le module de Young traduit la rigidité, c'est-à-dire la résistance à la déformation élastique d'un matériau soumis à une contrainte mécanique. De manière générale, dans le cas des films minces, les valeurs de module de Young et de dureté sont inférieures à celle du matériau TiN massif (350 à 550 GPa en fonction de la densité relative).

- ❖ Le film mince TiN produit par PVD comporte des porosités inter colonnaires, de sorte que la densité du film ne peut pas être aussi élevée que le matériau TiN massif ;
- ❖ La microstructure des revêtements TiN est constituée de grains poly cristallins généralement colonnaires et les joints de grains ont tendance à diminuer le module de Young des revêtements [12].

### I.10.5 Contexte industriel et applications

Le recours à des revêtements de nitrure de titane s'explique généralement par le besoin d'augmenter la durée de vie des outils et leur efficacité. Ces couches de revêtements d'aspect brillant sont d'ailleurs très fines : elles excèdent rarement  $4\mu\text{m}$ , les films plus épais étant sujets aux griffures. Le métal revêtu doit être dur (c'est-à-dire présenter une résistance en compression élevée), afin qu'un poinçonnement ne puisse endommager le revêtement.

- ❖ Le nitrure de titane sert de film anti-usure pour les outils de coupe, surtout les aciers rapides et les armes. On protège ainsi les outils employés dans les Procédé de séparation des matériaux, comme les forets, les poinçons et les fraiseuses ;
- ❖ Sa dureté et sa résistance à l'usure, couplées à un pouvoir dissipatif important le désignent comme matériau de choix pour la fabrication des paliers dans les machines de précision et les rotors ;
- ❖ Ses propriétés anti-adhérentes justifient son emploi comme revêtement de protection à haute température ;
- ❖ Le nitrure de titane est utilisé comme revêtement d'essieu dans les amortisseurs ainsi qu'en hydraulique industrielle en raison de son faible coefficient de frottement ;
- ❖ Son excellente stabilité aux températures élevées permet le frittage en métallurgie des poudres ;
- ❖ Grâce à sa biocompatibilité, on peut l'utiliser en génie médical et dans les instruments chirurgicaux, ainsi que dans les implants (par exemple pour les électrodes de stimulateur cardiaque) ;
- ❖ Le nitrure de titane possède un éclat doré ce qui explique qu'on l'utilise parfois comme placage décoratif d'objets de prestige et bijoux comme les montures de lunettes, montres et bracelets, ou encore les couverts de cuisine ;
- ❖ Le nitrure de titane peut être employé comme additif afin d'accroître la conductivité électrique de céramiques dans les machines ;
- ❖ Ce matériau est enfin utilisé dans la technique des semi-conducteurs comme barrière métallique, car non seulement il empêche le passage d'atomes métalliques dans le silicium, tout en maintenant une certaine conductivité électrique entre les substrats séparés [17].

## **I.11 Conclusion**

Les revêtements modifient les propriétés du substrat sur lequel la couche mince est déposée pour améliorer leurs propriétés mécaniques. Dans notre travail les revêtements se composent de nitrure de titane TiN qui est utilisé comme revêtement des alliages de titane et des composants en acier, en carbure et en aluminium afin d'en améliorer les propriétés des surfaces.



## **Chapitre II**

# **La logique floue**

## II.1 Introduction

Au cours de la dernière décennie, les systèmes flous ont remplacé la technologie conventionnelle dans différentes applications scientifiques et d'ingénierie des systèmes, en particulier dans les systèmes de reconnaissance et de contrôle des formes. La même technologie floue, sous forme de raisonnement d'approximation, est renaissant également dans l'informatique, où il soutient désormais la prise de décision et les systèmes experts avec une capacité de raisonnement puissante et un nombre limité des règles [18].

Dans ce chapitre, nous allons faire une étude bibliographique sur la logique floue. C'est quoi la logique floue ? quelle est la différence entre la logique floue et la logique classique ? et quelle est les principales caractéristiques du ce système ?

## II.2 Logique floue

### II.2.1 Historique

#### a. Apparition de logique floue

Le terme « ensemble flou » est apparu pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi A. Zadeh de l'université de Berkeley, aux États-Unis, a publié un article intitulé « Ensembles flous ». Depuis, il a réalisé de nombreuses percées théoriques majeures dans ce domaine et a été rapidement rejoint par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques [19].

#### b. Applications initiales

Dans le même temps, certains chercheurs se sont tournés vers la résolution par logique floue de problèmes jugés difficiles. En 1975, le professeur Mamdani de Londres a développé une stratégie pour le contrôle des processus et a publié les résultats encourageants qu'il avait obtenus pour le contrôle d'un moteur à vapeur. En 1978, le danois société, F.L. Smith, a obtenu le contrôle d'un four à ciment. Il s'agissait de la première véritable application industrielle de la logique floue [19].

#### c. Boom

La logique floue a connu un véritable boom au Japon où la recherche était non seulement théorique mais aussi fortement orientée vers l'application. À la fin des années 80, la logique floue avait pris son envol et les produits de consommation tels que les machines à laver, les appareils photo et les caméscopes avec la mention « logique floue » étaient trop nombreux pour être dénombrés. Applications industrielles telles que le traitement de l'eau, les

grues à conteneurs portuaires, les souterrains et la ventilation / climatisation les systèmes ont également commencé à utiliser la logique floue. Enfin, des applications développées dans d'autres domaines tels que la finance et le diagnostic médical. À partir de 1990, de nombreuses applications ont commencé à émerger en grand nombre en Allemagne, ainsi que, dans une moindre mesure, aux États-Unis [19].

### II.2.2 Concept de la logique floue

Les bases de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh. A cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux. Dès 1974, on trouve les premières applications industrielles, notamment dans le domaine de la robotique. Dans la logique classique ou booléenne, tout élément d'un ensemble n'admet qu'une seule valeur 1 ou 0, or dans la logique floue, un ensemble  $A$  de l'univers de discours  $U = \{x\}$  est défini comme une distribution par laquelle chaque valeur de  $x$  est assignée un nombre quelconque dans l'intervalle  $[0, 1]$ , indiquant le degré d'appartenance de  $x$  à l'ensemble  $A$ , c'est-à-dire :

$$A = \{x \in U / \mu_A(x) \in [0,1]\} \quad (\text{II.1})$$

Ainsi, un concept flou n'a de sens qu'à la condition que l'on puisse préciser :

- L'univers  $U$  de discours des éléments  $x$ , considérés.
- Les fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  des éléments  $x \in U$ , à l'ensemble flou  $A$  [20].

### II.2.3 Utilisation de la logique floue

La logique floue est une technique de résolution de problèmes très puissants avec une large applicabilité dans le control et la prise de décision. Elle est très utile lorsque le modèle mathématique du problème à traiter n'existe pas ou existe mais difficile à implémenter, ou il est trop complexe pour être évalué assez rapidement pour des opérations en temps réel. Ou bien lorsque des experts humains sont disponibles pour fournir des descriptions subjectives du comportement du système avec des termes en langage naturel. La logique floue est aussi supposée de travailler dans les situations où il y a de large incertitude et des variations inconnues dans les paramètres et la structure du système [21].

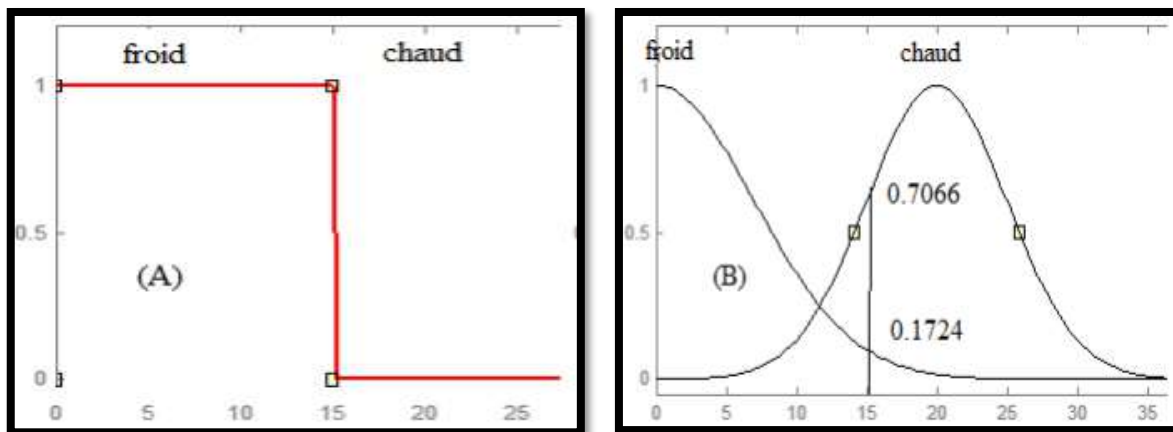
### II.2.4 Comparaison entre la logique classique et la logique floue

La logique booléenne classique ne permet que deux états : **VRAI** ou **FAUX**. La logique floue fut proposée par Zadeh en 1965 ; elle permet d'exprimer différents niveaux, plutôt que seulement 0 et 1.

**Par exemple :** le moteur est chaud, le moteur est très chaud. Quelle la différence entre « chaud » et « très chaud » ? ou encore, un homme est haut s'il mesure 170cm. Un homme est très haut s'il mesure 190cm. Où est la ligne de démarcation ? Un homme de 180cm est-il haut ou très haut ? 180.5cm ? 179.5cm ?

La logique floue est une branche des mathématiques qui permet à un ordinateur de modéliser le monde réel de la même façon que les personnes. Elle est préoccupée par la quantification et le raisonnement en utilisant un langage qui permet des définitions ambiguës, comme beaucoup, peu, haut, dangereux. Elle s'occupe de situations où la question qui est posée et la réponse obtenue contiennent des concepts vagues.

Selon la logique floue, le raisonnement exact est un cas limite du raisonnement approximatif, tout n'est qu'un degré. Tout système logique peut être rendu flou. Les connaissances sont interprétées comme une collection de contraintes élastiques ou floues d'un ensemble de variables. L'inférence est un processus de propagation de contraintes élastiques. La logique booléenne est un sous-ensemble de la logique floue [22].



**Figure II.1** Classification des températures d'une pièce en deux ensembles (A) logique classique (B) logique floue [23].

La logique floue permet de définir des sous-ensembles, comme « froid » ou « chaud », en introduisant la possibilité pour une valeur d'appartenir plus ou moins à chacun de ces sous-ensembles [23].

### II.2.5 Théorie des ensembles floue

La logique floue est basée sur le concept de sous-ensembles flous (fuzzy sets (Zadeh, 1972)). La définition d'un sous-ensemble flou répond au besoin de représenter des connaissances imprécises ou imparfaites, soit parce qu'elles sont exprimées en langage

naturel par un observateur qui donne peu de précisions ou qui est peu fiable, soit parce qu'elles sont obtenues à l'aide d'instruments d'observation qui sont peu précis.

La notion de sous-ensemble flou permet de traiter :

- Des catégories aux limites mal définies,
- Des situations intermédiaires entre le tout et le rien,
- Le passage progressif d'une propriété à une autre,
- Des valeurs approximatives,
- Des classes en évitant l'utilisation arbitraire de limites rigides.

Le concept de sous-ensemble flou constitue un assouplissement de celui d'un sous-ensemble donné [24].

#### a. Définition des ensembles flous

Dans un ensemble de référence  $X$ , un sous-ensemble flou  $A$  de ce référentiel est caractérisé par une fonction d'appartenance  $\mu$  de  $X$ , qui associe à chaque élément  $x$  de  $X$ , le degré  $\mu_A(x)$ , compris entre 0 et 1, pour lequel  $x$  appartient à  $A$ . Cette fonction est l'extension de la fonction caractéristique d'un sous-ensemble classique (Zadeh, 1965 ; Kaufmann, 1973) .

La notion de sous-ensemble flou a pour but de permettre des gradations dans l'appartenance d'un élément  $x$  à une classe  $A$ , c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe [24].

### II.2.6 Fonctions d'appartenance

Dans un domaine discret  $X = \{x_i/i=1, 2, \dots, n\}$  ou continu  $X$ , un ensemble flou  $A$  peut être défini par un ensemble de paires : degré d'appartenance / élément [25] :

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \text{ Cas Discret} \quad (\text{II.2})$$

$$A = \int_x \mu_A(x)/x \text{ Cas Continu} \quad (\text{II.3})$$

Dans un domaine continu, les ensembles flous sont définis analytiquement par leurs fonctions d'appartenance [25].

En général, on utilise pour les fonctions d'appartenance trois formes géométriques : trapézoïdale, triangulaire et de cloche. Les deux premières formes sont les plus souvent employées en raison de leur simplicité [26].

On peut utiliser pour les fonctions d'appartenance des formes différentes figure (II.2).

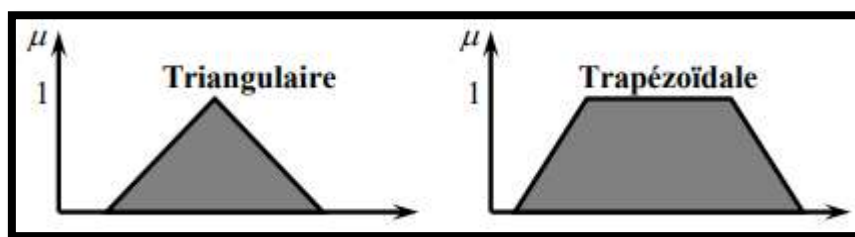


Figure II.2 Différentes formes pour les fonctions d'appartenance [25].

### II.2.7 Opérateurs en logique floue

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre des notions floues, c'est-à-dire d'effectuer des calculs sur des degrés de vérité. Juste comme pour la logique classique, les opérateurs **ET**, **OU** et **NON** peuvent être définis [19].

La caractérisation des ensembles flous par les fonctions d'appartenance a permis une extension de certaines opérations définies sur les ensembles classiques au cas flou.

Soient A et B deux ensembles flous définis dans l'univers de discours X ayant respectivement  $\mu_A$  et  $\mu_B$  comme fonction d'appartenance.

Les opérateurs habituels, soit l'addition, la soustraction, la division et la multiplication de deux ou plusieurs ensembles flous existent aussi. Toutefois, ce sont les deux opérateurs d'union et d'intersection qu'on utilise le plus souvent dans la commande par la logique floue [25].

#### a. Opérateurs "NON"

Selon la théorie des ensembles, l'ensemble complémentaire :

$$C = \bar{A} = \text{NON}(A) \quad (\text{II.4})$$

Est défini par les éléments de x qui n'appartiennent pas à l'ensemble A. Dans le cas de la logique floue, cette définition peut être exprimée par les fonctions d'appartenances de la manière suivante :

$$\mu_C(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II.5})$$

La figure (II.3.A) met en évidence cette relation [25].

### b. Opérateurs ET

L'opérateur ET correspond à l'intersection de deux ensembles A et B et on écrit :

$$C = A \cap B \quad A \text{ ET } B \quad (\text{II.6})$$

Dans le cas de la Logique floue, l'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la formation du minimum, qui est appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(x)$  des ensembles A et B à savoir [26] :

$$\mu_C = \min \{ \mu_A, \mu_B \} \quad (\text{II.7})$$

La figure (II.3.B) met en évidence cette relation.

### c. Opérateur OU

L'opérateur OU correspond à l'union de deux ensembles A et B, on a donc :

$$C = A \cup B \quad A \text{ OU } B \quad (\text{II.8})$$

La réalisation de l'opérateur 'ou' au niveau de la logique floue se fait en général par la formulation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A$  et  $\mu_B$  des deux ensembles A et B. On a donc l'opérateur maximum [25] :

$$\mu_C = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (\text{II.9})$$

La figure (II.3.C) met en évidence cette relation.

Les opérateurs les plus utilisés en logique floue sont [27] :

- ❖ L'opérateur "ET" pour la t-norme, qui correspond à l'intersection de deux ensembles A et B. Il peut être réalisé par :

La fonction "Min" :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.10})$$

La fonction arithmétique "Produit" :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (\text{II.11})$$

- ❖ L'opérateur "OU" pour la s-norme, qui correspond à l'union de deux ensembles A et B. Il peut être réalisé par :

La fonction "**Max**" :

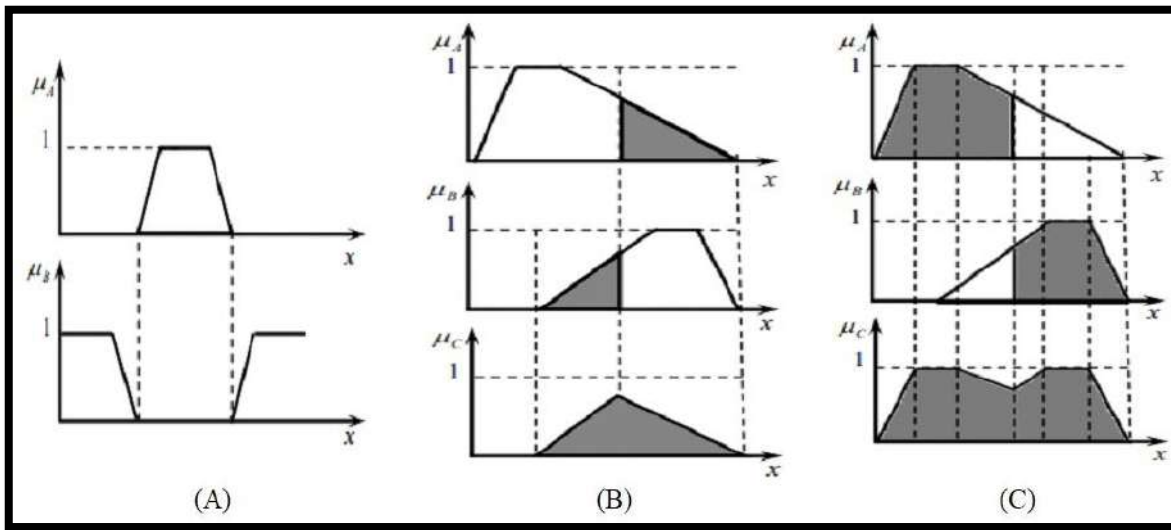
$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.12})$$

La fonction arithmétique "**Somme**" :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \quad (\text{II.13})$$

❖ L'opérateur "**NON**" est réalisé par :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II.14})$$



**Figure II.3** (A) opérateur NON, (B) opérateur ET et (C) opérateur OU[25].

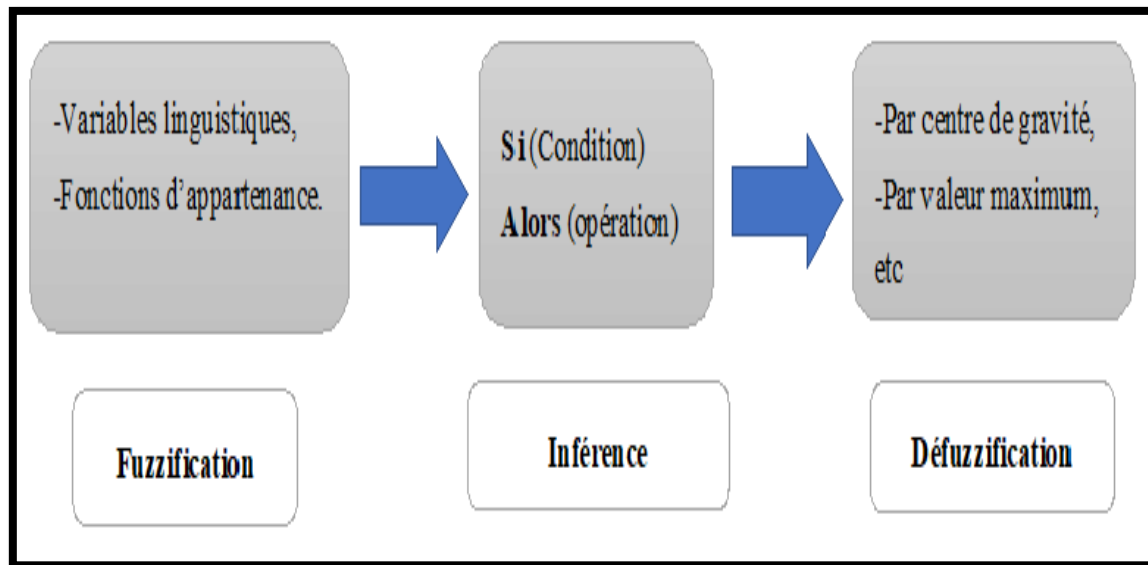
### II.2.8 Modèle floue

En général, tout système physique modélisable (linéaire ou non linéaire) peut se décomposer en trois éléments inter-liés :

- **INPUT** (variable d'entrée) ;
- **MODELE** (formulation mathématique) ;
- **OUTPUT** (variable de sortie).

En cas d'une non linéarité ou en l'absence d'un modèle mathématique décrivant un système physique, la logique floue peut être une alternative d'un tel système, à la condition qu'on doit disposer des informations de base sur notre système (par exemple : données expérimentales) [20].





**Figure II.4** Schéma synoptique du modèle flou [20].

### II.2.9 Commandes floues

De façon générale, un système de commande a pour objectif de piloter l'entrée d'un processus afin d'obtenir un fonctionnement correct de ce dernier. Lorsqu'on dispose d'un modèle plus ou moins précis du système à commander, on peut utiliser un contrôleur de structure standard, fixe ou adaptatif, dont les paramètres seront évalués à partir du modèle. Malheureusement, lorsque le système est difficilement modélisable, la conception du contrôleur peut s'avérer très complexe, sinon impossible.

Lorsqu'un opérateur humain commande manuellement un système, les actions qu'il réalise sont dictées par une connaissance subjective du fonctionnement de ce système. Par exemple, s'il fait « froid » dans une pièce, on « augmente » le chauffage ; s'il fait « très froid », on « chauffe plus ». Cette commande du système peut être envisagée de façon différente selon la personne qui la réalise : la sensation de « froid » n'est pas directement liée à une mesure de la température.

Ce principe est à la base de la commande floue. La mesure réalisée sur le système (« température ») est prise en compte par l'intermédiaire d'une variable linguistique (« froid », « tiède », « chaud »), qui est issue d'une analyse par un expert humain. Ensuite, l'action à réaliser est déduite à la fois d'un ensemble de règles de commande (« s'il fait froid, on chauffe plus » . . .) et de l'état du système, qualifié par la variable linguistique. Enfin, la commande finale du système est créée en utilisant les conclusions de la déduction [23].

### a. Fuzzification

Le fuzzificateur effectue la conversion de l'entrée numérique observée  $u_0=(u_{01},u_{02},\dots,u_{0n})^T \in U$  en un ensemble flou  $F_x = F_{x_0} \times F_{x_2} \times \dots \times F_{x_n}$  définie dans U. Cette opération est nécessaire, car dans les applications de la logique floue, les données observées sont souvent numériques, mais dans le système flou la manipulation des données est basée sur la théorie des ensembles flous.

Il y'a au minimum deux choix pour cette conversion :

#### ➤ Fuzzification singleton

Où l'opérateur de fuzzification converti l'entrée numérique  $u_0 \in U$  en un singleton flou  $F_x$  dans U tel que :

$$\mu_{F_x}(u) = 1 \quad \text{Si} \quad u = u_0 \quad (\text{II.15})$$

$$\mu_{F_x}(u) = 0 \quad \text{Si} \quad u \neq u_0 \quad (\text{II.16})$$

Cette stratégie est largement utilisée dans les applications de contrôle flou, car elle est facile à implémenter [21].

#### ➤ Fuzzification non – singleton

Est une fuzzification pour laquelle  $\mu_{F_x}(u)$  est égal à l'unité si  $u=u_0$  et décroît quand on s'éloigne de  $u_0$ . Par exemple,

$$\mu_{F_x}(u) = \exp(-(u - u_0)^T \cdot (u - u_0) / \sigma^2) \quad (\text{II.17})$$

Où  $\sigma$  est un paramètre caractérisant la forme de  $\mu_{F_x}$  [21].

### b. Inférence floue

L'inférence ou la prise de décision est le noyau du contrôleur flou. Elle a l'aptitude de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et l'expertise. On peut décrire l'inférence de manière explicite par la description linguistique à l'aide d'un certain nombre de règles. Chaque règle possède une condition précédée du symbole SI et une conclusion, action ou opération, précédée du symbole **ALORS**.

Selon la stratégie du réglage adopté. Pour la présentation des différentes possibilités d'exprimer les inférences, on choisit un exemple de système à régler avec deux variables flous  $x_1$  et  $x_2$  qui forment les variables d'entrées de l'inférence, et une variable de sortie  $x_r$ ,

exprimée elle aussi comme variable floue. Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons. La description linguistique des inférences peut être écrite comme suit :

**SI** ( $x_1$  est négatif grand **ET**  $x_2$  est environ zéro) **ALORS** ( $x_r$  est négatif grand),

**Où**

**SI** ( $x_1$  est négatif grand **ET**  $x_2$  est positif moyen) **ALORS** ( $x_r$  est positif moyen) [25].

Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons :

➤ **Linguistiquement**

On écrit les règles de façon explicite comme dans l'exemple suivant,

**SI** (la température est élevée **ET** la vitesse est faible) **ALORS** la tension est grande positive

**Où**

**SI** (la température est moyenne **ET** la vitesse est faible) **ALORS** la tension est positive [27].

➤ **Symboliquement**

Il s'agit en fait d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des abréviations [27].

**SI** (T E **ET** V F) **ALORS** U=GP

**Où**

**SI** (T M **ET** V F) **ALORS** U=G [25].

➤ **Par matrice d'inférence**

Elle rassemble toutes les règles d'inférences sous forme de tableau. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau (II.1) représentent les ensembles flous des variables d'entrées ( $x_1$  et  $x_2$ ). L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie ( $x_r$ ) définie par la règle. Il y a autant de cases que de règles.

Si toutes les cases de la matrice sont remplies, on parle alors de règles d'inférence complètes [25].

**Tableau II.1** : Matrice d'inférences complètes.

$X_r$	$X_1$							
	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG	
$X_2$	NG	NG	NG	NG	NM	NP	NP	EZ
	NM	NG	NM	NM	NM	NP	EZ	PP
	NP	NG	NM	NP	NP	EZ	PP	PM
	EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	EZ	PP	PP	PM	PG
	PM	NP	EZ	PP	PM	PM	PM	PG
	PG	EZ	PP	PP	PM	PG	PG	PG

**Type d'inférences floues**

Il y a plusieurs sortes d'inférences floues parmi lesquels [21] :

- **Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani)**

La méthode d'inférence max-min est réalisée, au niveau de la condition l'opérateur « **ET** » par la formulation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par « **ALORS** », lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie est réalisé par la formation du minimum.

Enfin l'opérateur « **OU** » qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [25]. Reprenons l'exemple précédent où seulement deux règles sont activées :

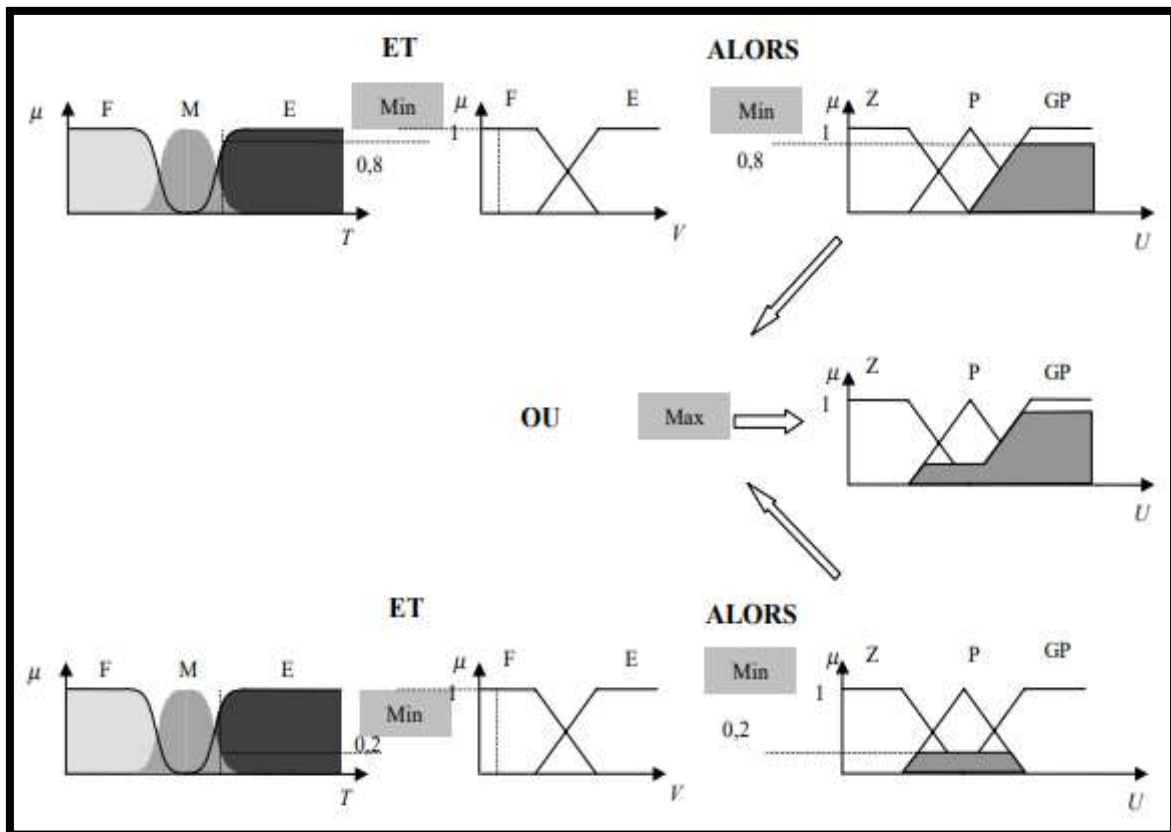


Figure II.5 Exemple d'inférence Max-Min [27].

- **Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen)**

Cette méthode utilise les représentations standard pour les sous-ensembles d'entrée et de sortie. Le poids d'activation d'une règle est utilisé pour multiplier la fonction d'appartenance du sous-ensemble de sortie imposée par cette règle.

L'action globale (ou la valeur de commande) est l'union des actions produites par chaque sous-ensemble individuellement [21].

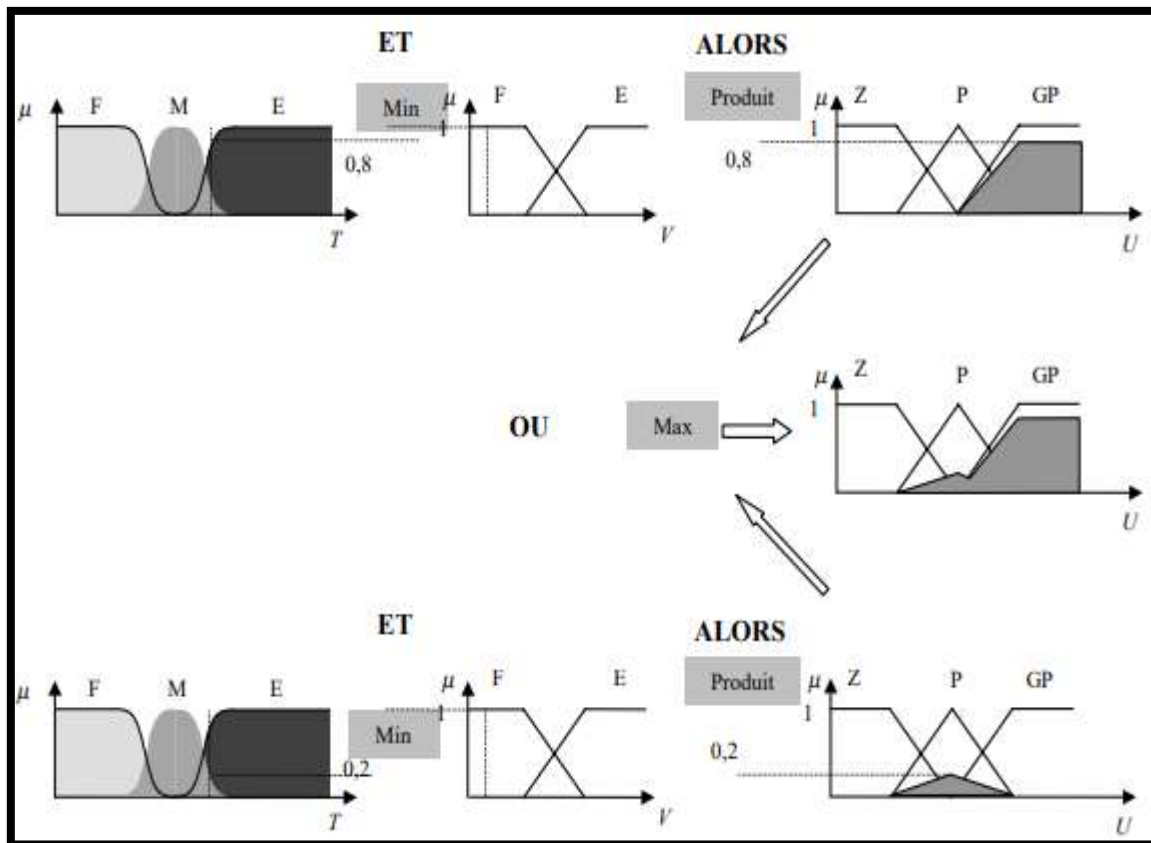


Figure II.6 Exemple d'inférence Max-Produit [27].

### Méthode d'inférence somme-produit

Par opposition aux méthodes d'inférence précédentes, la méthode d'inférence somme-produit réalise, au niveau de la condition, l'opérateur **OU** par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opérateur **ET** est réalisé par la formation du produit. La conclusion de chaque règle, précédée par **ALORS**, liant le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie par l'opérateur **ET**, est réalisé par la formation du produit.

L'opérateur **OU** qui lie les différentes règles est réalisé par la formation de la somme, donc de la valeur moyenne. Dans ce cas, le **OU** liant les règles sont réalisées par la formation de la somme et l'**ALORS** est réalisé par la formation du produit, ainsi s'explique la désignation par somme-produit de cette méthode d'inférence [21].

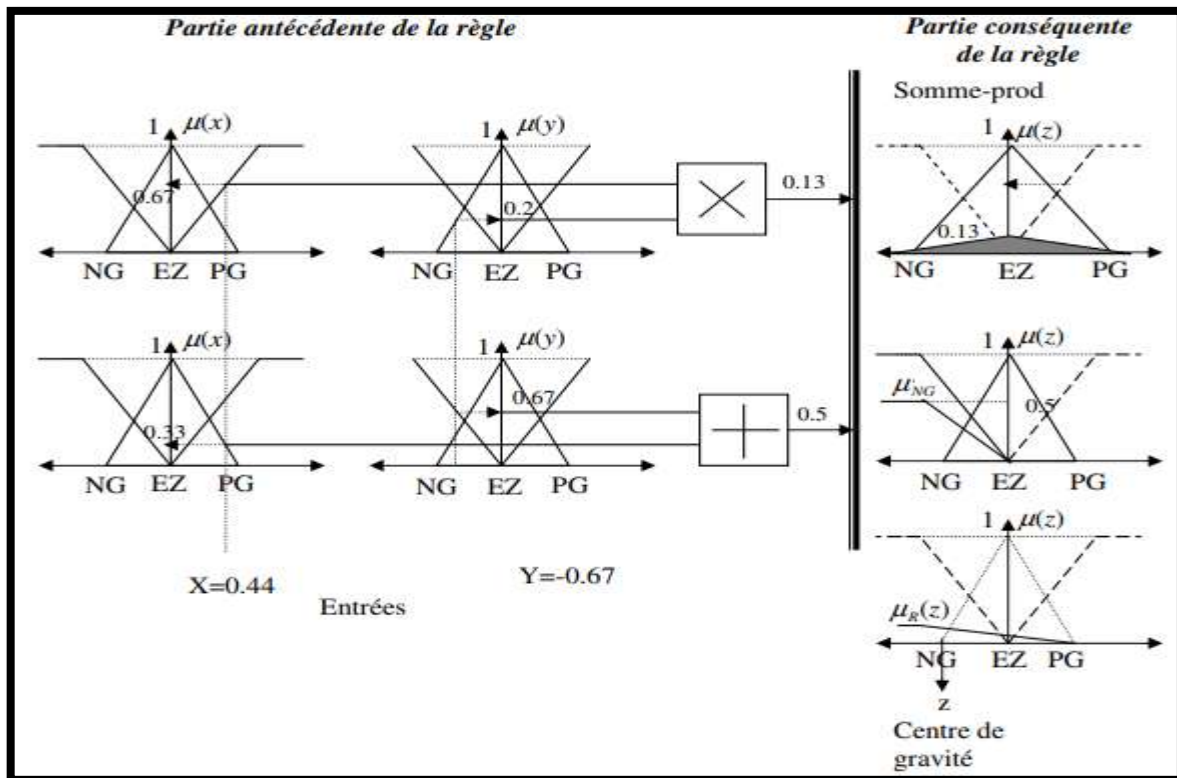


Figure II.7 Méthode d'inférence somme-produit [21].

### Méthode de Sugeno

L'opérateur « ET » est réalisé par la formation du minimum, la conclusion de chaque règle floue a une forme polynomiale. La sortie est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue [25].

#### c. Défuzzification

Les méthodes d'inférence fournissent un résultat qui est une fonction d'appartenance. Or, la sortie du contrôleur est en général une grandeur continue, prenant sa valeur dans un intervalle.

La défuzzification est le traitement qui permet de définir une correspondance entre le résultat de l'inférence et la grandeur continue fournie en sortie [23].

#### Méthode du centre de gravité

C'est la méthode de défuzzification la plus courante. L'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultant de l'inférence correspond à la valeur de sortie du régulateur [27].

$$dU_n = \frac{\int x \mu_R(x) dx}{\int \mu_R(x) dx} \quad (\text{II.18})$$

Il apparaît que plus la fonction d'appartenance résultante est compliquée, plus le processus de défuzzification devient long et coûteux en temps de calcul [27].

### Défuzzification par valeur maximum

Cette méthode ne s'utilise que dans le cas discret. On choisit comme sortie  $y_m$  l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante  $\mu_{B_{res}}(y)$ . Lorsque  $\mu_{B_{res}}(y)$  est écrêtée, on prend la moyenne des abscisses du maximum [23] :

$$y_m = \frac{\sum_{y_i \in M} y_i}{|M|} \quad (\text{II.19})$$

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

$$M = \{y \in [-c, c] \mid \mu_{B_{res}}(y) = H(B_{res})\} \quad (\text{II.20})$$

### Méthode de la moyenne pondérée

Le défuzzificateur examine l'ensemble flou qui détermine les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance est maximale, ensuite se fait le calcul de la moyenne des ces valeurs comme résultat de défuzzification [25].

### Défuzzification par centre maximum

Dans cette méthode, la valeur de sortie est estimée par l'abscisse du point correspondant au centre de l'intervalle pour lequel la fonction d'appartenance est maximale. Cette valeur est fournie par l'expression [23] :

$$y_{cm} = \frac{\inf M + \sup M}{2} \quad (\text{II.21})$$

Où M est défini dans l'équation (II.20)

### Technique des hauteurs pondérées

Le défuzzificateur d'abord évalue  $\mu_B^k$  en  $x^k$  et calcul ensuite la sortie du système flou par :



$$x = \frac{\sum_{k=1}^M \mu_B^k(\bar{x}) \bar{x}^k}{\sum_{k=1}^M \mu_B^k(\bar{x})} \quad (\text{II.22})$$

Où :  $x^k$  dénote le centre de gravité de l'ensemble flou  $B^k$ , l'équation ci-dessus est facile à utiliser. Cependant, son inconvénient réside dans le fait qu'elle n'utilise pas la forme entière de la fonction d'appartenance.

Elle n'utilise que le centre  $x^k$  du support de la fonction d'appartenance de la conclusion, et ceci sans tenir compte du fait que la fonction d'appartenance soit étroite ou large [25].

Cette méthode est surtout utilisée quand les fonctions d'appartenance de la variable de sortie sont des singletons [27].

### II.2.10 Variables linguistiques

L'ensemble de référence d'un mot du langage naturel s'appelle l'univers du discours. L'univers du discours d'un mot est un ensemble de termes qui évoquent le même concept mais à degrés différents. Il peut être fini ou non.

Une variable linguistique représente un état dans le système à régler. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que :

$$\{x, T(x), U, G, M\}$$

Où :

$x$  : est le nom de la variable,

$T(x)$  : est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre  $x$ ,

$U$  : est l'univers du discours associé avec la valeur de base,

$G$  : est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de  $x$ ,

$M$  : est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique [21]

#### Exemple

La variable linguistique  $x =$  température ambiante, peut être définie avec un ensemble des termes :

$T(x) = \{\text{extrêmement froide, très froide, froide, chaude, très chaude, extrêmement chaude}\}$ , qui forment son univers du discours  $U = [-200C, 400C]$ . La variable de base est la température. Le terme froid représente une valeur linguistique. On peut l'interpréter, par exemple comme « les températures plus petites que 150 c » [23].

### II.2.11 Avantages et inconvénients de réglage par logique floue

#### a. Avantages

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages. Les avantages essentiels sont :

- ❖ La non-nécessité d'une modélisation (cependant, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable) ;
- ❖ La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- ❖ La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser) ;
- ❖ L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non-linéaire) ;
- ❖ Deux solutions sont possibles : solution par logiciels (par microprocesseur) ou solution matérielle (par fuzzy processeurs) [26].

#### b. Inconvénients

- ❖ Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification) ;
- ❖ L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile) ;
- ❖ L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable) ;
- ❖ La possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non-linéaire ;
- ❖ La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible) [26].

### II.3 Conclusion

Dans cette partie de recherche, on conclure le principe de base et les concepts fondamentaux de la logique floue, à partir d'une brève historique, la comparaison entre lui et la logique classique puis la commande et les sous-ensembles flous, on va résoudre notre problème à l'aide de la logique floue pour obtenir des bonnes précisions avec une moindre valeur d'erreurs totales.

## **Chapitre III**

# **Résultats et Discussions**

### III.1 Introduction

Parmi les applications d'optimisation numérique réseaux neurones, algorithmes génétique et la logique floue ...etc. Nous proposons la logique floue permet de prendre en compte toutes sortes de connaissances qualitatives de concepteurs et d'opérateurs dans l'automatisation des systèmes.

Dans ce chapitre, nous proposons d'utiliser un modèle floue basé sur la méthode de Mamdani ; afin d'estimer la dureté des couches minces déposées dans des différentes conditions de travail (Temps de bombardement ionique, Pression de travail, Pression de la chambre, Température de sous couche, La rugosité et La géométrie des pièces revêtues).

### III.2 Données expérimentales

Pour estimer la dureté des couches minces déposées, nous proposons d'utilisée la méthode de simulation qui se base sur la théorie du logique floue (Mamdani) avec le logiciel MATLAB, en se basant sur les données expérimentales regroupés dans le tableau : III.1 obtenues depuis la référence [28].

**Tableau III.1** : Données expérimentales pour les couches minces de TiN [28].

<b>Essais</b>	<b>T (s)</b>	<b>PW (MPa)</b>	<b>PC (MPa)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Ra</b>	<b>G</b>	<b>H (HV)</b>
1	20	0.056	0.03	300	0	1	470
2	20	0.056	0.03	290	0	1	450
3	17.5	0.046	0.025	280	0	1	435
4	15	0.036	0.02	270	0	1	420
5	20	0.056	0.03	260	0	1	435
6	17.5	0.046	0.025	250	0	1	420
7	15	0.036	0.02	240	0	1	405
8	20	0.056	0.03	230	0	1	420
9	17.5	0.046	0.025	220	0	1	405
10	15	0.036	0.02	210	0	1	390
11	20	0.056	0.03	200	0	1	405
12	17.5	0.046	0.025	190	0	1	390
13	15	0.036	0.02	180	0	1	375
14	20	0.056	0.03	170	0	1	390

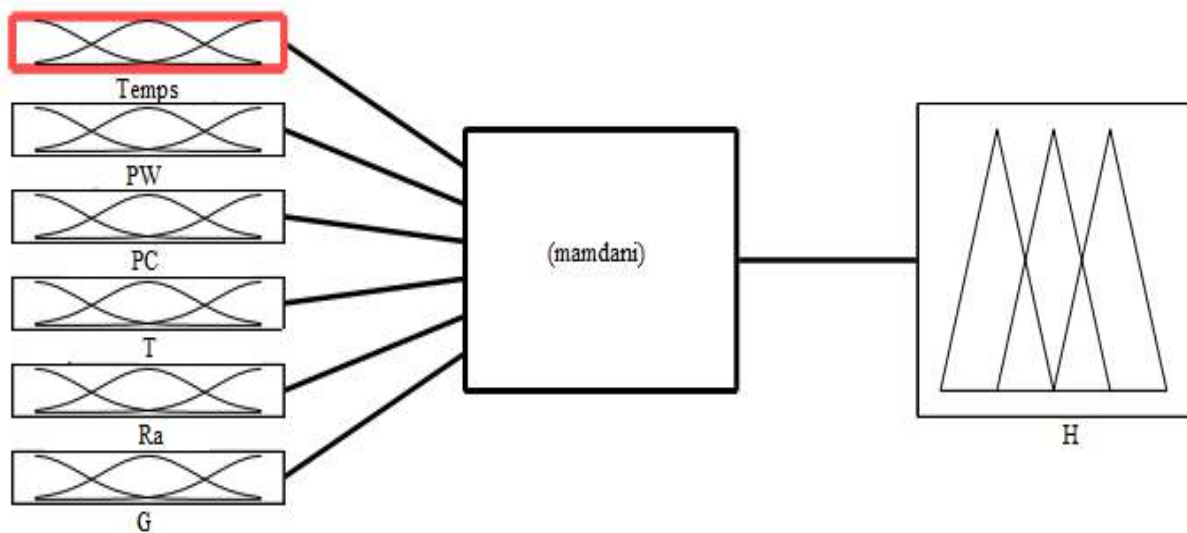
15	17.5	0.046	0.025	160	0	1	375
16	15	0.036	0.02	150	0	1	360
17	20	0.056	0.03	300	1	1	740
18	20	0.056	0.03	290	1	1	720
19	17.5	0.046	0.025	280	1	1	705
20	15	0.036	0.02	270	1	1	690
21	20	0.056	0.03	260	1	1	705
22	17.5	0.046	0.025	250	1	1	690
23	15	0.036	0.02	240	1	1	675
24	20	0.056	0.03	230	1	1	690
25	17.5	0.046	0.025	220	1	1	675
26	15	0.036	0.02	210	1	1	660
27	20	0.056	0.03	200	1	1	675
28	17.5	0.046	0.025	190	1	1	660
29	15	0.036	0.02	180	1	1	645
30	20	0.056	0.03	170	1	1	660
31	17.5	0.046	0.025	160	1	1	645
32	15	0.036	0.02	150	1	1	630
33	20	0.056	0.03	300	0	2	565
34	20	0.056	0.03	290	0	2	545
35	17.5	0.046	0.025	280	0	2	530
36	15	0.036	0.02	270	0	2	515
37	20	0.056	0.03	260	0	2	530
38	17.5	0.046	0.025	250	0	2	515
39	15	0.036	0.02	240	0	2	500
40	20	0.056	0.03	230	0	2	515
41	17.5	0.046	0.025	220	0	2	500
42	15	0.036	0.02	210	0	2	485
43	20	0.056	0.03	200	0	2	500
44	17.5	0.046	0.025	190	0	2	485
45	15	0.036	0.02	180	0	2	470
46	20	0.056	0.03	170	0	2	485
47	17.5	0.046	0.025	160	0	2	470

48	15	0.036	0.02	150	0	2	455
49	20	0.056	0.03	300	1	2	770
50	20	0.056	0.03	290	1	2	750
51	17.5	0.046	0.025	280	1	2	735
52	15	0.036	0.02	270	1	2	710
53	20	0.056	0.03	260	1	2	735
54	17.5	0.046	0.025	250	1	2	710
55	15	0.036	0.02	240	1	2	695
56	20	0.056	0.03	230	1	2	710
57	17.5	0.046	0.025	220	1	2	695
58	15	0.036	0.02	210	1	2	680
59	20	0.056	0.03	200	1	2	695
60	17.5	0.046	0.025	190	1	2	680
61	15	0.036	0.02	180	1	2	665
62	20	0.056	0.03	170	1	2	680
63	17.5	0.046	0.025	160	1	2	665
64	15	0.036	0.02	150	1	2	650

### III.2.1 Système flou

Dans ce système nous avons choisi, un système d'inférence flous de type Mamdani pour les couches minces de TiN déposées.

Nous utilisons un système flou avec six (06) entrées : le temps de bombardement ionique (T), la pression de travail (PW), la pression de la chambre (PC), la température de sous-couche (T), la rugosité de sous-couche (Ra), la géométrie des pièces revêtues (G) et une variable de sortie : la dureté des couches minces déposées (H).



**Figure III.1** Système flou pour les couches minces de TiN.

### III.2.2 Modélisation floue

#### a. Les variables floues

Dans la construction de notre modèle nous avons choisi comme paramètres d'entrée : le temps de bombardement ionique, la pression de travail, la pression de la chambre, la température de sous-couche, la rugosité de sous-couche, la géométrie des pièces revêtues et comme variables de sortie nous avons choisi la dureté de la couche mince.

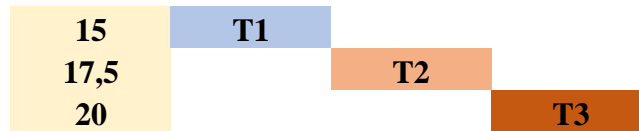
**Tableau III.2 :** Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou des couches minces de TiN déposées.

	Valeur Mini	Valeur Max
<b>Les paramètres d'entrée</b>		
Le temps de bombardement ionique (s)	15	20
La pression de travail (MPa)	0,036	0,056
La pression de la chambre (MPa)	0,02	0,03
La température de sous-couche (°C)	150	300
La rugosité	0	1
La géométrie des pièces revêtues	1	2
<b>Les paramètres de sortie</b>		
La dureté de la couche mince (HV)	360	770



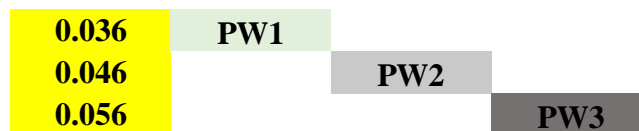
L'ensemble des variables utilisés dans notre étude sont découpée en catégories appelés variables linguistiques. Chaque variable linguistique correspond à un intervalle de donnée numérique.

Les variables linguistiques pour la première variable (le temps de bombardement ionique) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.2).



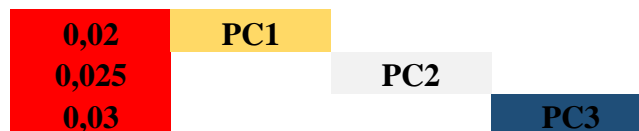
**Figure III.2** Variables linguistiques pour le temps de bombardement ionique.

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (la pression de travail) sont présentées comme il est indiqué dans la figure (III.3).



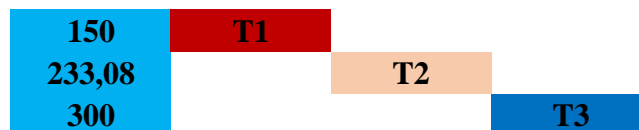
**Figure III.3** Variables linguistiques pour la pression de travail.

Les variables linguistiques pour la troisième variable (la pression de la chambre) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.4).



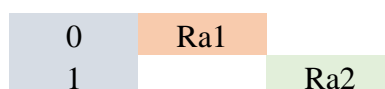
**Figure III.4** Variables linguistiques pour la pression de la chambre.

Les variables linguistiques pour la quatrième variable (la température de sous-couche) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.5).



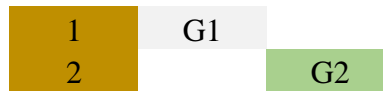
**Figure III.5** Variables linguistiques pour la température de sous-couche.

Les variables linguistiques pour la cinquième variable (la rugosité) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.6).



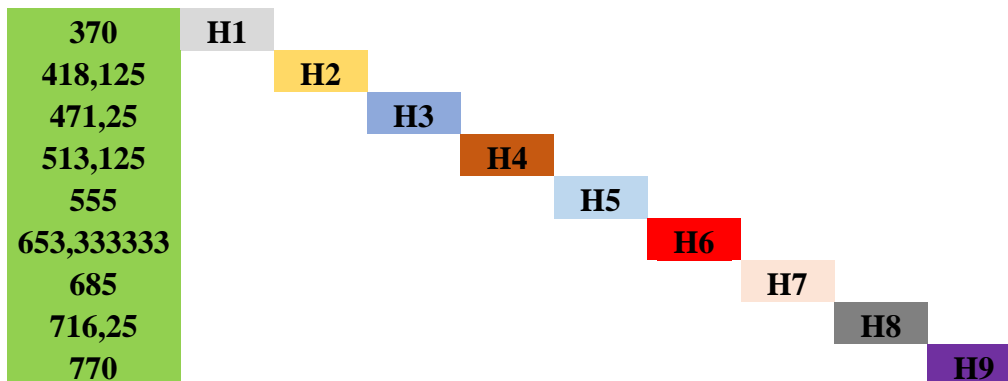
**Figure III.6** Variables linguistiques pour la rugosité.

Les variables linguistiques pour la sixième variable (la géométrie des pièces) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.7).



**Figure III.7** Variables linguistiques pour la géométrie des pièces revêtues.

Les variables linguistiques pour la sortie (la dureté des couches minces) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.8).



**Figure III.8** Variables linguistiques pour la dureté des couches minces.

#### b. Les sous-ensembles flous

Les sous-ensembles flous (ou parties floues) ont été introduits afin de modéliser la représentation humaine des connaissances, et ainsi améliorer les performances des systèmes de décision qui utilisent cette modélisation.

Les sous-ensembles flous sont utilisés soit pour modéliser l'incertitude et l'imprécision, soit pour représenter des informations précises sous forme lexicale assimilable par un système expert.

Un ensemble flou est défini à sa fonction d'appartenance, qui correspond à la notation de fonction caractéristique.

Les fonctions d'appartenance se présentent sous différentes formes, y compris triangulaire et trapézoïdale. Dans la présente étude, les fonctions d'appartenance triangulaire, trapézoïdale ont été utilisées pour les paramètres d'entrée et le paramètre de sortie.

Les fonctions d'appartenance utilisées pour les paramètres d'entrées et sortie sont représentées dans les figures : de III.9, III.10

➤ Utilisation des fonctions d'appartenance triangulaires

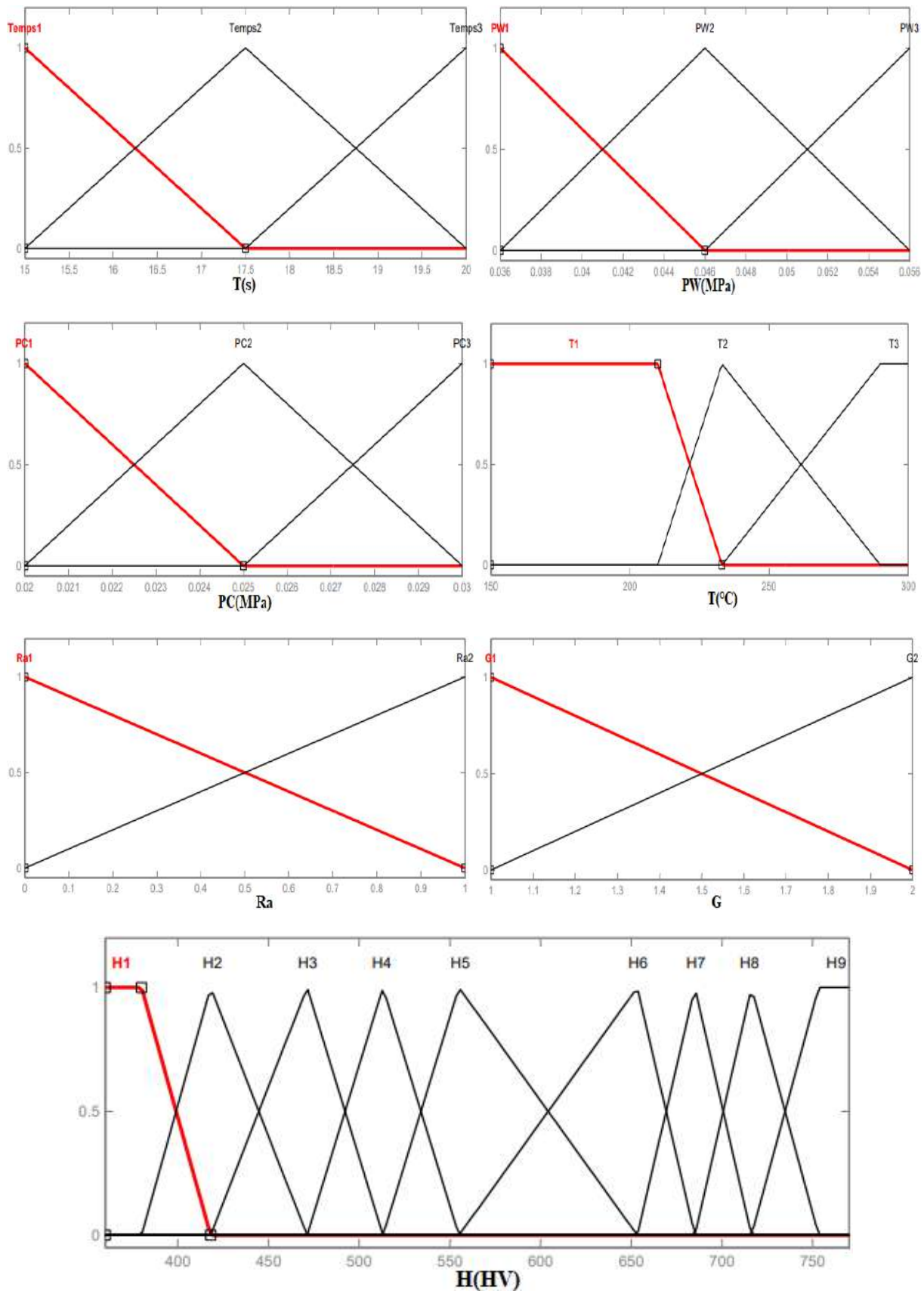


Figure III.9 Les fonctions d'appartenance triangulaires.

➤ Utilisation des fonctions d'appartenance trapézoïdale

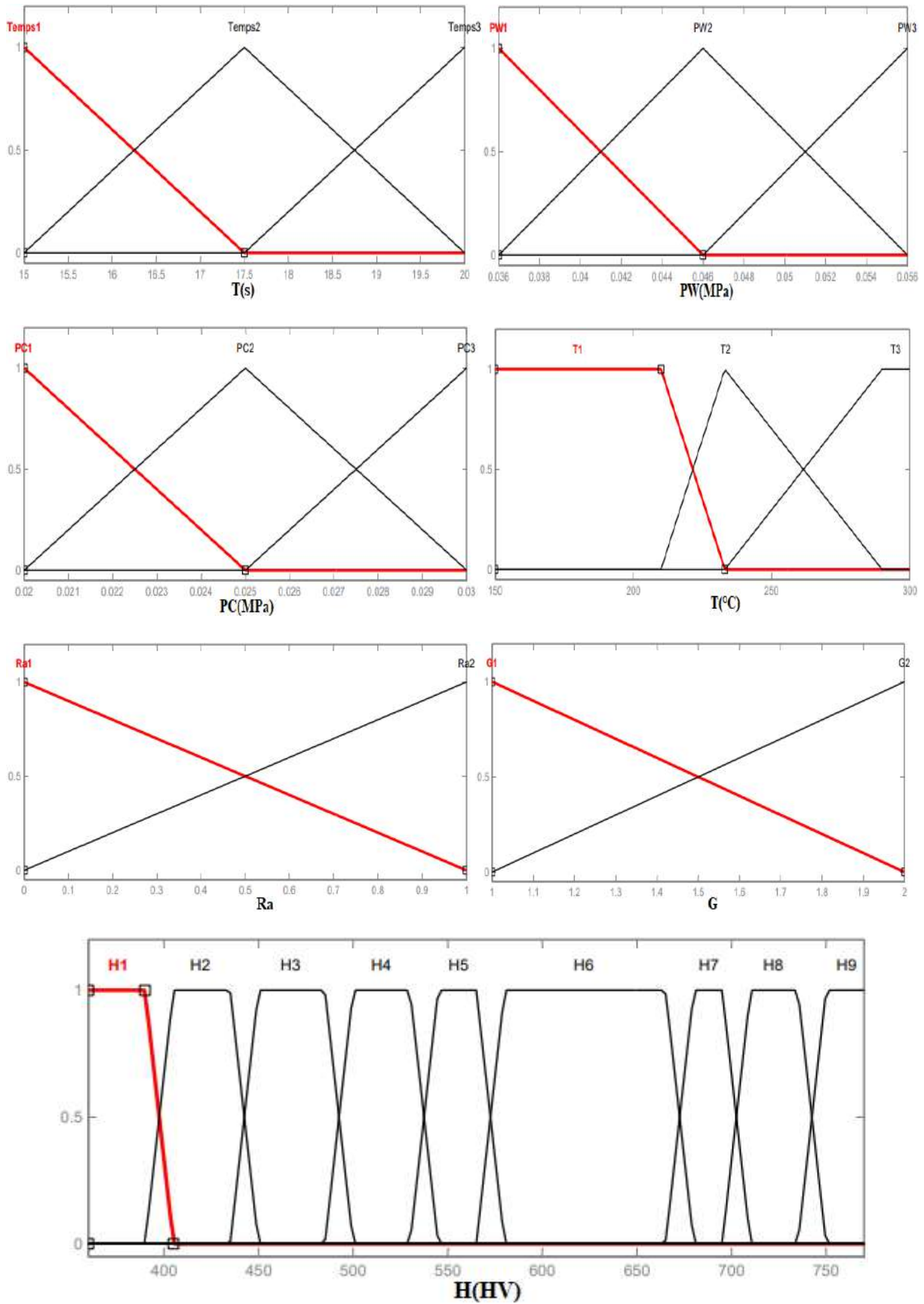


Figure III.10 Les fonctions d'appartenance trapézoïdale.

### III.3 Les règles floues

Soixante-quatre (64) règles floues ont été établies en fonction des conditions expérimentales indiquées dans le tableau : III.1. En adhérant au processus de composition maximum-minimum, la logique floue de ces règles a produit une sortie floue. Chaque règle prend la forme suivante :

**Si**  $T$  est (variable linguistique) et  $PW$  est (variable linguistique) et  $PC$  est (variable linguistique),  $T$  (variable linguistique),  $Ra$  (variable linguistique),  $G$  (variable linguistique) **Alors**  $H$  est (variable linguistique).

L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau III.3

**Tableau III.3 :** Les règles floues pour les couches minces de TiN.

Essai	T (s)	PW (MPa)	PC (MPa)	T (°C)	Ra	G	H (HV)
1	T3	PW3	PC3	T3	Ra1	G1	H3
2	T3	PW3	PC3	T3	Ra1	G1	H3
3	T2	PW2	PC2	T2	Ra1	G1	H2
4	T1	PW1	PC1	T2	Ra1	G1	H2
5	T3	PW3	PC3	T2	Ra1	G1	H2
6	T2	PW2	PC2	T2	Ra1	G1	H2
7	T1	PW1	PC1	T2	Ra1	G1	H2
8	T3	PW3	PC3	T2	Ra1	G1	H2
9	T2	PW2	PC2	T2	Ra1	G1	H2
10	T1	PW1	PC1	T1	Ra1	G1	H1
11	T3	PW3	PC3	T1	Ra1	G1	H2
12	T2	PW2	PC2	T1	Ra1	G1	H1
13	T1	PW1	PC1	T1	Ra1	G1	H1
14	T3	PW3	PC3	T1	Ra1	G1	H1
15	T2	PW2	PC2	T1	Ra1	G1	H1
16	T1	PW1	PC1	T1	Ra1	G1	H1
17	T3	PW3	PC3	T3	Ra2	G1	H9
18	T3	PW3	PC3	T3	Ra2	G1	H8
19	T2	PW2	PC2	T2	Ra2	G1	H8

20	T1	PW1	PC1	T2	Ra2	G1	H7
21	T3	PW3	PC3	T2	Ra2	G1	H8
22	T2	PW2	PC2	T2	Ra2	G1	H7
23	T1	PW1	PC1	T2	Ra2	G1	H7
24	T3	PW3	PC3	T2	Ra2	G1	H7
25	T2	PW2	PC2	T2	Ra2	G1	H7
26	T1	PW1	PC1	T1	Ra2	G1	H6
27	T3	PW3	PC3	T1	Ra2	G1	H7
28	T2	PW2	PC2	T1	Ra2	G1	H6
29	T1	PW1	PC1	T1	Ra2	G1	H6
30	T3	PW3	PC3	T1	Ra2	G1	H6
31	T2	PW2	PC2	T1	Ra2	G1	H6
32	T1	PW1	PC1	T1	Ra2	G1	H6
33	T3	PW3	PC3	T3	Ra1	G2	H5
34	T3	PW3	PC3	T3	Ra1	G2	H5
35	T2	PW2	PC2	T2	Ra1	G2	H4
36	T1	PW1	PC1	T2	Ra1	G2	H4
37	T3	PW3	PC3	T2	Ra1	G2	H4
38	T2	PW2	PC2	T2	Ra1	G2	H4
39	T1	PW1	PC1	T2	Ra1	G2	H4
40	T3	PW3	PC3	T2	Ra1	G2	H4
41	T2	PW2	PC2	T2	Ra1	G2	H4
42	T1	PW1	PC1	T1	Ra1	G2	H3
43	T3	PW3	PC3	T1	Ra1	G2	H4
44	T2	PW2	PC2	T1	Ra1	G2	H3
45	T1	PW1	PC1	T1	Ra1	G2	H3
46	T3	PW3	PC3	T1	Ra1	G2	H3
47	T2	PW2	PC2	T1	Ra1	G2	H3
48	T1	PW1	PC1	T1	Ra1	G2	H3
49	T3	PW3	PC3	T3	Ra2	G2	H9
50	T3	PW3	PC3	T3	Ra2	G2	H9
51	T2	PW2	PC2	T2	Ra2	G2	H8
52	T1	PW1	PC1	T2	Ra2	G2	H8

53	T3	PW3	PC3	T2	Ra2	G2	H8
54	T2	PW2	PC2	T2	Ra2	G2	H8
55	T1	PW1	PC1	T2	Ra2	G2	H7
56	T3	PW3	PC3	T2	Ra2	G2	H8
57	T2	PW2	PC2	T2	Ra2	G2	H7
58	T1	PW1	PC1	T1	Ra2	G2	H7
59	T3	PW3	PC3	T1	Ra2	G2	H7
60	T2	PW2	PC2	T1	Ra2	G2	H7
61	T1	PW1	PC1	T1	Ra2	G2	H6
62	T3	PW3	PC3	T1	Ra2	G2	H7
63	T2	PW2	PC2	T1	Ra2	G2	H6
64	T1	PW1	PC1	T1	Ra2	G2	H6

### III.4 Résultats et Discussions

Les résultats sont obtenus lors de la défuzzification qui est la dernière étape dans la logique floue. Cette étape consiste à transformer la valeur linguistique issue de régulateur flou en valeur numérique.

#### III.4.1 Etude de la précision et de l'erreur du système flou

Les erreurs ont été calculées en mesurant l'écart entre la valeur mesurée et la valeur prédite. Les erreurs peuvent être calculées à l'aide de l'équation III-1. Le pourcentage d'erreurs individuelles a été obtenu en divisant la différence absolue de la prédiction par la valeur de mesure.

$$e_i = \left( \frac{|V_{ex} - V_{P'}|}{V_{ex}} \right) \times 100\% \quad (\text{III.1})$$

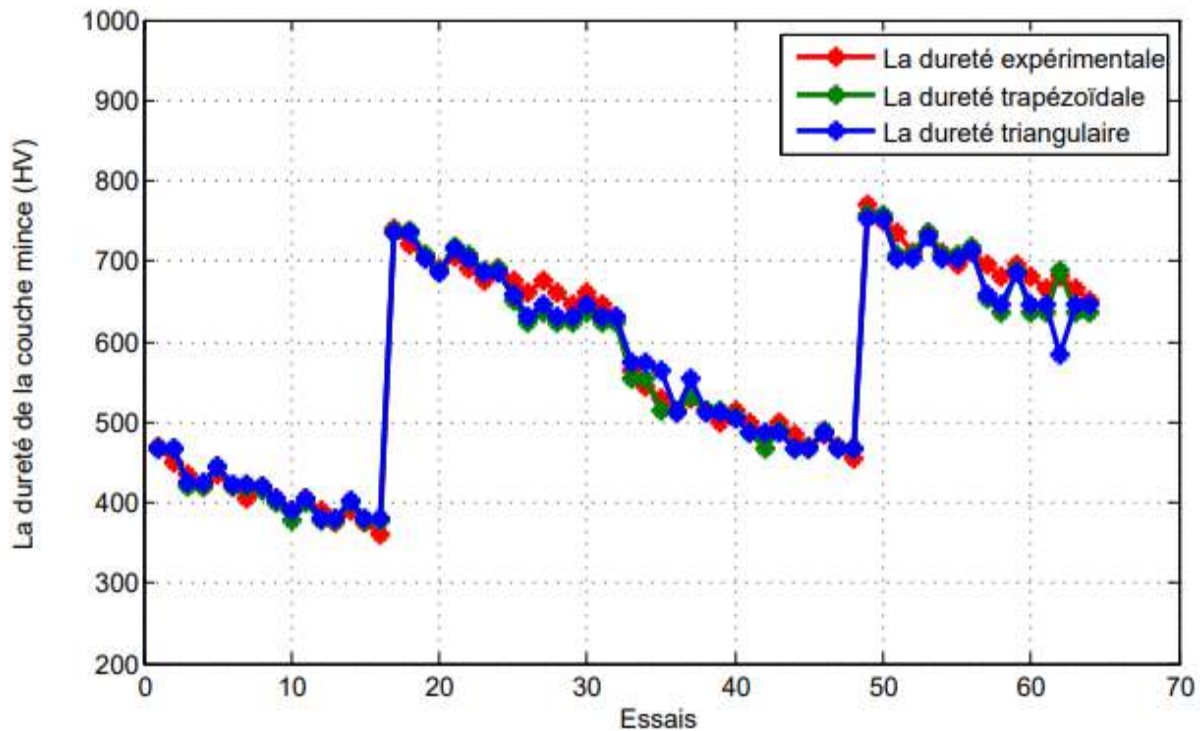
La précision est calculée en trouvant l'approchement de la valeur prédite à la valeur mesurée. Dans l'équation III-2, A est la précision du modèle et N est le nombre total de jeux de données testés. La précision du modèle est la précision individuelle moyenne.

$$A = \frac{1}{N} \sum \left( 1 - \frac{|V_{ex} - V_{P'}|}{V_{ex}} \right) \times 100\% \quad (\text{III.2})$$

### III.4.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance trapézoïdales, triangulaires

La comparaison entre les résultats obtenus en utilisant des fonctions d'appartenance : triangulaire et trapézoïdale nous à permet de choisir le type de fonctions la plus approprié de notre problème.

La figure ci-dessous montre une comparaison directe entre les résultats obtenus avec les deux types de fonctions d'appartenance.



**Figure III.11** Variation de la dureté pour les fonctions d'appartenance : trapézoïdale et triangulaire en fonction des essais.

Donc d'après la comparaison entre ces fonctions, on utilise la relation de la précision (III.2) qui indiquent les différentes précisions suivantes :

- ❖ Pour la fonction Triangulaire :  $A=97.73\%$
- ❖ Pour la fonction Trapézoïdale :  $A=97.75\%$

Donc les résultats les plus proches aux résultats expérimentaux sont ceux obtenues avec des fonctions d'appartenance de type trapézoïdale.

Les résultats que nous les présentons dans le reste du manuscrit, nous les avons acquises à l'aide des fonctions d'appartenance trapézoïdale.



Le tableau III.4 regroupe l'ensemble des résultats obtenus par notre système fluo.

**Tableau III.4 :** Les résultats du système fluo pour les couches minces de TiN.

Essais	Paramètres des couches minces déposées						Résultats de la dureté			
	T (s)	PW (MPa)	PC (MPa)	T (°C)	Ra	G	H <sub>EX</sub> (HV)	H <sub>P</sub> (HV)	Erreur%	Précision
1	20	0.056	0.03	300	0	1	470	467	0,6382979	99,0493814
2	20	0.056	0.03	290	0	1	450	467	3,7777778	97,4968548
3	17.5	0.046	0.025	280	0	1	435	419	3,6781609	95,875327
4	15	0.036	0.02	270	0	1	420	420	0	94,3702983
5	20	0.056	0.03	260	0	1	435	444	2,0689655	92,8077983
6	17.5	0.046	0.025	250	0	1	420	420	0	91,2129707
7	15	0.036	0.02	240	0	1	405	420	3,7037037	89,6504707
8	20	0.056	0.03	230	0	1	420	416	0,952381	88,0301003
9	17.5	0.046	0.025	220	0	1	405	399	1,4814815	86,4824813
10	15	0.036	0.02	210	0	1	390	378	3,0769231	84,9431294
11	20	0.056	0.03	200	0	1	405	400	1,2345679	83,4287063
12	17.5	0.046	0.025	190	0	1	390	378	3,0769231	81,8854965
13	15	0.036	0.02	180	0	1	375	378	0,8	80,3710734
14	20	0.056	0.03	170	0	1	390	400	2,5641026	78,7960734
15	17.5	0.046	0.025	160	0	1	375	378	0,8	77,1935093
16	15	0.036	0.02	150	0	1	360	378	5	75,6185093
17	20	0.056	0.03	300	1	1	740	737	0,4054054	73,9778843
18	20	0.056	0.03	290	1	1	720	737	2,3611111	72,4217187
19	17.5	0.046	0.025	280	1	1	705	707	0,2836879	70,8223264
20	15	0.036	0.02	270	1	1	690	688	0,2898551	69,2553938
21	20	0.056	0.03	260	1	1	705	719	1,9858156	67,6974227
22	17.5	0.046	0.025	250	1	1	690	707	2,4637681	66,1038944
23	15	0.036	0.02	240	1	1	675	688	1,9259259	64,502898
24	20	0.056	0.03	230	1	1	690	690	0	62,9103054
25	17.5	0.046	0.025	220	1	1	675	652	3,4074074	61,3478054
26	15	0.036	0.02	210	1	1	660	623	5,6060606	59,8385461
27	20	0.056	0.03	200	1	1	675	637	5,6296296	58,3636408

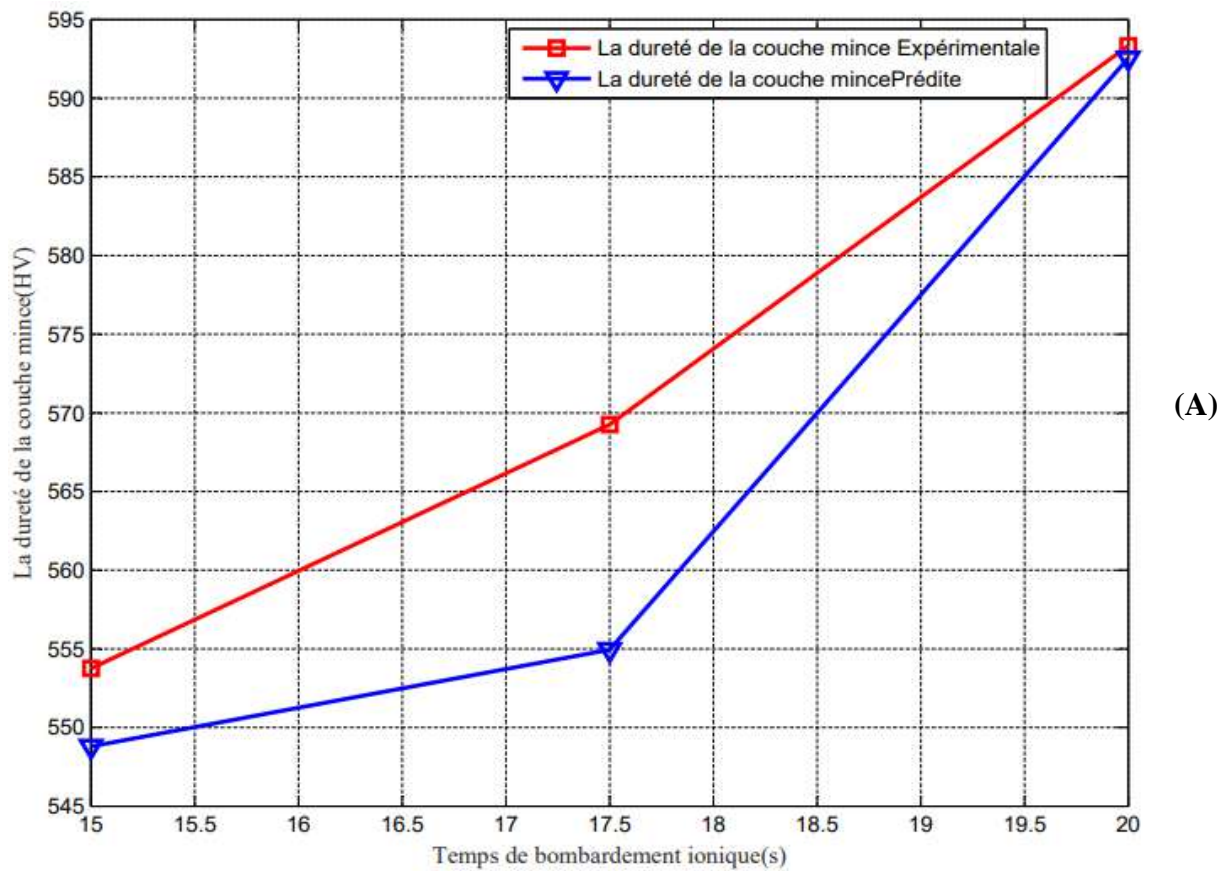
28	17.5	0.046	0.025	190	1	1	660	623	5,6060606	56,8891038
29	15	0.036	0.02	180	1	1	645	623	3,4108527	55,4141985
30	20	0.056	0.03	170	1	1	660	637	3,4848485	53,9049931
31	17.5	0.046	0.025	160	1	1	645	623	3,4108527	52,3969438
32	15	0.036	0.02	150	1	1	630	623	1,1111111	50,8877384
33	20	0.056	0.03	300	0	2	565	555	1,7699115	49,3425995
34	20	0.056	0.03	290	0	2	545	555	1,8348624	47,8077544
35	17.5	0.046	0.025	280	0	2	530	515	2,8301887	46,2165847
36	15	0.036	0.02	270	0	2	515	515	0	44,6983064
37	20	0.056	0.03	260	0	2	530	532	0,3773585	43,1358064
38	17.5	0.046	0.025	250	0	2	515	515	0	41,5674101
39	15	0.036	0.02	240	0	2	500	515	3	40,0049101
40	20	0.056	0.03	230	0	2	515	507	1,5533981	38,3955351
41	17.5	0.046	0.025	220	0	2	500	487	2,6	36,857307
42	15	0.036	0.02	210	0	2	485	467	3,7113402	35,335432
43	20	0.056	0.03	200	0	2	500	490	2	33,8309217
44	17.5	0.046	0.025	190	0	2	485	467	3,7113402	32,2996717
45	15	0.036	0.02	180	0	2	470	467	0,6382979	30,7951614
46	20	0.056	0.03	170	0	2	485	490	1,0309278	29,2426348
47	17.5	0.046	0.025	160	0	2	470	467	0,6382979	27,6640265
48	15	0.036	0.02	150	0	2	455	467	2,6373626	26,1114999
49	20	0.056	0.03	300	1	2	770	757	1,6883117	24,5077911
50	20	0.056	0.03	290	1	2	750	757	0,9333333	22,971671
51	17.5	0.046	0.025	280	1	2	735	707	3,8095238	21,3945877
52	15	0.036	0.02	270	1	2	710	707	0,4225352	19,8916115
53	20	0.056	0.03	260	1	2	735	735	0	18,3357136
54	17.5	0.046	0.025	250	1	2	710	707	0,4225352	16,7732136
55	15	0.036	0.02	240	1	2	695	708	1,8705036	15,2173157
56	20	0.056	0.03	230	1	2	710	718	1,1267606	13,6255891
57	17.5	0.046	0.025	220	1	2	695	654	5,8992806	12,0454834
58	15	0.036	0.02	210	1	2	680	637	6,3235294	10,5751597
59	20	0.056	0.03	200	1	2	695	687	1,1510791	9,11146485
60	17.5	0.046	0.025	190	1	2	680	637	6,3235294	7,56695046

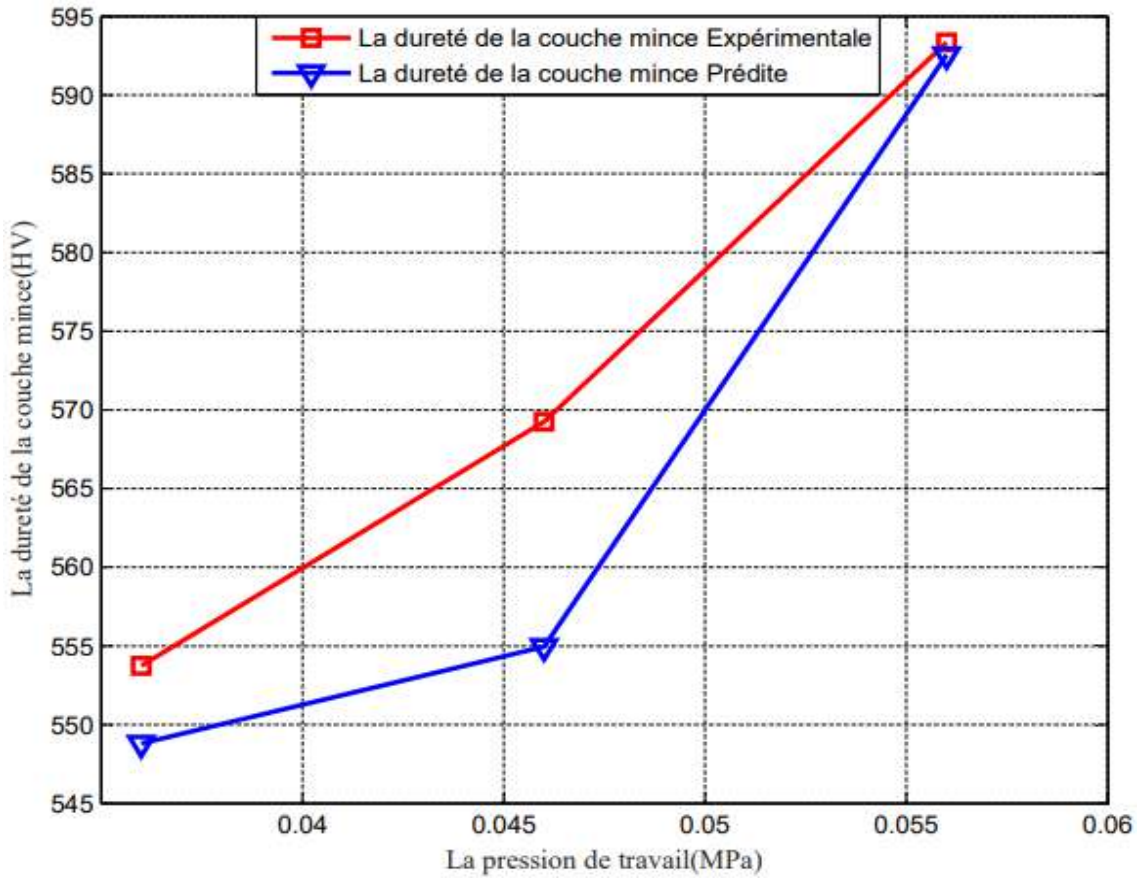
61	15	0.036	0.02	180	1	2	665	637	4,2105263	6,10325561
62	20	0.056	0.03	170	1	2	680	687	1,0294118	4,60654509
63	17.5	0.046	0.025	160	1	2	665	637	4,2105263	3,02796053
64	15	0.036	0.02	150	1	2	650	637	2	1,53125

**La précision = 97.75015079 %**

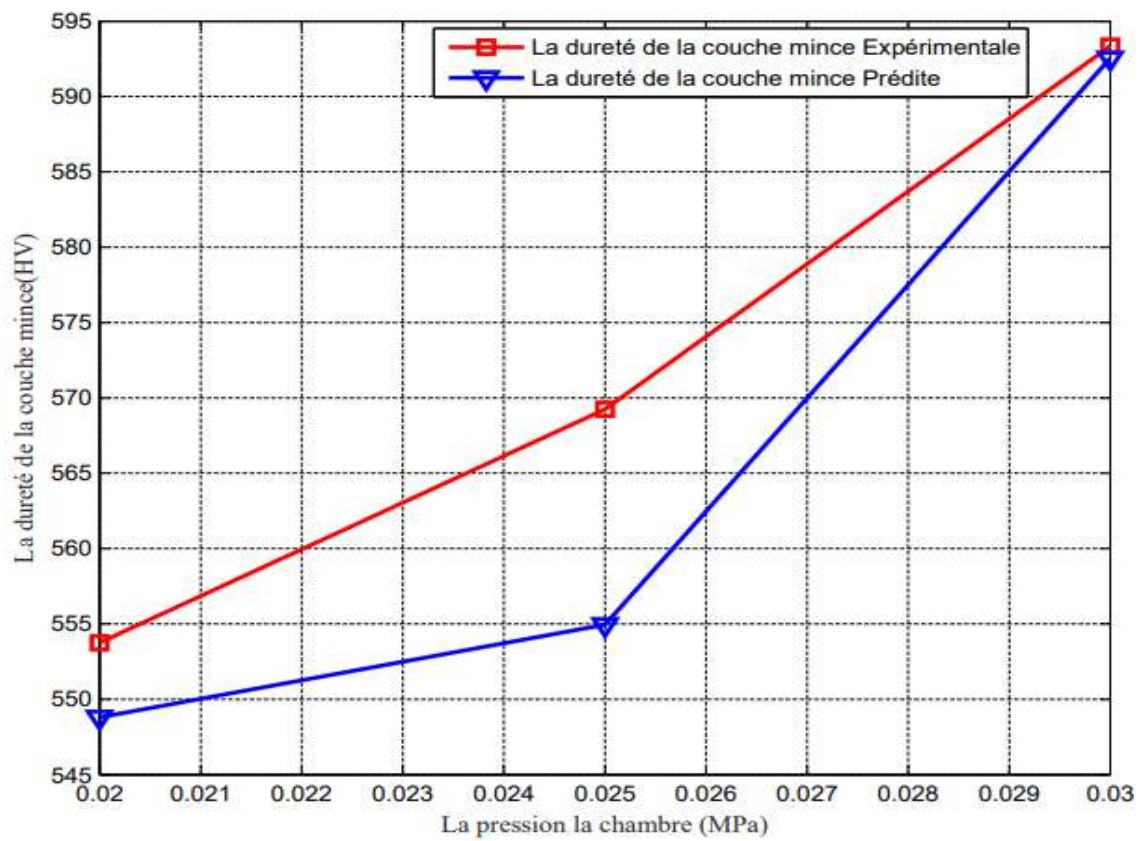
### III.4.3 Représentation schématique des résultats

L'influence des paramètres d'élaboration sur la dureté des couches minces de Ti-N déposées est illustrée dans les graphes de la figure III.12 :

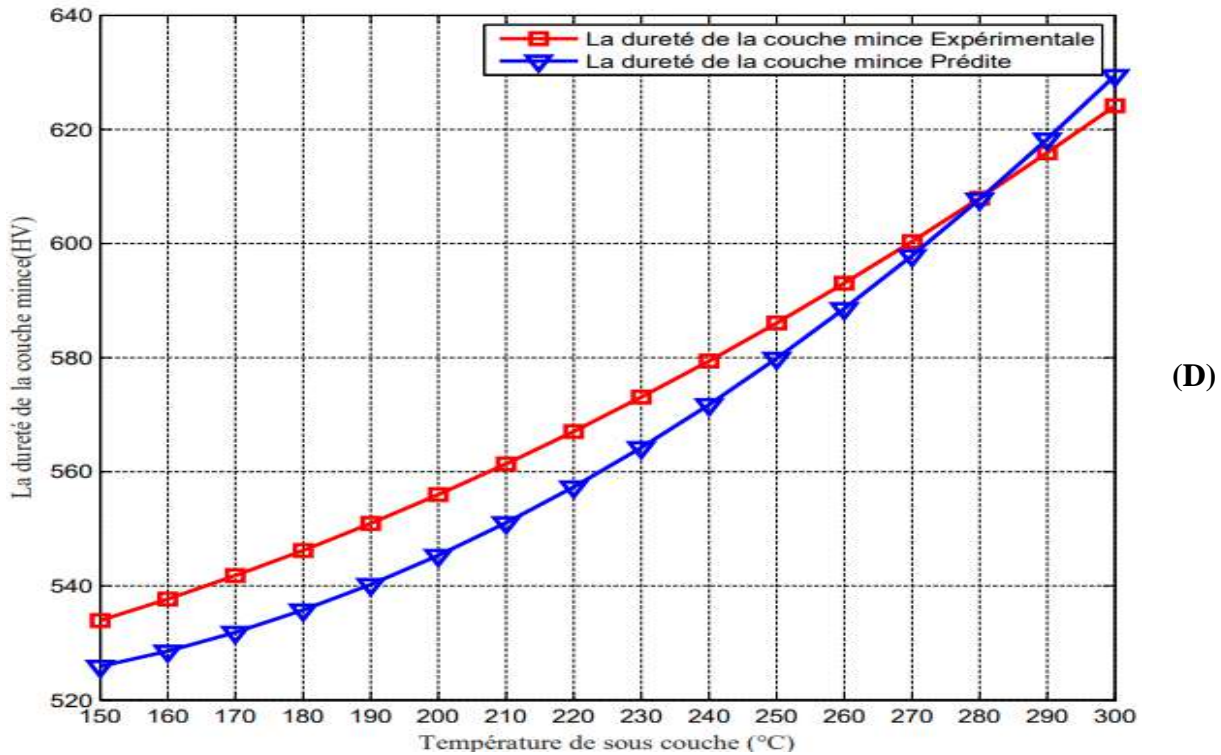




(B)



(C)



**Figure III .12** L'influence des paramètres d'élaboration (A), (B), (C) et (D) sur la dureté des couches minces de TiN déposées.

La figure III.12 représente les fonctions obtenues en utilisant une simulation par logique floue comme suite :

- Le schéma (A) représente la variation de la dureté des couches minces de TiN en fonction du temps de bombardement ionique.
- Le schéma (B) représente la variation de la dureté des couches minces de TiN en fonction de la pression de travail.
- Le schéma (C) représente la variation de la dureté des couches minces de TiN en fonction de la pression de la chambre.
- Le schéma (D) représente la variation de la dureté des couches minces de TiN en fonction de la température de sous-couche.

La figure III.12 illustre l'influence des paramètres d'élaboration sur la dureté des couches minces de TiN déposées.

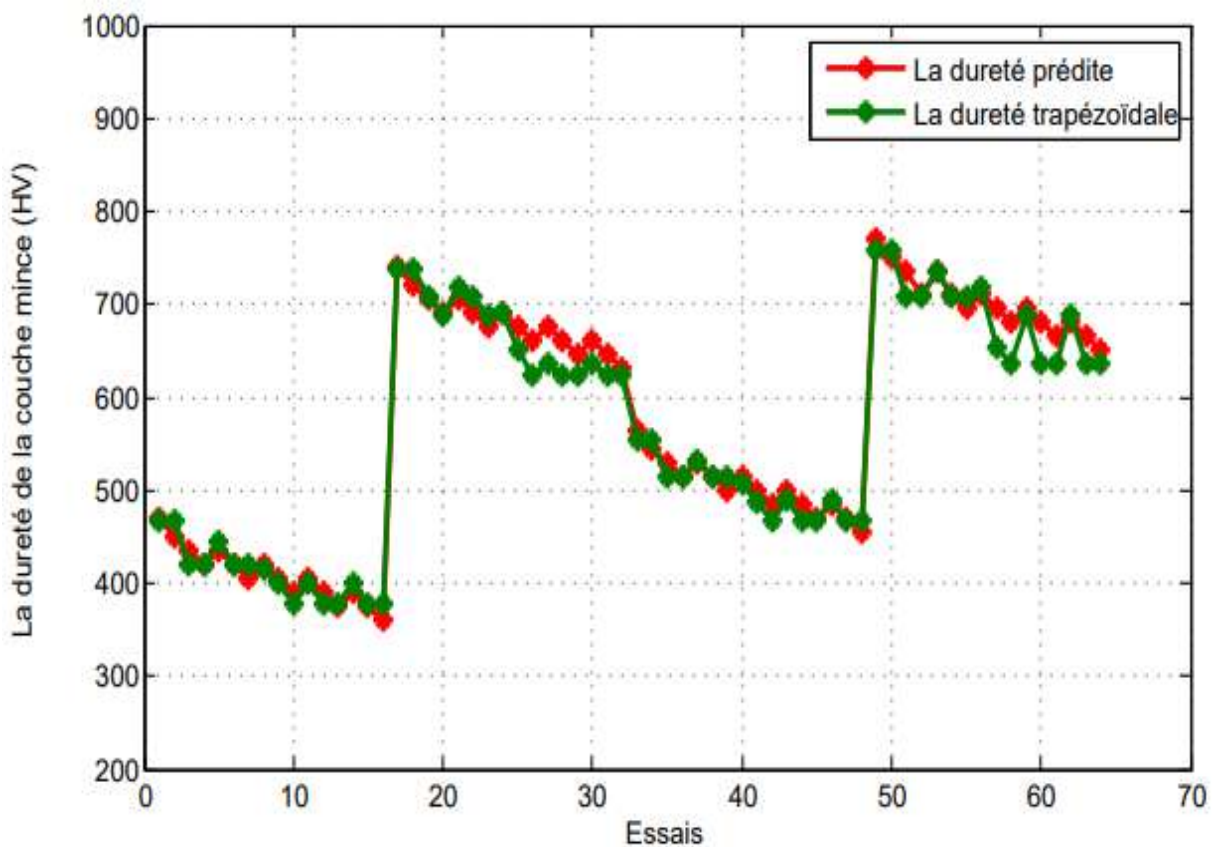
De la figure III.12 (A) (B) (C) et (D) on constate que les valeurs de la dureté deviennent maximales pour des valeurs maximales du temps de bombardement ionique, la pressions de chambre, la pression de travail et la température de sous couche. Donc pour avoir des couches minces dur il faut utiliser les valeurs les plus élevés (dans la mesure de possible) du temps de

bombardement ionique, la pression de chambre, la pression de travail et la température de sous couche.

#### III.4.4 Validation des résultats

Figure (III.13) représente une superposition des deux courbes de changement de la dureté des couches minces : expérimentale et prédite.

Les relations entre les valeurs de simulation et les valeurs expérimentales sont représentés sur la figure (III.13).



**Figure III.13** Les courbes des résultats expérimentaux et de simulation des couches minces de TiN.

La figure III.13 compare la prédiction du modèle de logique floue avec les résultats de la dureté des couches minces de TiN déposées obtenus expérimentalement. La figure III.13 montre que le modèle proposé est capable de prédire avec précision la dureté des couches minces de TiN déposées. La concordance entre les valeurs prédites et expérimentales indique que le modèle de logique floue est une solution efficace qui peut être utilisée pour estimer la dureté des couches minces de TiN déposées pour une plage spécifique de paramètres.

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons optimisés les paramètres d'entrée (Temps de bombardement ionique, Pression de chambre, la Pression de travail, la Rugosité et la Géométrie des pièces revêtues) pour estimer la dureté des couches minces.

Donc d'après ce chapitre on doit conclure que les courbes sont similaires, de sorte que notre modèle de prédiction basé sur la logique floue fonctionne bien et avec une grande précision, A plus de 97% et qui peut être utilisé comme solution pour estimer la dureté des couches minces pour une plage spécifique de paramètres.

# **Conclusion Générale**



## Conclusion Générale

L'utilisation de la logique floue pour estimer la dureté maximale des couches minces de nitrure de titane a été étudiée. Le modèle d'inférence floue est appliquée pour améliorer les paramètres d'élaboration dans des couches minces de TiN. Ensuite, les résultats obtenus en utilisant le tableau III.3 ont été prouvés par une étude comparative avec des résultats expérimentaux. Les résultats peuvent être déduits comme suit :

- Les résultats prédits sont en bon accord avec les données expérimentales qui illustrent la capacité de modèle floue proposé en tant qu'outil pour une estimation précise de la dureté des couches minces.
- Le revêtement en couche mince joue un rôle de premier plan dans la fabrication de nombreux appareils industriels. Le revêtement peut augmenter les performances du matériau en raison du processus de dépôt.
- Les valeurs maximales de la dureté des couches minces sont obtenues pour des valeurs maximales du temps de bombardement ionique, la pression de travail, la pression de la chambre et la température de sous-couche.
- Les valeurs prédites sont en accord avec la dureté réelle avec un pourcentage d'erreur moyen de 2,25% et sont bien associées avec les valeurs expérimentales.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1]. **N. Nedjar**, Dépôt et caractérisation de nitrure de titane, mémoire de Master, université de Boumerdès, 2018.
- [2]. **O. Daranféd**, Elaboration et caractérisation de couches absorbantes des cellules solaires en couches minces à base de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ , thèse de Doctorat, université de Constantine 1, 2013.
- [3]. **N. Bouhssira**, Elaboration et caractérisation des couches minces d'Oxyde de zinc par évaporation, mémoire de Magister, université de Constantine, 2005.
- [4]. **K. Kamli**, Elaboration et caractérisations physico chimique des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique Effet des sources d'étain, mémoire de Magister, université de Biskra, 2013.
- [5]. **K. Bouchouareb**, Elaboration et caractérisation des couches minces  $\text{CuInS}_2$ , Mémoire de Magister, université d'Oran, 2015.
- [6]. **J. VALERO**, Elaboration du carbure et du nitrure de titane par des procédés chimiques et physiques en phase vapeur caractérisation de la microstructure, thèse de Doctorat, université de Bordeaux 1, 2002.
- [7]. **H. Tassoult**, Effet des défauts intrinsèques dans les absorbeurs CIGS sur les performances des cellules solaires en couches minces, thèse de Doctorat, université de Sétif 1, 2018.
- [8]. **H. Berkane**, Elaboration et caractérisation de revêtements durs Ti-Al, Ti-Al-N et Al-Cr-N, Mémoire de Magister, université de Constantine.
- [9]. **H. Slimi**, Elaboration et caractérisation de couches minces Co-dopées In, Co, préparées par la pulvérisation cathodique, applications aux cellules photovoltaïques, thèse de Doctorat, université de Sfax, 2019.
- [10]. **A. Mennad**, Les techniques de dépôt de couches minces et leurs applications, Revue des Energies Renouvelables Vol 18 N°4, 713 - 719, université de Tipaza, 2015.
- [11]. **M. Gîrleanu**, Etude de la structure de films minces de nitrure de titane et d'aluminium  $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) et de son rôle sur l'indentation, thèse de Doctorat, université Haute Alsace, 2010.
- [12]. **S. Grosso**, Revêtements architecturés de Ti, TiN et  $\text{TiO}_x$  élaborés par pulvérisation cathodique au défilé sur des fils en acier inoxydable : relation entre la composition chimique, la microstructure et les propriétés d'usage, thèse de Doctorat, université de Grenoble Alpes, 2016.

- [13]. **Fiche technique : B. Taylor**, Préparation métallographique du titane, Metals Handbook, Desk édition, ASM, 1984.
- [14]. <https://www.alphacasting.com/production/titane>.
- [15]. **A. Kanjer**, De l'efficacité des procédés SMAT et de choc laser dans l'amélioration de la tenue à l'oxydation haute température d'alliages de titane, thèse de Doctorat, université de Bourgogne Franche-Comté, 2017.
- [16]. **J. Guillot**, Couches minces d'oxynitride de titane : la réactivité comme moyen original de caractérisation physico - chimique, thèse de Doctorat, université de Bourgogne, 2002.
- [17]. [https://b2b.partcommunity.com/community/knowledge/fr/detail/2681/Nitruure+de+titane#knowledge\\_article](https://b2b.partcommunity.com/community/knowledge/fr/detail/2681/Nitruure+de+titane#knowledge_article).
- [18]. **O. Castillo et al**, Type-2 Fuzzy Logic : Theory and Applications, université d'Alberta, 2007.
- [19]. **F. CHEVRIE, F. GUELY**, Fuzzy logic, Cahier technique no 191.
- [20]. **M. Drif & M. Chikh**, Estimation de l'Irradiation Solaire par la Logique Floue, Rev. Energ. Ren. : Chemss 2000 105-110, 2000.
- [21]. **N. Tkouti**, Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau par la Logique Floue, mémoire de Master, université de Biskra, 2004.
- [22]. [http://docplayer.fr/15372131-11-1-comparaison-la-logique-floue-et\\_logique\\_classique.html](http://docplayer.fr/15372131-11-1-comparaison-la-logique-floue-et_logique_classique.html)
- [23]. **D. Mokeddem**, Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques, thèse de Doctorat, université de Sétif, 2010.
- [24]. **P.-A. Bisgambiglia, E. de Gentili, Pr. P.A. Bisgambiglia, J.F. Santucci**, Méthode de modélisation de systèmes à paramètres imprécis, Université de Corse – CNRS, 2007.
- [25]. **D. Chekima**, Commande d'un Moteur Asynchrone par Logique Floue, mémoire de Master, université d'El-Oued, 2014.
- [26]. **MINH TA CAO**, Commande numérique de machines asynchrones par logique floue, thèse de Doctorat, université de Laval Canada, 1997.
- [27]. **L. Baghli**, Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques, thèse de Doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy-I, 1999.
- [28]. **M. R. S. Yazdi et al**, Optimization of coating variables for hardness of industrial tools by using artificial neural networks, Expert Systemes with Applications, Vol 38 N°10: p. 12116-12127, 2011.

## Résumé

Le revêtement en couche mince joue un rôle prépondérant dans la fabrication de nombreux appareils industriels. Le revêtement peut augmenter les performances du matériau en raison du processus de dépôt. Dans cette étude, nous avons fait une estimation pour la dureté des couches minces de nitrure de titane comme outils industriels de protection en utilisant la logique floue. Les résultats trouvés montrent un bon accord entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites obtenues par la logique floue, le pourcentage d'erreur et la précision étaient 2.25%, 97.75% respectivement.

**Mots clés :** dureté, couche minces, Ti-N, la logique floue.

## Abstract

Thin film coating plays a major role in the manufacture of many industrial devices. The coating can increase the performance of the material due to the deposition process. In this study, we made an estimate for the hardness of thin titanium nitride films as industrial protection tools using fuzzy logic. The results found show a good agreement between the experimental results and the predicted values obtained by the fuzzy logic, the percentage error and the precision were 2.25%, 97.75% respectively.

**Keywords:** hardness, thin film, Ti-N, fuzzy logic.

## المخلص

يلعب طلاء الأغشية الرقيقة دورًا رئيسيًا في تصنيع العديد من الأجهزة الصناعية. يمكن للطلاء أن يزيد من أداء المادة بسبب عملية الترسيب. في هذه الدراسة، قمنا بعمل تقدير لصلابة أغشية نيتريد التيتانيوم الرقيقة كأدوات حماية صناعية باستخدام منطق ضبابي. أظهرت النتائج وجود توافق جيد بين النتائج التجريبية والقيم المتوقعة التي تم الحصول عليها بالمنطق الضبابي، حيث كانت نسبة الخطأ والدقة 2.25%، 97.75% على التوالي.

**الكلمات المفتاحية:** صلابة، طبقة رقيقة، Ti-N، منطق ضبابي.