

**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 : Djerou Houssam-Eddine**

Hamel Khaled

Thème

**Prédiction de l'usure des revêtements Ni-P et Ni-P-W  
électrolytiques dans des conditions lubrifiées.**

Soutenue le : /06/2018

Devant le jury :

KHEIREDDINE Abdelaziz	MAA	Université Kasdi Merbah	Président
REZGUI Imane	MAA	Université Kasdi Merbah	Encadreur
KHALFI Mehdi	MAA	Université Kasdi Merbah	Examineur

Année Universitaires : 2017/2018

## *Remerciement*

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

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

*Nous tiens aussi à remercier : **Mr. A. kheireddine** 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. M. khalfi** 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 tous ce qui nous avons aidé faire aboutir ce travail.*

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

## *Dédicace*

*Pour m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la sagesse pour accomplir ce travail, et surtout pour ça bien vaillance, car sans lui je n'aurai rien pu faire et grâce à lui je suis devenu celle qui je suis aujourd'hui et j'ai eu tous ce que j'ai, alors je dois avant tout*

*Dire « اللهم لك الحمد والشكر », merci ALLAH.*

*Et parce que c'est lui qui nous a dit : « أن اشكر لي ولوالديك », je tiens à Dire merci à maman qui a été toujours présente quand j'avais besoin et À mon cher papa, qui a longtemps attendu pour ce travail.*

*À mes très chers frères, Et à toutes mes amies, Mohamed amine*

*Guendouz , Youcef Hachem , Rami,*

*faras ,Anwar ,Yassin ,Karim ,Abdo ,et à tous qui m'ont aidé*

---

## Table des matières

---

### Introduction générale

---

Introduction générale .....	2
-----------------------------	---

---

### Chapitre I Etude bibliographique

---

I.1 Introduction .....	4
I.2 Les revêtements .....	4
I.3 Objectif des revêtements .....	4
I.4 Les techniques de dépôts métallique par voie humide .....	4
I.4.1 Les dépôts électrolytiques .....	4
I.4.2 Les dépôts par immersion .....	5
I.4.3 Dépôt auto-catalytique (électroless).....	5
a. Mécanisme réactionnels .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
I.5 Principe d'élaboration des dépôts auto-catalytique.....	6
I.6 Différences entre dépôt auto-catalytique et électrodéposition .....	7
I.7 Domaine d'application .....	8
I.8 Les avantages de la méthode de dépôt auto-catalytique.....	8
I.9 Nickelage chimique.....	9
I.9.1 Historique.....	9
I.9.2 Principe de Nickelage chimique .....	9
I.10 Mécanismes réactionnels de formation des dépôts métalliques .....	<b>Erreur !</b>
<b>Signet non défini.</b>	
I.10.1 Transport de Masse .....	10
a. Migration.....	11
b. Convection .....	11
c. Diffusion .....	11

I.10.2	Transfert de charges et intégration au réseau cristallin.....	11
a.	Anciennes théories .....	11
b.	Théories actuelles.....	11
I.11	Facteurs et paramètres des revêtements composites.....	11
I.11.1	Température .....	11
I.11.2	Agitation de l'électrolyse.....	12
I.11.3	pH du bain.....	12
I.11.4	La densité de courant .....	12
I.11.5	Conductibilité de l'électrolyte .....	12
I.11.6	Nature de l'électrolyte .....	12
I.11.7	Concentration de l'électrolyte.....	13
I.11.8	Métal de base .....	13
I.12	Les revêtements composites Ni-P et Ni-P-W .....	13
I.12.1	Les revêtements composites Ni-P.....	13
a.	Histoire du revêtement composite Ni-P électrolytique .....	13
I.12.2	Processus de revêtement de Ni-P.....	14
a.	Nickelage chimique `a partir de l'hypophosphite .....	14
I.12.3	Propriétés mécaniques des revêtements Ni-P .....	15
a.	Structure et microstructure.....	15
b.	Influence de la teneur en phosphore pour les dépôts non traités .....	16
I.12.4	Utilisation des revêtements composites Ni-P .....	17
I.12.5	Les revêtements composites Ni-P-W.....	17
a.	Processus de revêtement de Ni-P-W .....	17
b.	Propriétés des revêtements Ni-P-W .....	18
I.13	Propriétés tribologique des dépôts.....	19
I.13.1	Mesure expérimentale de l'usure des revêtements .....	20
I.13.2	Dispositifs .....	20
I.14	Conclusion.....	21

---

## Chapitre II Logique Floue

---

II.1	Introduction .....	22
II.2	La logique floue .....	22
II.2.1	Principe de la logique floue .....	22
II.2.2	L'utilisation de la logique floue .....	22
II.2.3	La logique classique et la logique floue .....	23
II.2.4	Variables linguistiques .....	23
II.2.5	Les sous Des Ensembles Flous .....	24
a.	Support .....	24
b.	Hauteur .....	24
c.	Noyau .....	24
d.	Inclusion .....	25
II.2.6	Fonction d'appartenance .....	25
a.	Fonction triangulaire .....	25
b.	Fonction trapézoïdale .....	25
c.	Fonction gaussienne .....	25
d.	Fonction sigmoïde .....	25
II.2.7	Les Opérateurs en Logique flous .....	26
a.	L'opérateur NON .....	26
b.	L'opérateur ET .....	26
c.	L'opérateur OU .....	26
II.2.8	Structure d'un système de commande floue .....	27
d.	Fuzzification .....	27
e.	Mécanisme d'inférence floue .....	28
f.	Défuzzification .....	29
II.3	Conclusion .....	30

---

## Chapitre III

---

---

## Résultats et Discussions

---

III.1	Introduction .....	31
III.2	Données expérimentales .....	31
III.2.1	Système flou .....	34
a.	Composite Ni-P .....	34
b.	Composite Ni-P-W .....	34
III.2.2	Modélisation floue .....	35
a.	Les variables flous .....	35
b.	Les sous-ensembles flous .....	39
III.3	Les règles floues .....	43
a.	Pour le composite Ni-P .....	43
b.	Pour le composite Ni-P-W .....	44
III.4	Résultats et discussion .....	45
III.4.1	Etude de la précision et de l'erreur du système flou .....	45
III.4.2	Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance trapézoïdales, triangulaires et gaussienne .....	46
a.	Pour Composite Ni-P .....	46
b.	Pour Composite Ni-P-W (sec) .....	47
c.	Pour Composite Ni-P-W (Lubrifie) .....	47
a.	Pour Composite Ni-P .....	48
b.	Pour Composite Ni-P-W .....	49
III.4.3	Représentation schématique des résultats .....	52
a.	Pour Composite Ni-P .....	52
b.	Pour Composite Ni-P-W (sec) .....	53
c.	Pour Composite Ni-P-W (lub) .....	54
III.4.4	Validation des résultats .....	54
a.	Composite Ni-P .....	55
b.	Composite Ni-P-W .....	55
III.5	Conclusion .....	57

IV. Conclusion Générale ..... 59



## Liste des Figures

### Chapitre I

#### Étude bibliographique

<b>Figure I.1</b>	dépôt de revêtement sans courant.....	6
<b>Figure I.2</b>	Le principe de dépôts auto-catalytique .....	6
<b>Figure I.3</b>	Equilibre établi au potentiel mixte .....	7
<b>Figure I.4</b>	Interphase métal-solution.....	10
<b>Figure I.5</b>	Influence de la teneur en phosphore du dépôt sur la dureté.....	17
<b>Figure I.6</b>	Dessin d'ensemble du tribomètre.....	20
<b>Figure I.7</b>	Configuration pion-disque.....	20
<b>Figure I.8</b>	Échantillons pour la configuration pion-disque.....	21

### Chapitre II

#### La logique floue

<b>Figure II.1</b>	Les sous-ensembles flous et les variables linguistiques .....	23
<b>Figure II.2</b>	Variable linguistique (V, X, Tv) décrivant le dimensionnement d'un pilier en mètre.....	24
<b>Figure II.3</b>	Formes usuelles des fonctions d'appartenance.....	26
<b>Figure II.4</b>	Opérateurs logiques : (a) $A \in B$ ; (b) $A \cap B$ ; (c) $A \cup B$ ; (d) $\bar{A}$ .....	26
<b>Figure II.5</b>	Structure de base d'un régulateur flou.....	27
<b>Figure II.6</b>	Défuzzificatoin par center de gravité.....	30

### Chapitre III

#### Résultats et Discussions

<b>Figure III.1</b>	Système floue (Ni-P) : la profondeur d'usure.....	34
<b>Figure III.2</b>	Système flou pour le composite (Ni-P-W).....	34
<b>Figure III.3</b>	Variables Linguistiques pour la charge.....	35
<b>Figure III.4</b>	Variables Linguistiques pour la vitesse.....	35
<b>Figure III.5</b>	Variables Linguistiques pour le temps.....	36
<b>Figure III.6</b>	Les valeurs de la profondeur d'usure en ensembles des essais.....	36

<b>Figure III.7</b>	Variables Linguistiques pour la profondeur d'usure.....	36
<b>Figure III.8</b>	Variables Linguistiques pour la charge.....	37
<b>Figure III.9</b>	Variables Linguistiques pour la vitesse.....	37
<b>Figure III.10</b>	Variables Linguistiques pour le temps.....	37
<b>Figure III.11</b>	Les valeurs de la profondeur d'usure (sec) en ensembles des essais	38
<b>Figure III.12</b>	Les valeurs de la profondeur d'usure (lubrifiant) en ensembles des essais.....	38
<b>Figure III.13</b>	Variables Linguistiques pour la profondeur d'usure (sec).....	39
<b>Figure III.14</b>	Variables Linguistiques pour la profondeur d'usure (lubrifiant).....	39
<b>Figure III.15</b>	Les fonctions d'appartenance triangulaires (A), (B), (C).....	41
<b>Figure III.16</b>	Les fonctions d'appartenance trapézoïdale(A), (B), (C).....	42
<b>Figure III.17</b>	Les fonctions d'appartenance Pimf (A), (B), (C).....	43
<b>Figure III.18</b>	Variation de profondeur d'usure (trapézoïdale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essais.....	46
<b>Figure III.19</b>	Variation de profondeur d'usure (sec) (trapézoïdale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essai.....	47
<b>Figure III.20</b>	Variation de profondeur d'usure (l'lubrifie) (trapézoïdale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essais.....	47
<b>Figure III.21</b>	Tracés de surface en trois dimensions montrant la variation de la profondeur d'usure avec (a) la charge et la vitesse (b) la charge et le temps et (c) la vitesse et le temps .....	52
<b>Figure III.22</b>	Tracés de surface montrant la variation de la profondeur d'usure avec (a) la charge en fonction de la vitesse, (b) la charge en fonction du temps et (c) la vitesse en fonction du temps dans des conditions (sèc) .....	53
<b>Figure III.23</b>	Tracés de surface montrant la variation de la profondeur d'usure avec (a) la charge en fonction de la vitesse, (b) la charge en fonction du temps et (c) la vitesse en fonction du temps dans des conditions (lub) .....	54
<b>Figure III.24</b>	les courbes des résultats expérimentaux et de simulation Ni-P	55
<b>Figure III.25</b>	Les courbes des résultats expérimentaux et de simulation Ni-P-W (A) sec et (B) lubrifie.....	56

---

# Liste des tableaux

---

## Chapitre I

### étude bibliographique

<b>Tableaux I.1</b>	Nature des réactions et de leurs sites survenant dans les dépôts chimiques et électrochimiques.....	7
<b>Tableaux I.2</b>	Caractéristiques du nickel pur.....	15
<b>Tableaux I.3</b>	composition du bain chimique et état de fonctionnement.....	18
<b>Tableaux I.4</b>	Propriétés des éléments individuels pour Ni-W-P .....	19

---

## Chapitre III

### Résultats et Discussions

<b>Tableaux III.1</b>	Données expérimentales composite Ni-P.....	32
<b>Tableaux III.2</b>	Données expérimentales composite Ni-P-W.....	33
<b>Tableaux III.3</b>	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite Ni-P.....	35
<b>Tableaux III.4</b>	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite Ni-P-W.....	37
<b>Tableaux III.5</b>	Les règles floues pour le composite (Ni-P) .....	43
<b>Tableaux III.6</b>	Les règles floues pour le composite (Ni-P-W).....	44
<b>Tableaux III.7</b>	Les résultats du système flou pour le composite Ni-P.....	48
<b>Tableaux III.8</b>	Les résultats du système flou pour le composite Ni-P-W (sec).....	50
<b>Tableaux III.9</b>	Les résultats du système flou pour le composite Ni-P-W (lub).....	51

# Nomenclature

Symbole	Unité	Désignation
<i>Ni</i>		Nickel
<i>P</i>		Phosphores
<i>W</i>		Tungstène
<i>Ox</i>		Oxydant
<i>Red</i>		Réducteur
<i>CH</i>	( <i>N</i> )	La charge
<i>V</i>	( <i>tr/min</i> )	Vitesse
<i>T</i>	( <i>min</i> )	Temps
<i>Pr.D</i>	( <i>μm</i> )	Profondeur d'usure
<i>E<sub>0</sub></i>	<i>V</i>	Potentiel standard pris dans la condition standard
<i>E</i>	<i>V</i>	le potentiel moyen
<i>ρ</i>	( <i>g/cm<sup>3</sup></i> )	Masse volumique
<i>S</i>	<i>cm<sup>2</sup></i>	Surface du substrat
<i>E</i>	<i>cm</i>	Epaisseur du revêtement
<i>F</i>	( <i>C/mol</i> )	Constante de Faraday
<i>N</i>		Valence du métal
<i>I</i>	( <i>A</i> )	Courant d'électrolyse
<i>M</i>	( <i>mol</i> )	Masse molaire

# *Introduction Générale*

# Introduction générale

Les traitements de surface réalisés par voie humide représentent aujourd'hui, et pendant longtemps encore sans doute, l'essentiel du marché des traitements et revêtements de surfaces des matériaux métalliques.

La notion de traitement de surface par revêtement est une technique de plus en plus utilisée. Elle consiste à améliorer les propriétés à la surface par dépôt d'un film. Cette couche appelée revêtement, peut être utilisée afin d'augmenter la dureté, d'assurer la protection contre la corrosion ou d'améliorer les propriétés physiques particulières ou, en fin à usage décoratif. [1]

Les procédés de dépôts par voie humide sont tous des procédés nécessitant le trempage de la pièce à traiter dans un bain contenant le matériau à déposer. Ils peuvent requérir le passage d'un courant électrique pour entraîner une réaction d'oxydoréduction : ce sont les traitements électrolytiques, ou sont le fruit de réactions chimiques : ce sont les traitements chimiques. [1]

Le nickelage chimique a fait l'objet de nombreuses recherches et est actuellement très répandu dans l'industrie. En effet, les revêtements à base de nickel chimique (notamment Ni-P) présentent des propriétés paramagnétiques, une excellente résistance à l'usure et à la corrosion et une dureté importante. De plus, d'un point de vue pratique, il est possible d'obtenir des épaisseurs de dépôt régulières indépendamment de la géométrie et de la complexité de la pièce, contrairement aux dépôts électrolytiques. [2]

La logique floue est l'une des méthodes modernes de prédiction des événements scientifiques, inventée par Zadeh en 1965.

Cette technique permet de prédire les résultats expérimentaux sans recourir à de nombreux tests expérimentaux.

Dans cette étude, nous utilisons la logique floue dans l'existence des conditions suivantes (vitesse, temps, la charge) pour prédire la profondeur d'usure.

Le but du travail est de mettre en évidence prédiction de l'usure des revêtements Ni-P et Ni-P-W électrolytiques dans des conditions lubrifiées.

Le mémoire est structuré en trois chapitres, débutés par une introduction générale et clôturé par une conclusion générale et la bibliographie :

Dans le premier chapitre une étude bibliographique concernant les techniques de revêtements a été réalisée d'une façon générale et au dépôt auto-catalytique du nickel.

Dans deuxième chapitre, nous parlons de la théorie de la logique floue et de ses propriétés.

Et le troisième chapitre nous utilisons la théorie de le logique flous pour prédire profondeur d'usure des revêtements électrolytiques (Ni-P et Ni-P-W).

# **Chapitre I**

## **Étude bibliographique**



## **I.1 Introduction**

Les matériaux, comme les humains, doivent être bien protégés de toute attaque extérieure. Les principaux agents d'agression sont l'usure et la corrosion. On a donc pris l'habitude de les soustraire à ce risque par des dépôts de couches dures et /ou protectrices [3].

Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur le procédé du revêtement, des définitions et des informations sur les revêtements Ni-P et Ni-P-W.

## **I.2 Les revêtements**

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 : [3].

- 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. [3].
- les revêtements fonctionnels : ils ont un rôle thermique, optique, électrique, micro-électronique ou magnétique spécifique. [3].

## **I.3 Objectif des revêtements**

- réduction des pressions de contact.
- amélioration de la lubrification.
- abaissement du coefficient de frottement.
- tenue à l'usure par adhésion.
- homogénéisation des couches superficielles.
- valorisation des contraintes résiduelles de compression.
- augmentation de la dureté superficielle pour la tenue à l'usure par abrasion-érosion.
- résistance à l'oxydation.
- piégeage des particules dues à la rugosité [4].

## **I.4 Les techniques de dépôts métallique par voie humide**

### **I.4.1 Les dépôts électrolytiques**

Ce sont des dépôts métalliques réalisés à partir d'une solution contenant les ions du métal déposer ainsi que des agents complexant, des agents tampons ou des additifs organiques

visant à améliorer les qualités (brillance, dureté, adhérence...) du revêtement réalisé . La vitesse de dépôt est directement liée à la densité de courant circulant dans la cellule d'électrolyse dont la pièce à revêtir constitue la cathode, l'anode pouvant être un barreau du métal à déposer (anode soluble), ou un matériau inerte. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de régénérer périodiquement la solution. C'est une méthode couramment utilisée car un grand nombre de matériaux se prêtent bien à l'électrodéposition (Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Sn, Au, Ag, Pd, Pt,...). De plus, cette méthode convient aussi bien au revêtement de petites pièces en vrac qu'au dépôt en continu et à grande vitesse sur des tôles. Par exemple, lors de la galvanisation de l'acier, on atteint des vitesses de dépôt de l'ordre de  $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  sur des tôles se déplaçant dans l'électrolyte à une vitesse supérieure à  $1 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Les inconvénients majeurs de cette méthode sont l'importance de l'état de surface des pièces à revêtir et la nécessité d'avoir parfois recours à des sous couches [1].

#### I.4.2 Les dépôts par immersion

C'est une des méthodes de protection la plus ancienne qui consiste à plonger le métal à recouvrir dans un bain fondu du métal de revêtement. C'est un procédé classique permettant de recouvrir l'acier de zinc (galvanisation). D'autres métaux à bas point de fusion peuvent aussi être déposés par ce procédé tel que l'étain, le plomb, ou l'aluminium. L'épaisseur du dépôt obtenu est en général fonction de la durée d'immersion et la température favorise la création d'une zone d'inter diffusion à l'interface revêtement-substrat assurant ainsi une bonne adhérence [1].

#### I.4.3 Dépôt auto-catalytique (électroless)

La réalisation d'un dépôt chimique consiste à réduire les ions en solution du métal à déposer soit par réaction avec la surface du matériau à recouvrir, soit par réaction avec un autre corps présent dans la solution. Dans le premier cas par exemple on déposera du cuivre sur un substrat d'acier selon la réaction [1].



Le deuxième procédé sert surtout à effectuer un revêtement de nickel à l'aide d'une solution contenant un sel de nickel et de l'hypophosphite de sodium comme agent réducteur selon la réaction. [1]



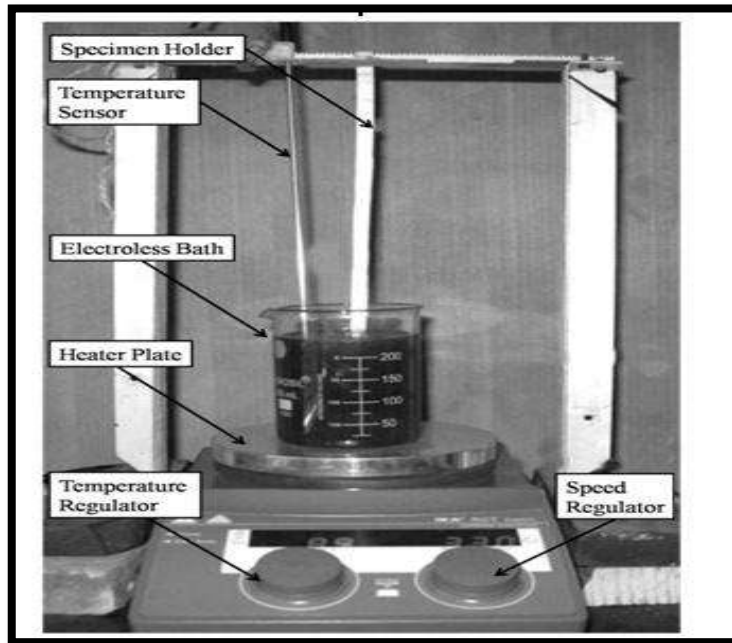


Figure I.1 : dépôt de revêtement sans courant [14]

Dans le cas d'une argenture, on utilise comme agent réducteur le glucose ou le formol. L'avantage de cette méthode de dépôt est que, contrairement à la méthode électrolytique, elle peut s'appliquer à des matériaux non conducteurs comme les polymères. [1]

### I.5 Principe d'élaboration des dépôts auto-catalytique

Ces dépôts constituent la part la plus importante des procédés chimiques. Le principe de cette méthode, représenté sur la figure(I.2), consiste à déposer, sur un substrat catalytique ou rendu préalablement catalytique, un film conducteur par immersion dans un bain chimique. Contrairement au dépôt par déplacement, l'agent réducteur et les cations métalliques se trouvent dans la même solution sans engendrer une réaction de dépôt spontanée [5]. La réduction des ions métalliques en solution est contrôlée et la réaction a lieu uniquement sur les substrats métalliques [5].

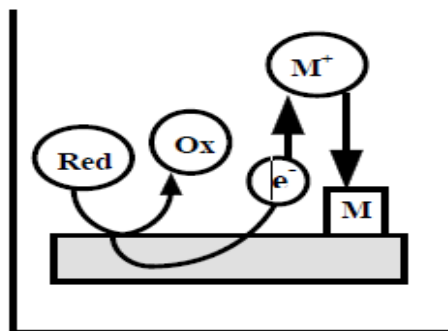


Figure I.2 Le principe de dépôts auto-catalytique. [5]

L'addition d'agents complexant et de stabilisants au bain rend la réaction de réduction thermodynamiquement possible (le potentiel  $U_{\text{Red/Ox}}$  doit être plus négatif que le potentiel d'équilibre du système  $U_{\text{Me}^{n+}/\text{Me}}$ . Ces deux potentiels d'oxydo-réduction sont représentés sur la figure (I.3). L'immersion d'une surface catalytique rompt cette inertie et la réaction de réduction a lieu à la surface catalytique. Si le métal déposé est aussi auto-catalytique, la réaction s'entretient d'elle-même et les dépôts sont dits auto-catalytiques [5].

La méthode « electroless » permet de réaliser des dépôts métalliques à la surface d'un matériau catalytique ou rendu catalytique sans l'apport d'une source de courant électrique extérieure et en utilisant des bains chimiques appropriés [5]. Les électrons sont fournis par une réaction chimique qui s'établit entre deux couples d'oxydo-réduction dont l'un est le couple  $\text{Me}/\text{Me}^{n+}$  et l'autre est celui de l'agent réducteur [5].

L'épaisseur du film formé est alors contrôlée par le temps d'immersion du substrat dans le bain chimique tant que la concentration des réactifs en solution est suffisante et par la température du bain

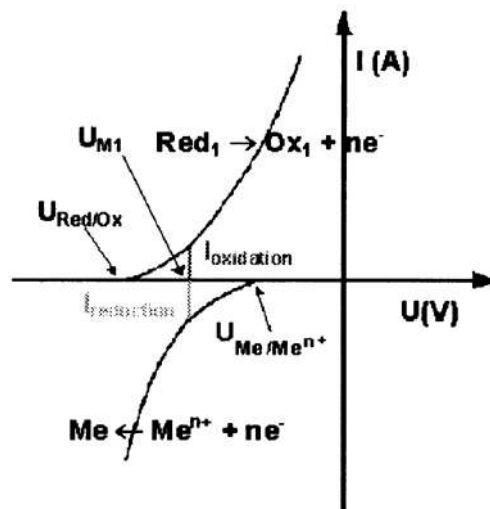


Figure I.3 Equilibre établi au potentiel mixte. [5]

## I.6 Différences entre dépôt auto-catalytique et électrodéposition

Les deux processus diffèrent nettement dans leurs approches de réduction. Dans la méthode électrochimique, la réduction prend lieu en fournissant un courant externe et les sites pour les réactions anodiques et cathodiques sont séparés. Pour le produit chimique méthode de dépôt, électrons requis pour la réduction sont fournis par un agent réducteur et les réactions anodiques / cathodiques sont sur la pièce inséparable. Plus sur ces les réactions se déroulent uniquement sur des surfaces catalytiquement actives, c'est-à-dire, la surface métallique

nouvellement revêtue doit être catalytiquement active assez pour promouvoir les réactions d'oxydoréduction [6].

**Tableau I.1** Nature des réactions et de leurs sites survenant dans les dépôts chimiques et électrochimiques [6]

Propriété	Dépôt électrochimique	Dépôt chimique
Force motrice	Alimentation externe	Agent réducteur [RA] et propriété auto-catalytique du métal déposé
Réaction cathodique	$M^{n+} + ne^{-} \rightarrow M$	$M^{n+} + RA \rightarrow M$
Réaction anodique	$M - ne^{-} \rightarrow M^{n+}$	$RA - ne^{-} \rightarrow [RE]_{forme\ oxydée}$
Réaction globale	$M_{anode} \rightarrow M_{cathode}$	$M^{n+} RA \rightarrow M + [RA]_{forme\ oxydée}$
Site anodique	Anode elle-même	Pièce de travail
Site cathodique	Pièce de travail	Pièce de travail

## I.7 Domaine d'application

Les industries où les pièces ont des formes complexes ou peuvent être soumises à de forts facteurs corrosifs sont des candidats de choix pour le placage auto-catalytique. Ces industries peuvent inclure [7].

- Industrie des services alimentaires: Par exemple, les moules et les pièces de machines de traitement des aliments.
- Industrie pétrolière et gazière: Tout ce qui concerne les vannes, les boules et les bouchons, les barils, les raccords de tuyauterie, etc.
- Industrie automobile: pièces vitales de voiture comme des amortisseurs, des cylindres, des pistons de frein et des vitesses.
- Industrie aérospatiale: Vannes, pistons, pompes, composants de fusée.
- Industrie chimique: Pompes, lames de mélange, échangeurs de chaleur, unités de filtrage, etc.
- Plastiques et textiles: moules, matrices, pièces de machines, filières, extrudeuses et ainsi de suite.

## I.8 Les avantages de la méthode de dépôt auto-catalytique

- Épaisseur de dépôt uniforme quelle que soit la géométrie de la pièce.
- Porosité réduite (offre une résistance supérieure à la corrosion).

- Dureté améliorée.
- soudabilité des alliages à faible teneur en phosphore et en nickel chimique.
- Capacité de créer un stress compressif ou inexistant.
- Absorption réduite d'hydrogène. [8]

## **I.9 Nickelage chimique**

### **I.9.1 Historique**

Les premières contributions concernant la déposition de nickel par voie chimique datent de 1844, quand le français Wurtz obtient un dépôt de nickel à partir d'une solution aqueuse d'hypophosphite de nickel chauffée à 100°C [2].

Par la suite, des avancées dans la connaissance des principes du nickelage chimique furent obtenues par des chercheurs comme Auguste Roux qui, en 1916, déposa un brevet sur un procédé de dépôt métallique ou encore A. Brenner et G. Riddel qui découvrirent qu'en partant d'un dépôt électrolytique de nickel, l'ajout d'hypophosphite de soude accroît le rendement du courant électrique de 100%. Ils mettent ainsi en évidence le fait que le processus de dépôt peut être amorcé en modifiant la surface des métaux non catalytiques par des dépôts de métaux catalytiques, comme le palladium ou le rhodium. Bien que les essais de laboratoire aient donné des résultats satisfaisants, le procédé n'a pas connu de développement industriel du fait des quantités élevées de bains nécessaires [2].

C'est seulement en 1952 que la société American Transportation Corporation est parvenue, en partant des résultats obtenus par Brenner, à faire du nickelage chimique un procédé industriel connu

sous le nom de KANIGEN (Catalytique Nickel Génération). Un peu plus tard, en 1958, un autre procédé de dépôt chimique de nickel est mis au point par Dupont De Nemours aux USA et Bayer en Allemagne. Le dépôt consistant en un alliage nickel-bore est obtenu par réaction d'hydrure de bore avec un sel de nickel [2].

### **I.9.2 Principe de Nickelage chimique**

Le nickelage fait partie des dépôts métalliques réalisés à partir de solutions aqueuses ; ils peuvent être divisés en deux groupes :

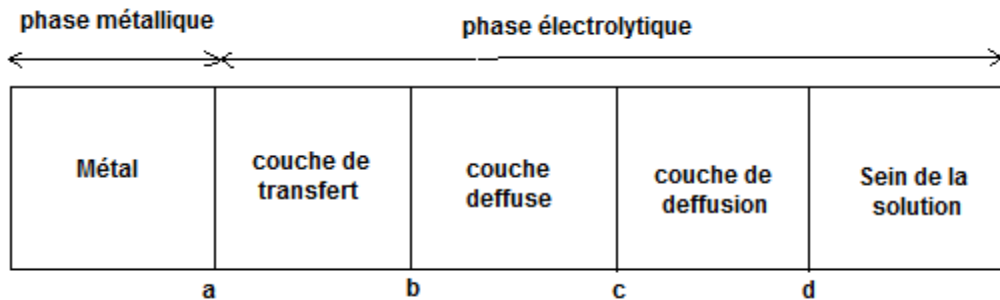
- Les dépôts électrolytiques pour lesquels intervient une source extérieure de courant et où la formation du dépôt est obtenue grâce à la réduction des ions métalliques présents dans la solution, à l'aide d'électrons provenant d'une anode[2].



- Les dépôts chimiques pour lesquels la réduction des ions métalliques est réalisée dans la solution même par réduction électrochimique ou chimique et sans apport de courant [2].

### I.10 Mécanismes réactionnels de formation des dépôts métalliques

La région interface métal - solution peut se représenter selon le schéma suivant : [9].



**Figure I.4** Interface métal- solution. [9].

Dans la zone (ac) ou la double couche, se produisent les phénomènes d'électrode et dans la zone (cd) les phénomènes de diffusion. [9].

- Zone ab : couche de transfert, couche d'adsorption dans laquelle les électrons du métal participent dans la réaction d'électrodes.
- Zone bc : couche diffuse (portion de solution électrolytique).
- Zone cd : couche diffusion ,portion de solution électrolytique dans laquelle les gradients de potentiels électrique et chimique étant légèrement plus faibles que dans la couche diffuse bc, et la densité de charge étant en tout point pratiquement négligeable ou nulle.

Lors d'un dépôt électrolytique, on distingue :

- Le transport de masse : l'apport de l'ion hydraté du sein de la solution jusqu'à l'électrode.
- Le transport de charges et l'intégration au réseau cristallin. [9].

#### I.10.1 Transport de Masse

Le transport de masse peut se faire suivant trois modes : migration, convection et diffusion. [9].

### **a. Migration**

Lorsqu'on applique une différence de potentiel entre deux électrodes placées à une certaine distance, chaque ion est soumis à un champ électrique, ou le déplacement des particules chargées sous l'influence de ce champ s'appelle la migration. Le mouvement des charges est équivalent à un courant I. [9].

### **b. Convection**

La convection peut être forcée si une agitation est créée, elle peut être naturelle en raison des différences de densité et de température qui engendrent un mouvement de la solution le long de l'électrode. En galvanotechnique, on favorise généralement le transport de masse par agitation. [9].

### **c. Diffusion**

La diffusion est due aux modifications de concentration au niveau de l'électrode en raison du passage du courant. Lorsque la vitesse de diffusion est inférieure à la vitesse de la réaction électrochimique, la substance électro active est consommée au fur et à mesure, il en résulte une limitation de l'intensité. [9].

## **I.10.2 Transfert de charges**

### **a. Anciennes théories**

L'ion se décharge sur une imperfection du métal, la réunion d'un certain nombre de ces ions forme un germe de cristallisation sans une structure et à partir de ces germes, élaboration de l'édifice cristallin. [9].

La formation cristalline d'un dépôt cathodique est le résultat de deux phénomènes :

- Formation de germes de cristallisation,
- Grossissement cristallin de ces germes.

### **b. Théories actuelles**

L'ion se décharge en n'importe quel point d'une surface et diffuse vers un point privilégié pour s'intégrer au réseau cristallin. [9].

## **I.11 Facteurs et paramètres des revêtements composites**

### **I.11.1 Température**

Deux effets opposés peuvent être prévus. Si la température du bain augmente, la vitesse de diffusion des ions et la conductibilité du bain croît aussi ; cela accélère le processus de



micro cristallisation. Cependant, dans le même temps, les surtensions diminuent et cela favorise la croissance des grains. En effet, la température augmente la mobilité latérale des atomes métalliques dans la couche de croissance et les atomes peuvent atteindre plus facilement les centres actifs de croissance, ils favorisent une croissance de petits cristaux [10].

### **I.11.2 Agitation de l'électrolyse**

Au cours de l'électrolyse, la concentration de l'électrolyte au niveau de la cathode diminue. Il est nécessaire de maintenir une certaine agitation pour uniformiser les concentrations afin d'obtenir un dépôt continu et régulier. En outre, cela facilite la diffusion des ions et s'oppose à l'épuisement de la couche de diffusion [10].

### **I.11.3 pH du bain**

Il joue également un rôle important. Dans des bains de nickelage, un pH trop grand donne un dépôt mat. Pour éviter ces inconvénients, les solutions d'électrolytes sont maintenues à un pH constant par addition d'une substance tampons. Cela permet d'éviter les modifications de qualité du dépôt qui résulteraient des variations de l'acidité [10].

### **I.11.4 La densité de courant**

Si la densité de courant croît, un effet favorable peut être constaté au début : la vitesse de formation des germes augmente sans que la vitesse de croissance de ceux-ci soit modifiée. En effet, par une accélération de l'électrolyse, il est possible d'obtenir une augmentation de la vitesse de diffusion des ions. [10].

Cependant, si la densité de courant devient trop grande, la croissance des cristaux est irrégulière. Au-delà d'un seuil, il se forme un dépôt pulvérulent qui ne tarde pas à se désagréger [10].

### **I.11.5 Conductibilité de l'électrolyte**

L'addition d'électrolytes indifférents, c'est-à-dire qui ne prennent pas part au processus électrolytique mais permettant de diminuer la résistance de l'électrolyte, est souvent intéressante. La tension appliquée à la cellule peut être plus petite dans ce cas et, de ce fait, l'énergie consommée est plus faible [10].

### **I.11.6 Nature de l'électrolyte**

L'utilisation de sels complexes donne des dépôts très cohérents et qui adhèrent bien au métal.

L'expérience a montré que l'électrolyse de sels complexes donne des dépôts de meilleure qualité que ceux obtenus à partir des sels simples. Ainsi, le dépôt d'argent réalisé en électrolysant une solution d'un sel simple (par exemple, nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$ ) est formé de longues aiguilles et est peu consistant alors qu'avec des solutions cyanurées, le dépôt est très compact et très adhérent. Les cristaux sont alors petits [10].

### **I.11.7 Concentration de l'électrolyte**

En général, une augmentation de concentration conduit à une meilleure micro-cristallisation, tandis qu'une diminution de celle-ci donne des dépôts incohérents.

En effet, si la concentration augmente, le nombre des ions devient plus grand, la vitesse de leur décharge croît et cela favorise le dépôt des grains fins. Par exemple, il est possible d'obtenir des dépôts compacts d'étain en utilisant des solutions très concentrées de chlorure stanneux, bien que ce métal donne en général des dépôts à gros grains. Néanmoins, lorsque la concentration dépasse une limite déterminée, les germes ne peuvent grossir et le dépôt devient pulvérulent [10].

### **I.11.8 Métal de base**

La structure du dépôt est souvent semblable à la structure de la surface métallique à recouvrir (effet épistatiques). Les propriétés de la couche dépendent beaucoup de celles de la surface métallique qui doit être très propre et parfaitement polie [10].

## **I.12 Les revêtements composites Ni-P et Ni-P-W**

### **I.12.1 Les revêtements composites Ni-P**

#### **a. Histoire du revêtement composite Ni-P électrolytique**

L'idée de ce type des revêtements est de codéposer les particules de deuxième phase (phosphore) dans les dépôts de nickel chimique, et de profiter ainsi de leur uniformité inhérente, leurs trempabilité, leurs résistance à l'usure et leurs résistance à la corrosion [11].

Travaux traitant l'incorporation des particules de deuxième phase dans la matrice de nickel électrolytique ont commencé dans les années 1960.

Les tentatives initiales pour produire ce type de dépôts ont échoué, et ont souvent entraîné la décomposition du bain. Ceci n'est pas étonnant car la méthodologie poursuivie pour produire les revêtements composites était similaire à celle qui prévaut dans l'électrodéposition conventionnelle.

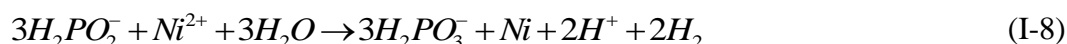
La dispersion de particules augmente de 800 fois la charge superficielle du bain de placage auto-catalytique, ce qui est normalement acceptable pour le placage auto-catalytique conventionnel, ce qui conduit finalement à une décomposition homogène du bain [11].

### I.12.2 Processus de revêtement de Ni-P

La formation d'un dépôt de nickel est obtenue, soit par voie électrolytique où la réduction des ions nickel est réalisée grâce à une source de courant extérieure, soit par voie chimique. Dans ce dernier cas, la réduction des ions métalliques est réalisée dans la solution sans apport de courant extérieur. Pour réaliser ce dépôt, trois procédés sont utilisés : le premier est dit procédé par déplacement, le deuxième est le procédé par contact et le troisième, le plus utilisé à l'échelle industrielle, est le procédé par réduction chimique couramment appelé <<électrolyse processus>>. Dans ce dernier cas, l'agent réducteur est ajouté dans la solution contenant le sel du métal à déposer. Les trois réducteurs les plus utilisés sont l'hypophosphite de nickel, les composés du bore et l'hydrazine ou les sels d'hydrazine. [12]

#### a. Nickelage chimique à partir de l'hypophosphite

La réaction qui conduit à la formation d'un dépôt de nickel chimique à partir d'hypophosphite est décrite par l'équation bilan suivante : [10]



Cette dernière réaction entraîne une diminution du Ph ce qui favorise la formation de phosphore dans le dépôt selon : [12]



Le pH joue un rôle très important dans le processus de nickelage chimique. Lorsque le pH augmente, le dépôt est accéléré, la stabilité du bain diminue ainsi que la teneur en phosphore du dépôt. Ce paramètre est alors réajusté en continu par addition de soude ou d'ammoniaque. La réaction (1) montre aussi que la concentration des ions ortho phosphates augmente au cours de la formation du dépôt métallique. Cette augmentation peut entraîner la formation d'un précipité d'ortho phosphate de nickel. Pour s'affranchir de cette réaction, des agents complexant du nickel sont ajoutés au milieu réactionnel. [12]

### I.12.3 Propriétés mécaniques des revêtements Ni-P

#### a. Structure et microstructure

Un revêtement Ni-P est un alliage dont les propriétés dépendent fortement de la quantité de phosphore, car c'est elle qui conditionne les propriétés mécaniques telles que : la dureté, la rigidité, la résistance à l'usure, le coefficient de frottement... Les principales caractéristiques du nickel pur sont données pour comparaison dans le tableau (I.1) [2].

La composition la plus employée dans l'industrie est comprise entre 7 % et 10 % de phosphore. Les alliages de Ni-P élaborés chimiquement sont hors équilibre. Le phosphore co-déposé modifie le mécanisme de cristallisation : la sursaturation du réseau de nickel par le phosphore permet l'inhibition de la croissance des cristallites de nickel dont la taille diminue jusqu'à amorphisation complète de la solution solide. [2].

Les caractéristiques structurales de ces solutions solides sont étroitement liées à leur teneur en phosphore.

Ces auteurs définissent trois domaines de composition correspondant à trois états structuraux différents :

- de 0 à 9 % P, le dépôt obtenu est cristallisé. Les analyses radio cristallographiques et les observations par microscopie électronique montrent la présence de nickel cristallisé dans le système cubique à faces centrées. [2].
- de 9 à 17 % P, la matrice Ni-P est micro cristallisée. Les clichés de diffraction dérayons X, de même que les observations MET, montrent un affinement structural important. [2].
- de 17 à 22 % P, la solution solide de nickel sursaturée en phosphore est amorphe [2].

D'après Wang [2], la transition entre un domaine de composition où l'alliage est cristallisé à un domaine où il est amorphe passe par un domaine intermédiaire où la proportion volumique de la phase inter cristalline augmente par rapport à la phase cristalline.

En effet, Hentschel [2] a montré que les joints de grains concentrent une majeure partie de la quantité de métalloïde.

**Tableau I.2:** Caractéristiques du nickel pur [2].

<b>Symbole chimique</b>	<b>Ni</b>
Masse volumique	8,89 g/cm <sup>3</sup>
Numéro atomique	28
Masse atomique	58,7
Point de fusion	1452°C
Point d'ébullition	2480°C
Limite d'élasticité	105 MPa
Résistance à la rupture	380 MPa
Allongement	35%
Module d'élasticité	210-214 N/mm <sup>2</sup>
Système cristallin	CFC

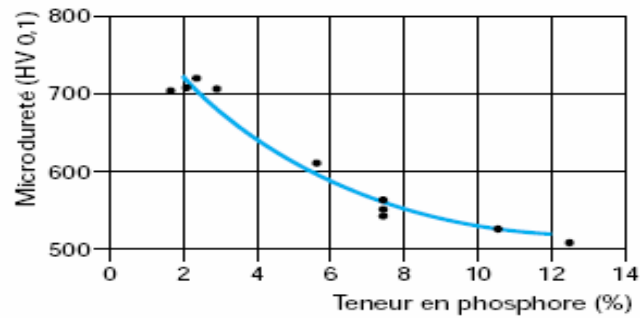
### **b. Influence de la teneur en phosphore pour les dépôts non traités**

La dureté des alliages Ni-P varie en fonction de leur état de cristallisation et donc de leur teneur en métalloïde (figure I.5). Barnière[2] ainsi que d'autres auteurs ont mesuré des valeurs de micro-dureté Vickers autour de 300 HV pour des alliages cristallisés. Cette valeur augmente jusqu'à 650 HV lorsque les solutions solides sont microcristallisées et diminue ensuite pour se stabiliser autour de 400 HV pour les alliages amorphes [2].

La hausse de dureté observée est due à la diminution de la taille de grains provoquée par le co-dépôt du métalloïde. Ainsi l'augmentation du nombre de joints de grains, qui entraîne une augmentation du nombre d'obstacles au déplacement des dislocations, se traduit par l'accroissement de cette propriété mécanique. Ainsi, la dureté du nickel chimique, qui lui vaut son succès dans de nombreuses applications industrielles, varie fortement en fonction de la teneur en phosphore lorsque le revêtement n'a pas subi de traitement thermique [2].

Trois familles de revêtements Ni-P existent donc selon cette teneur en phosphore :

- les « bas-phosphore » (%P < 5).
- les « moyens-phosphore » (5 < %P < 9).
- les « moyens-phosphore » (5 < %P < 9).



**Figure I.5:** Influence de la teneur en phosphore du dépôt sur la dureté [2].

#### I.12.4 Utilisation des revêtements composites Ni-P

Il est également utilisé :

- corps de pompes
- cylindres
- plaques de base de machines
- corps de vannes, d'électrovannes
- moules pour injection plastiques fluorés
- intérieurs d'échangeurs de chaleur
- toute pièce de machines devant être protégées contre la corrosion
- guides fils pour machines textiles
- pièces et cylindres de machines hydrauliques
- filières d'injection pour le plastique
- pièces de construction en aluminium
- bombonnes en acier pour le stockage d'eau pur [13]

#### I.12.5 Les revêtements composites Ni-P-W

##### a. Processus de revêtement de Ni-P-W

La composition du bain et les conditions opératoires pour le revêtement Ni-P-W sont choisies après plusieurs essais et les plages appropriées des paramètres sont choisies en conséquence. Le tableau (I.3) indique la composition du bain et les conditions de fonctionnement pour un revêtement réussi de Ni-P-W sur un substrat en acier doux. Le sulfate de nickel est utilisé comme source de nickel tandis que l'hypophosphite de sodium est l'agent réducteur. La solution de tungstate de sodium est utilisée comme source d'ion tungstène. Le bain est préparé en ajoutant les constituants dans la séquence appropriée. Le pH de la solution est maintenu autour de 7-8 par un contrôle continu avec un pH-mètre. Les échantillons

nettoyés sont activés dans une solution de chlorure de palladium à une température de 55 ° C. Ceci est nécessaire car des noyaux catalytiques de métal M sur une surface non catalytique S peuvent être générés dans une réaction d'oxydoréduction électrochimique [14].



Où  $M^{2+}$  est l'ion métallique et M est le catalyseur métallique. Le catalyseur préféré est le Pd, et donc l'agent de nucléation préféré  $M^{2+}$  est  $Pd^{2+}$  (à partir de  $PdCl_2$ ). Les échantillons activés sont ensuite immergés dans le bain chimique qui est maintenu à une température comprise entre 90 et 92 ° C à l'aide d'une plaque chauffante cum agitateur, fixé avec un capteur de température qui est également immergé dans la solution. Le dépôt est effectué pendant une durée de 3 heures. La gamme d'épaisseur de revêtement est d'environ 35  $\mu m$ . Après le dépôt, les échantillons sont retirés du bain de nickel auto-catalytique et lavés dans de l'eau distillée. Ensuite, les échantillons sont traités thermiquement dans un four à boîte. Chaque échantillon est enduit et traité thermiquement à l'air (recuit à 400 ° C pendant 1 h) séparément. Le schéma proposé pour le mécanisme de réaction dans le dépôt de Ni-P-W ternaire est le suivant [14].



**Tableau I.3:** composition du bain chimique et état de fonctionnement [14].

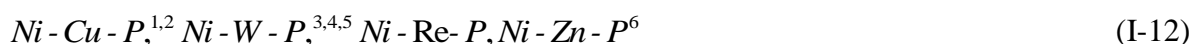
Constituants du bain	Valeurs	Condition de Fonctionnement	Valeurs
Sulfate de nickel (g / L)	20	PH	7-8
Hypophosphite de sodium (g / L)	20		
Citrate de sodium (g / L)	35	Température	$90 \pm 2^\circ C$
Sulfate d'ammonium (g / L)	30	Durée du revêtement	3h
Acide lactique (g / L)	5		
Tungstate de sodium (g / L)	15	Volume de bain (ml)	200

### b. Propriétés des revêtements Ni-P-W

Les principales raisons de l'utilisation industrielle généralisée du nickel électrolytique se trouvent dans les propriétés uniques de dépôts de nickel auto catalytique. Un avantage du

nickelage auto catalytique est sa capacité à recouvrir les surfaces intérieures des tuyaux, des vannes et autres parties sur une variété de matériaux, y compris les métaux, les plastiques, le verre et la céramique. Basé sur les excellentes propriétés des revêtements, le dépôt auto catalytique de Ni-P a été largement étudié. Des résultats prometteurs sur l'optimisation des caractéristiques du le système Ni-P par l'introduction d'un troisième élément pour former des revêtements ternaires à base d'alliage Ni-P a été récemment rapporté [15].

Les systèmes ternaires étudiés comprennent



Parmi ceux-ci, l'introduction du tungstène semble intéressante en raison des propriétés uniques énumérées dans le tableau 3. Le tungstène est un métal dur et robuste avec un point de fusion élevé et une bonne résistance aux acides et aux alcalis. Co-dépôt de tungstène dans un nickel phosphore la matrice devrait produire des propriétés avantageuses [15].

**Tableau I.4** : Propriétés des éléments individuels pour Ni-W-P [15]

Propriété	Nickel	Tungstène	Phosphores
Couleur	Blanc métallique	Gris-blanc Métallique	Blanc / rouge / noir Non métallique
Densité, $g/cm^3$	8.9	19.25	2.28 (rouge)
Point de fusion, °C	1455	3422	44
Dureté, $MPa$	638	3430	.....
Modules-en vrac, $GPa$	180	310	5-11
Module d'Young, $GPa$	200	411	.....
Conductivité thermique, $W/M.K$	90.9	137	12.1
Résistivité électrique, $n\Omega m$	69	53	.....

### I.13 Propriétés tribologique des dépôts

L'intérêt de revêtements composites pour limiter l'usure ou améliorer le frottement, est soutenu par de nombreuses études. La plupart de celles-ci s'intéressent à la comparaison du comportement tribologique d'une matrice avec et sans particules. En effet, l'incorporation de particules provoque des variations de propriétés mécaniques intrinsèques de la matrice susceptibles de modifier le comportement tribologique des revêtements. [2]

Comme le rappelle justement S.Vaillant [16], le terme de composites englobe les matrices renforcées par des particules mais également les alliages biphasés comme lorsqu'on



durcit par traitement thermique des alliages Ni-P par précipitation des phosphures de nickel Ni<sub>3</sub>P dans le nickel. [2]

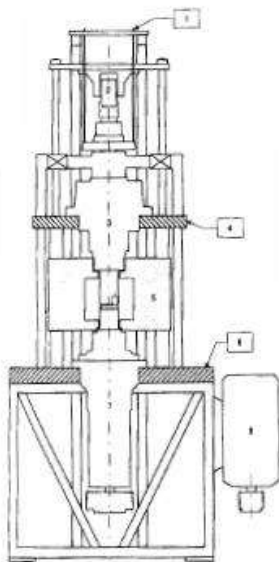
Plusieurs auteurs ont comparé les valeurs du coefficient de frottement et de l'usure obtenues pour un dépôt composite avec celles de la matrice seule, dans le but de mettre en évidence un effet lubrifiant de certaines particules [2]. Ainsi les dépôts Ni-P obtenus par voie chimique, et particulièrement ceux ayant une structure amorphe sont principalement utilisés pour la protection contre la corrosion, alors que les dépôts composites, de diverses particules incorporées dans une matrice Ni-P ont pour effet d'améliorer les propriétés d'usure ou de frottement des matériaux. [2].

### I.13.1 Mesure expérimentale de l'usure des revêtements

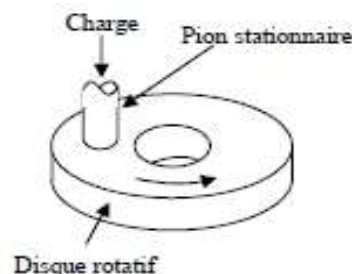
#### I.13.2 Dispositifs

Le tribomètre utilisé pour mesurer la corrosion au Laboratoire Génie de Production de l'ENIT (figure I.6). En configuration pion-disque (figure I.7), ses caractéristiques sont les suivantes : [2].

- Vitesse de glissement : 0,1 à 1,5 m/s.
- Charge normale : 10 à 1000 N.



- 1- Système de contre poids
- 2- Levier de mise en charge
- 3- Broche supérieure
- 4- Bâti supérieur
- 5- Four
- 6- Bâti inférieur
- 7- Broche inférieure
- 8- Moteur

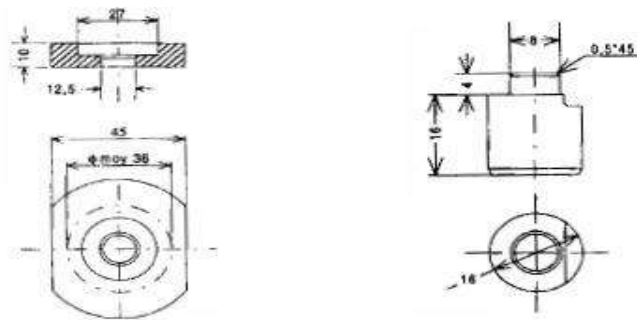


**Figure I.6** dessin d'ensemble du tribomètre [2]    **Figure I.7** configuration pion-disque [2]

La machine s'agence autour de deux mandrins coaxiaux verticaux supportant les échantillons. Chaque mandrin est prolongé par un arbre, guidé dans une broche. Les paliers de

la broche inférieure assurent une liaison pivot entre l'arbre et le bâti, ceux de la broche supérieure assurent une liaison pivot glissant qui permet la transmission de la charge normale. [2].

Le maintien des échantillons est effectué par deux tirants coaxiaux aux broches, débouchant aux extrémités des arbres. Les dépôts sont réalisés sur des disques en acier faiblement allié 36NiCrMo16, dont l'arrêt en rotation est obtenu par deux méplats (figure 13). Le pion à face frottant est en acier faiblement allié 100Cr6 ayant subi une austénitisation entre 820 et 840°C une trempe à l'huile puis un revenu d'une heure à 150°C lui conférant une résistance de 62 HRc (~8-9 GPa). Les formes de la tête du tirant et du pion permettent l'arrêt de ce dernier en translation et en rotation [2].



**Figure I.8** échantillons pour la configuration pion-disque [2].

#### **I.14 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce premier chapitre dans une première partie, revêtement composite et dépôts auto-catalytique.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté les processus et propriétés et utilisation de revêtement Ni-P et Ni-P-W.

# **Chapitre II**

## **La logique floue**

## II.1 Introduction

De nos jours, la logique floue (en anglais «fuzzy logic») est un axe de recherche important sur lequel se focalisent de nombreux scientifiques. Des retombées technologiques sont d'ores et déjà disponibles, tant dans le domaine grand public (appareils photos, machines à laver,...) que dans le domaine industriel (réglage et commande de processus complexes liés à l'énergie, aux transports, à la transformation de la matière, à la robotique, aux machines-outils). [16]

Dans ce chapitre, nous passons en revue les principales caractéristiques du ce système avec la méthode et les domaines d'utilisation.

## II.2 La logique floue

La logique floue permet la formalisation des imprécisions dues à une connaissance globale d'un système très complexe et l'expression du comportement d'un système par des mots. Elle permet donc la standardisation de la description d'un système et du traitement de données aussi bien numériques qu'exprimées symboliquement par des qualifications linguistiques. [16]

### II.2.1 Principe de la logique floue

La logique floue a été introduite en 1965 par le Professeur L. Zadeh. Elle permet de faire correspondre un degré de vérité (d'appartenance) à une variable qui peut être linguistique. Cette graduation dans l'appartenance d'un élément à une situation permet la modélisation de l'observation humaine exprimée sous forme linguistique. [17]

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

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

Tandis que son application au niveau des systèmes de réglage et de commande est relativement récente, depuis quelques années la commande par la logique floue a connu, essentiellement au Japon à partir de 1985 un essor appréciable. En effet, elle a été appliquée dans des problèmes industriels pour résoudre des problèmes de régulation aussi divers, liés à l'énergie, le transport, les machines outils, et la robotique, etc... [18]

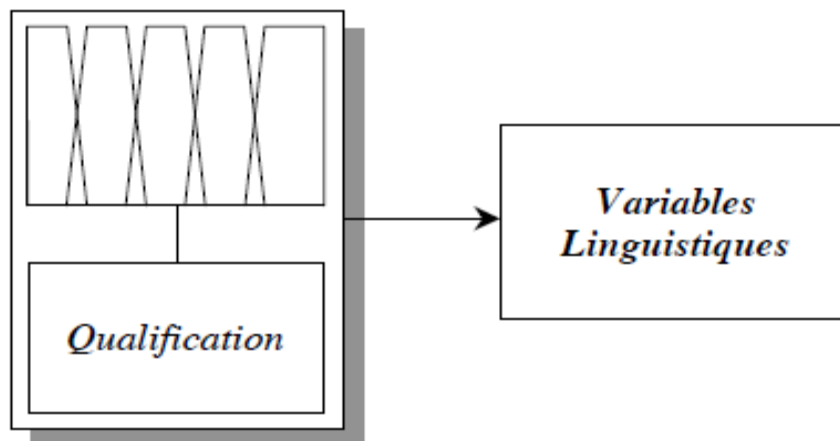
### II.2.3 La logique classique et la logique floue

Dans la logique classique, les variables gérées sont Booléennes. C'est à dire qu'elles ne prennent que deux valeurs 0 ou 1. La logique floue a pour but de raisonner à partir de connaissances imparfaites qui opposent résistance à la logique classique. Pour cela la logique floue se propose de remplacer les variables booléennes par des variables flous. [18]

### II.2.4 Variables linguistiques

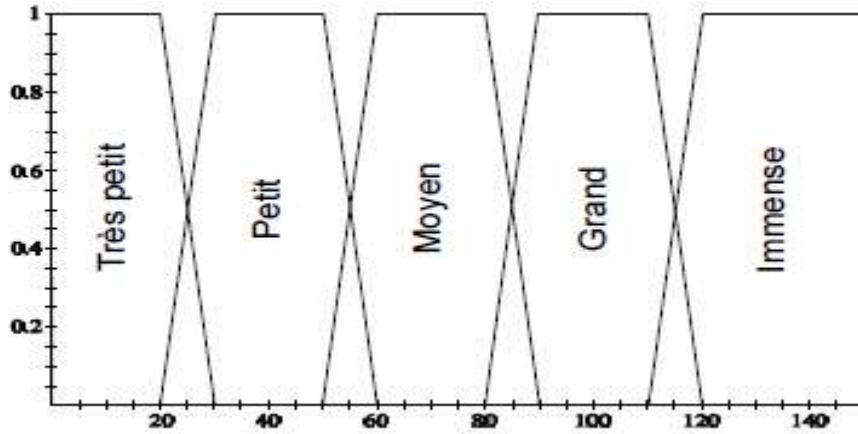
Toutes les variables que l'on considère, en physique ou en économie, par exemple, prennent une valeur unique de leur ensemble de définition X dans une situation donnée. Néanmoins, les conditions d'observations ne permettent pas toujours de connaître parfaitement cette valeur unique. Donc, une variable linguistique sert à modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise peut être inconnue. [19]

Pour représenter ces variables linguistiquement, nous pouvons utiliser des sous-ensembles flous. Ces sous-ensembles flous étant qualifiés sur une situation donnée, nous donnons une représentation des variables linguistiques suivant le schéma expliqué par la figure II.1. [19]



**Figure. II.1.** Les sous-ensembles flous et les variables linguistiques [19]

Une variable linguistique est un triplet  $(V, X, T_v)$ , dans lequel V est une variable définie sur un ensemble de référence X. L'ensemble  $T_v = \{A_1, A_2, \dots\}$ , fini ou infini, contient des sous ensembles flous normalisés de X, utilisables pour caractériser V. Selon l'utilisation qui doit être faite, le nombre d'éléments de  $T_v$  est plus ou moins grand. La figure II.2 illustre une variable linguistique  $(V, X, T_v)$  utilisée pour décrire le dimensionnement d'un pilier souterrain.



$V =$  Dimensionnement,

$T_v = \{\text{Très petit, Petit, Moyen, Grand, Immense}\}$

**Figure. II.2** Variable linguistique ( $V, X, T_v$ ) décrivant le dimensionnement d'un pilier en mètre. [19]

## II.2.5 Les sous Des Ensembles Flous

### a. Support

On appelle "support" d'un ensemble flou  $A$  dans  $U$  l'ensemble ordinaire de point  $u$  dans  $U$  tel que  $\mu_A(u) > 0$ . Il est noté par  $S(A)$ , et défini par: [20].

$$S(A) = \{u \in U / \mu_A(u) > 0\} \quad (\text{II.1})$$

L'ensemble flou dont le support est un ensemble singleton est appelé « singleton flou » [20].

### b. Hauteur

La "hauteur" d'un ensemble flou  $A$  est la plus grande valeur du degré d'appartenance  $\mu_A(u)$ . Elle est notée par  $hgt(A)$  et définie par : [20].

$$hgt(A) = \max_{u \in U} \mu_A(u) \quad (\text{II.2})$$

Un ensemble flou  $A$  est appelé normal si  $hgt(A) = 1$ , et sous normal si  $hgt(A) < 1$  [4]

### c. Noyau

Le noyau d'un ensemble flou  $A$ , noté  $C(A)$  est l'ensemble ordinaire qui contient tous les éléments totalement possibles  $u$  dans  $U$  de  $A$ . Il est noté par  $C(A)$  et défini comme suit : [20].

$$C(A) = \{u \in U / \mu_A(u) = 1\} \quad (\text{II.3})$$

S'il y a un seul point avec un degré d'appartenance égale à 1, alors ce point est appelé la valeur modale de  $A$ . [20]

#### d. Inclusion

$A$  est dit inclus dans  $B$ , propriété que l'on note  $A \subseteq B$ , si tout élément  $x$  de  $X$  qui appartient à  $A$  appartient aussi à  $B$  avec un degré au moins aussi grand [16]:

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

### II.2.6 Fonction d'appartenance

Soit un ensemble  $E$  et un sous-ensemble  $A$  de  $E$  ( $A \subset E$ ), et  $x$  un élément de  $E$  appartenant à  $A$

( $x \in A$ ). Pour illustrer cette caractéristique, on utilise la fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  compris entre 0 et 1, qui représente le degré d'appartenance de  $x$  à l'ensemble flou  $A$ . Le plus souvent, la fonction d'appartenance est déterminée par l'une des fonctions suivantes [21]

#### a. Fonction triangulaire

Elle est définie par trois paramètres  $\{a, b, c\}$ , qui déterminent les coordonnées des trois sommets (figure II.6-a). [21]

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{II.5})$$

#### b. Fonction trapézoïdale

Elle est définie par quatre paramètres  $\{a, b, c, d\}$ , (figure II.6-b) : [21]

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

#### c. Fonction gaussienne

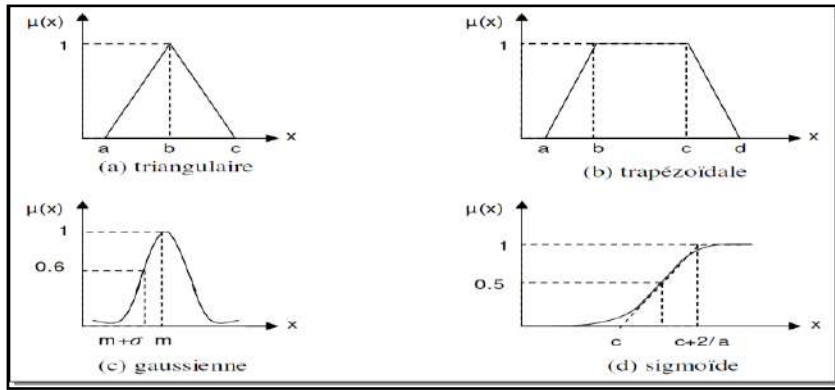
Elle est définie par deux paramètres  $\{o, m\}$ , (figure II.6-c): [21]

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

#### d. Fonction sigmoïde

Elle est définie par deux paramètres  $\{a, c\}$ , (figure II.6). [21]

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))} \quad (\text{II.8})$$



**Figure. II.3 :** Formes usuelles des fonctions d'appartenance [21]

### II.2.7 Les Opérateurs en Logique flous

Il s'agit de la généralisation des opérateurs négation, intersection et union de la théorie des ensembles ordinaires, voir figure II.3. [20]

**a. L'opérateur NON**

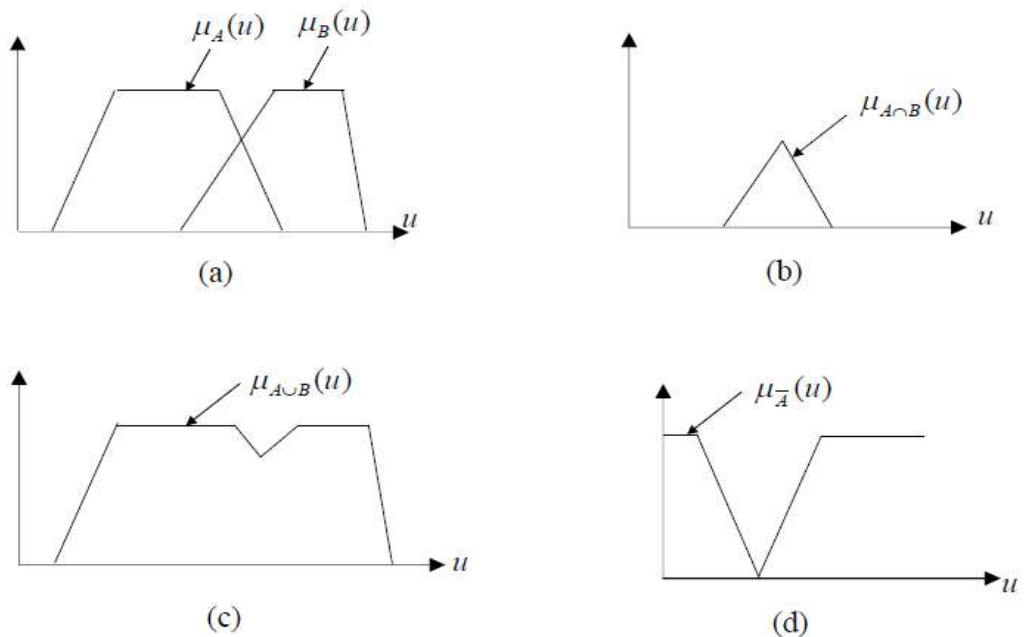
$$\mu_{A^c}(u) = 1 - \mu_A(u) \tag{II.9}$$

**b. L'opérateur ET**

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) \tag{II.10}$$

**c. L'opérateur OU**

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



**Figure II.4:** Opérateurs logiques : (a)  $A \text{ et } B$ ; (b)  $A \cap B$ ; (c)  $A \cup B$ ; (d)  $\bar{A}$  [20]

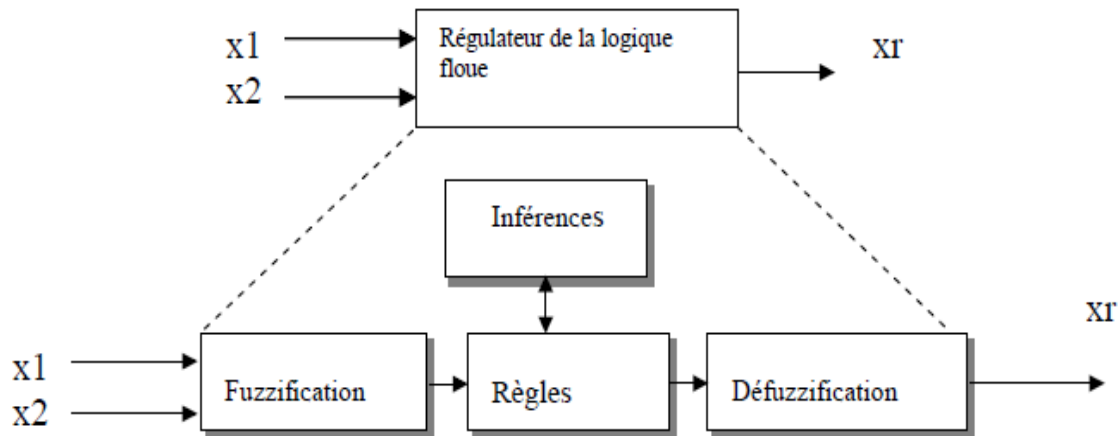


### II.2.8 Structure d'un système de commande floue

Contrairement aux techniques de réglage classique, le réglage par la logique floue n'utilise pas des formules ou des relations mathématiques bien déterminées ou précises. Mais, il manipule des inférences avec plusieurs règles floues à base des opérateurs flous ET, OU, ALORS,...etc., appliquées à des variables linguistiques.[18]

On peut distinguer trois parties principales constituant la structure d'un régulateur floue (voir figure II.5) :

- une interface de fuzzification,
- un mécanisme d'inférence,
- et une interface de Defuzzification



**Figure. II.5 :** Structure de base d'un régulateur flou [18]

#### d. Fuzzification

La fuzzification est réalisée dans l'interface d'entrée du contrôleur flou. Durant cette phase, les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant des règles sémantiques définies par un expert. [22]

Durant la phase de normalisation, chaque mesure issue du système est modifiée pour fournir une valeur appartenant à un univers du discours relativement simple. On peut choisir comme univers du discours un intervalle centré sur zéro :  $[-c, +c]$ . Si la mesure initiale  $x$  est comprise dans un autre intervalle  $[a, b]$ , la normalisation est souvent réalisée par transformation linéaire, selon : [22]

$$Y = \frac{2c}{b-a} \left[ x - \frac{a+b}{2} \right] \quad (\text{II.11})$$

L'univers du discours est ensuite représenté par une variable linguistique, qui comporte un nombre assez restreint de termes (en général trois, cinq ou sept) de façon à limiter le nombre de règles. [22]

Enfin, les valeurs normalisées déduites de chacune des entrées sont transformées en qualifications linguistiques, en utilisant les variables linguistiques correspondantes. [22]

#### **e. Mécanisme d'inférence floue**

Cette étape consiste à relier les variables physiques d'entrée du régulateur (grandeurs mesurées ou estimées), qui sont transformées en variables linguistiques pendant l'étape de fuzzification, la variable de sortie du contrôleur sous sa forme linguistique, par des règles mentales traduisant une action ou une décision linguistique sur la commande à la sortie du régulateur, face à toute situation se présentant à l'entrée de ce régulateur [18]

Ces inférences sont basées sur plusieurs règles établies par l'expertise et le savoir-faire humain concernant le système à régler. Elles sont structurées sous forme compacte dans une matrice multidimensionnelle dite matrice d'inférence. [18]

On exprime les inférences généralement par une description linguistique et symbolique à base de règles pré définies dans la matrice d'inférence. Chaque règle est composée d'une condition précédée du symbole 'SI' appelée prémisse, et d'une conclusion (action, décision, opération ou commande) précédée du symbole 'ALORS'. [18]

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

- la méthode d'inférence max-min,
- la méthode d'inférence max-prod,
- et la méthode d'inférence somme-prod.

Chacune de ces trois méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs de la logique floue. [18]

- Pour la méthode d'inférence max-min, l'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS (l'implication) est réalisée par la formation du minimum.

- Pour la méthode d'inférence max-produit, l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS (l'implication) est réalisée par la formation du produit. [18]

- Pour la méthode d'inférence somme-produit, on réalise au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation de la somme (valeur moyenne), et l'opérateur ET par la formation du produit. Pour la conclusion, l'opérateur ALORS est réalisé par un produit.

Dans le cas de la méthode somme-produit, l'action des différentes règles sont liées entre elles par l'opérateur OU qui est réalisé par la formation de la moyenne arithmétique (somme moyenne). Alors, pour chaque règle on obtient la fonction d'appartenance de  $x_r$  en formant le produit de  $\mu(x_1), \mu(x_2)$  et  $\mu_{0i}(x_r)$  exigé par la règle :

$$\begin{aligned}\mu_{Ri}(x_r) &= \mu(x_1)\mu(x_2)\mu(x_r) \\ &= \mu_{Ci}\mu_{0i}(x_r)\end{aligned}\tag{II.11}$$

Où  $\mu_{Ci}$  est le degré de vérification de la  $i$  ème règle ou condition. [18]

$\mu(x_1)$  et  $\mu(x_2)$  sont les facteurs d'appartenance des deux variables linguistiques aux deux ensembles flous de la  $i$ ème règle, pour deux valeurs données de  $x_1$  et  $x_2$ . Et  $\mu_{0i}(x_r)$  est la fonction d'appartenance de la variable de sortie correspondant à la  $i$ ème règle ( $Ri$ ).

Alors, la fonction d'appartenance résultante est exprimée par:

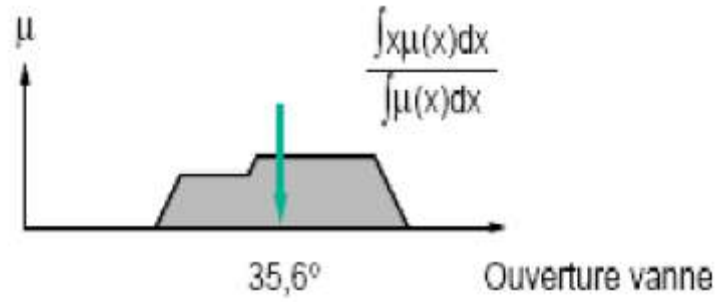
$$u_{res}(x_r) = \frac{u_{R1}(x_r) + u_{R2}(x_r) + \dots + u_{Rm}(x_r)}{m}\tag{II.12}$$

Où  $m$  est le nombre des règles de la matrice d'inférence. [18]

#### f. Défuzzification

A la fin l'inférence. l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du (monde flou) au (monde réel), c'est la défuzzification. [23]

Il existe plusieurs méthodes de défuzzification : centre de gravité de la surface, bissecteur de la surface, moyenne des maximas, plus petit des maximas en valeur absolue, plus grand des maximas en valeur absolue. la plus rencontrée étant la méthode de calcul du (centre de gravité) de l'ensemble flou. [23]



**Figure. II.6** Défuzzification par center de gravité [23]

### II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous passons en revue les concepts de base de la logique floue et expliquons comment cela fonctionne, et la différence entre celle-ci et la logique classique.

La logique floue a démontré son efficacité analytique sans recours au jugement humain.

**Chapitre**  
**Résultats et Discussions**

### **III.1 Introduction**

La logique floue tel que une méthode qui intègre dans la plupart des applications actuelles, 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 model flou afin d'étudier la prédiction de la profondeur d'usure des revêtements électrolytiques (Ni-P et Ni-P-W) dans des conditions lubrifiées (la charge, vitesse, temps).

### **III.2 Données expérimentales**

Pour étudier l'effet des paramètres d'usure sur la profondeur d'usure des revêtements (Ni-P et Ni-P-W), nous proposons d'utilisée la méthode de simulation qui se base sur la théorie du logique floue (Mamdani) par le logiciel MATLAB, en se basant sur les donnée expérimentaux regroupés dans les tableaux III.1 et III.2 obtenues depuis les références [24] et [25].

**Tableau III.1** Données expérimentales composite Ni-P [24]

<b>Essai</b>	<b>CH (N)</b>	<b>V (tr / min)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Pr D'usure (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
1	50	60	5	11.84
2	50	60	10	12.87
3	50	60	15	13.95
4	50	70	5	11.93
5	50	70	10	12.4
6	50	70	15	13.85
7	50	80	5	12.21
8	50	80	10	13.3
9	50	80	15	13.34
10	75	60	5	15.14
11	75	60	10	16.67
12	75	60	15	17.86
13	75	70	5	15.89
14	75	70	10	16.97
15	75	70	15	17.16
16	75	80	5	15.67
17	75	80	10	16.53
18	75	80	15	16.62
19	100	60	5	17.5
20	100	60	10	18.33
21	100	60	15	18.82
22	100	70	5	17.34
23	100	70	10	17.56
24	100	70	15	18.22
25	100	80	5	16.55
26	100	80	10	17.53
27	100	80	15	18.31

**Tableau III.2** Données expérimentales composite Ni-P-W [25]

<b>Essai</b>	<b>CH (N)</b>	<b>V (tr / min)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Pr D'usure (Sec) (µm)</b>	<b>Pr D'usure (Lubrifiant)</b>
1	10	60	5	5.031	4.398
2	10	60	10	7.887	5.114
3	10	60	15	10.196	5559
4	10	80	5	7.849	4.265
5	10	80	10	9.486	6.37
6	10	80	15	11.203	9.552
7	10	100	5	12.649	7.803
8	10	100	10	14.14	9.859
9	10	100	15	15.407	11.204
10	20	60	5	10.283	7.982
11	20	60	10	11.134	8.795
12	20	60	15	12.239	9.439
13	20	80	5	9.55	9.723
14	20	80	10	11.509	11.414
15	20	80	15	12.866	11.674
16	20	100	5	13.481	8.89
17	20	100	10	16.816	12.646
18	20	100	15	18.946	13.921
19	30	60	5	10.979	6.534
20	30	60	10	13.1	9.012
21	30	60	15	14.088	10.084
22	30	80	5	9.825	8.837
23	30	80	10	13.718	11.299
24	30	80	15	16.21	12.783
25	30	100	5	17.318	11.814
26	30	100	10	19.423	14.476
27	30	100	15	20.602	15.52



### III.2.1 Système flou

Dans ce système flou nous avons choisi, deux systèmes d'inférence flous de type Mamdani pour les deux types de revêtements.

#### a. Composite Ni-P

Nous utilisons un système flou avec trois (03) entrées : la charge (CH), la vitesse (V), le temps (t) et un variable de sortie : la profondeur d'usure (Pr.D).

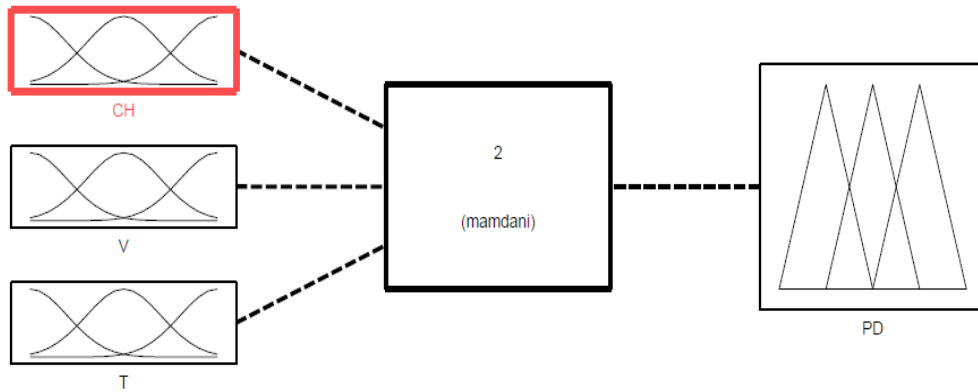


Figure III.1 Système flou pour le composite (Ni-P)

#### b. Composite Ni-P-W

Nous utilisons un système flou avec 3 entrées : la charge (CH), la vitesse (V), le temps (t) et deux variables de sortie : la profondeur d'usure sec (Pr.D), la profondeur d'usure lubrifiants (Pr.D).

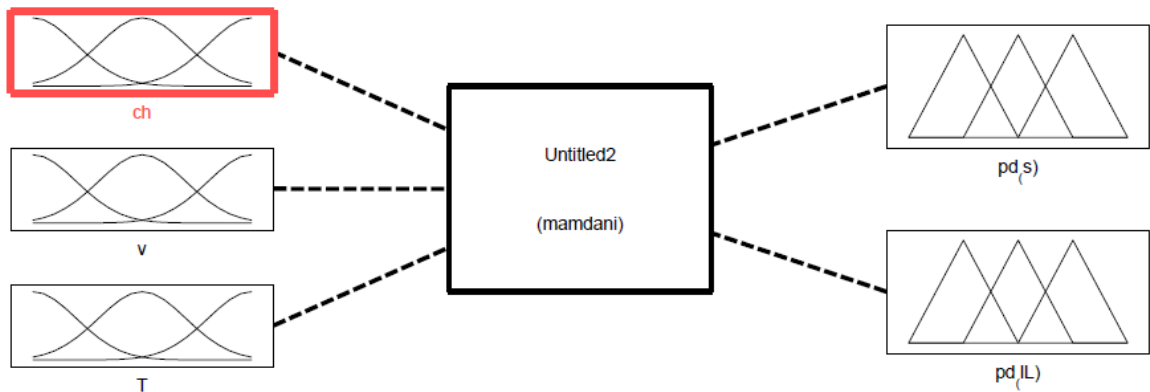


Figure III.2 Système flou pour le composite (Ni-P-W)

### III.2.2 Modélisation floue

#### a. Les variables flous

##### Composite Ni-P

Dans la construction de notre premier modèle (Ni-P) nous avons choisi comme paramètres d'entrée : la charge, la vitesse, le temps ; et tel que variables de sortie nous avons choisi la profondeur d'usure.

**Tableau III.3** Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite Ni-P

	Valeur Mini	Valeur Max
<b>Les paramètres d'entrée</b>		
la charge (CH) (N)	50	100
la vitesse (V) (tr / min)	60	80
le temps (T) (min)	5	15
<b>Les paramètres de sortie</b>		
la profondeur d'usure (Pr.D) ( $\mu\text{m}$ ).	11.48	18.82

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

Les variables linguistiques pour la première variable (la charge) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.3)



**Figure III.3** Variables Linguistiques pour la charge

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (la vitesse) sont présentent comme il est indiqué dans la figure (III.4)



**Figure III.4** Variables Linguistiques pour la vitesse

Les variables linguistiques pour la troisième variable (le temps) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.5)



Figure III.5 Variables Linguistiques pour le temps

Afin de bien définir les variables linguistiques pour les sorties nous avons utilisé le nuage de points (figure III.6) qui montre la distribution des valeurs de la profondeur d'usure obtenus lors des essais dans l'univers de discours, ce qui nous aide à déterminer les intervalles flous vis-à-vis à la concertation des valeurs de chaque sortie dans chaque intervalle.

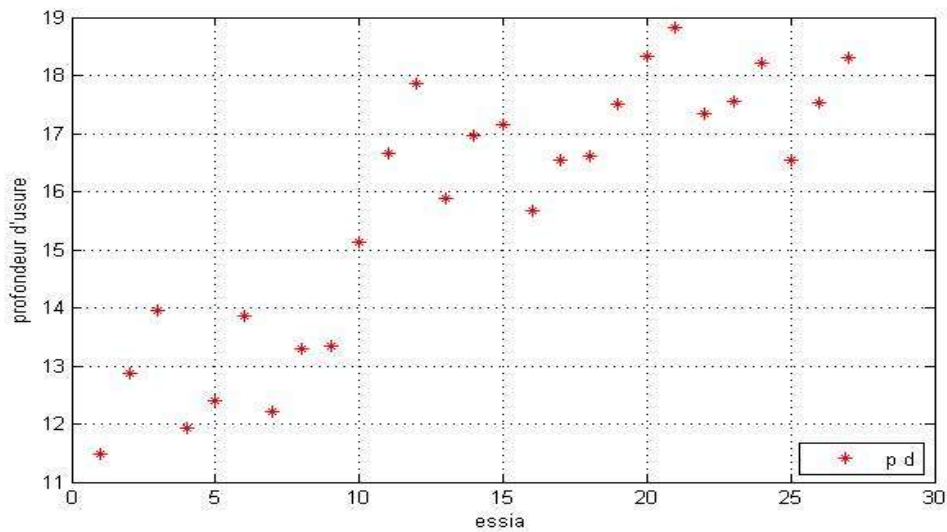


Figure III.6 Les valeurs de la profondeur d'usure en ensembles des essais

En se basant sur la figure (III.6) les variables linguistiques pour la sortie (la profondeur d'usure) est choisie comme il est indiqué dans la figure (III.7)

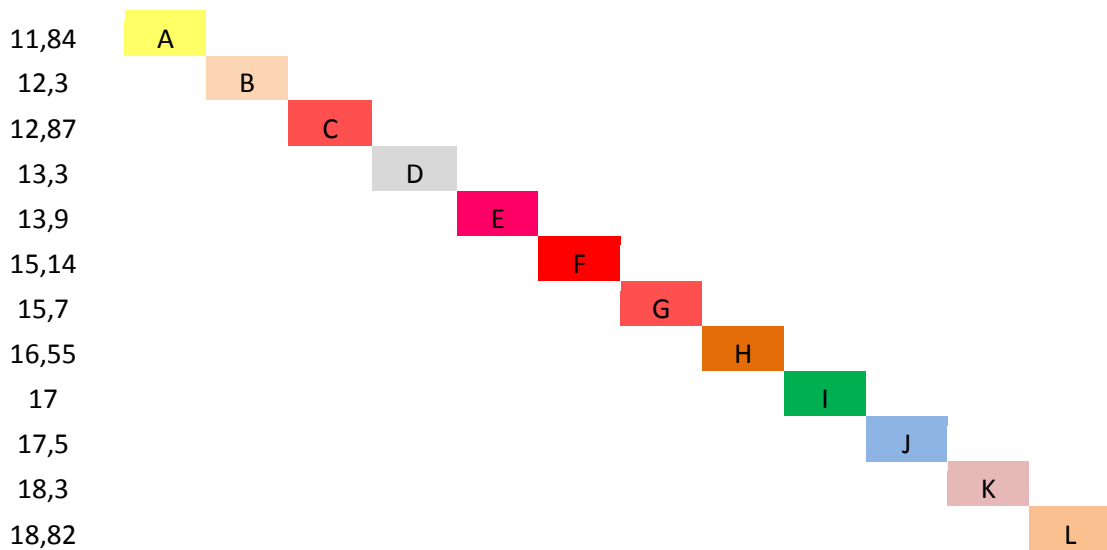


Figure III.7 Variables Linguistiques pour la profondeur d'usure

### Composite Ni-P-W

Dans la construction du deuxième modèle (Ni-P-W), figure (III.2) nous pouvons choisir les paramètres d'entrée comme suit: la charge, la vitesse, le temps et comme variable de sortie nous avons choisir la profondeur d'usure (sec) et la profondeur d'usure (lubrifiant).

**Tableau III.4** Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite Ni-P-W

	Valeur Mini	Valeur Max
<b>Les paramètres d'entrée</b>		
la charge (CH) (N)	10	30
la vitesse (V) (tr / min)	60	100
le temps (T) (min)	5	15
<b>Les paramètres de sortie</b>		
la profondeur d'usure (Pr.D sec) ( $\mu\text{m}$ )	5.031	20.602
la profondeur d'usure (Pr.D lubrifiant) ( $\mu\text{m}$ )	4.265	15.52

Les variables linguistiques pour la première variable (la charge) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.8)



**Figure III.8** Variables Linguistiques pour la charge

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (la vitesse) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.9)



**Figure III.9** Variables Linguistiques pour la vitesse

Les variables linguistiques pour la troisième variable (le temps) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (III.10)



**Figure III.10** Variables Linguistiques pour le temps

Afin de bien définir les variables linguistiques pour les sorties nous avons utilisé le nuage de points (figure III.11 , III.12) qui présente la distribution des valeurs de la profondeur d'usure (sec), la profondeur d'usure (lubrifiants) obtenus lors des essais dans l'univers de discours, ce qui nous aide à déterminer les intervalles flous vis-à-vis à la concertation des valeurs de chaque sortie dans chaque intervalle.

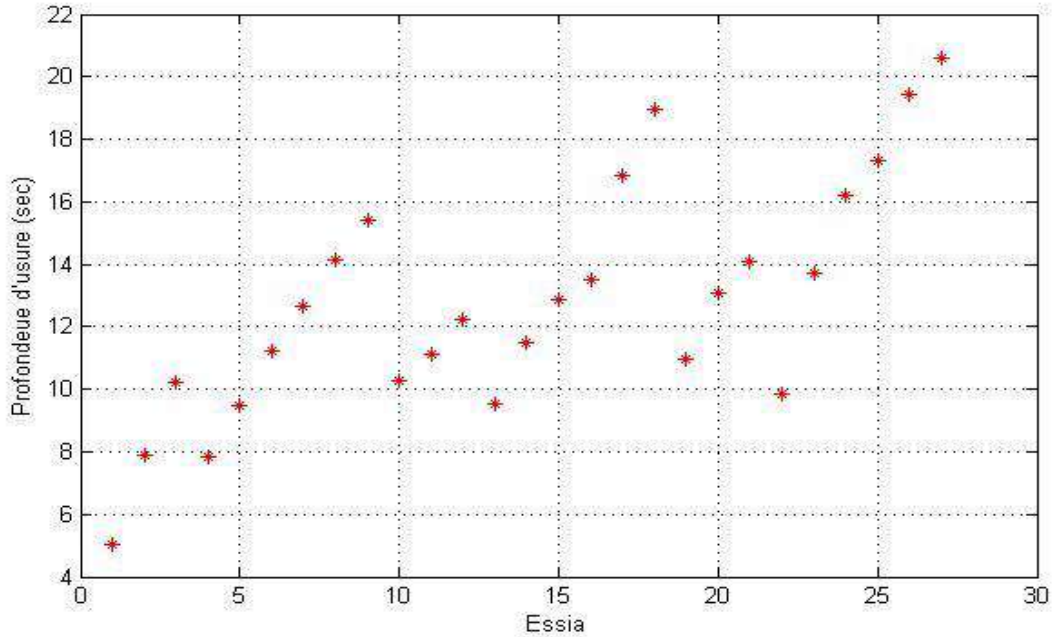


Figure III.11 Les valeurs de la profondeur d'usure (sec) en ensembles des essais

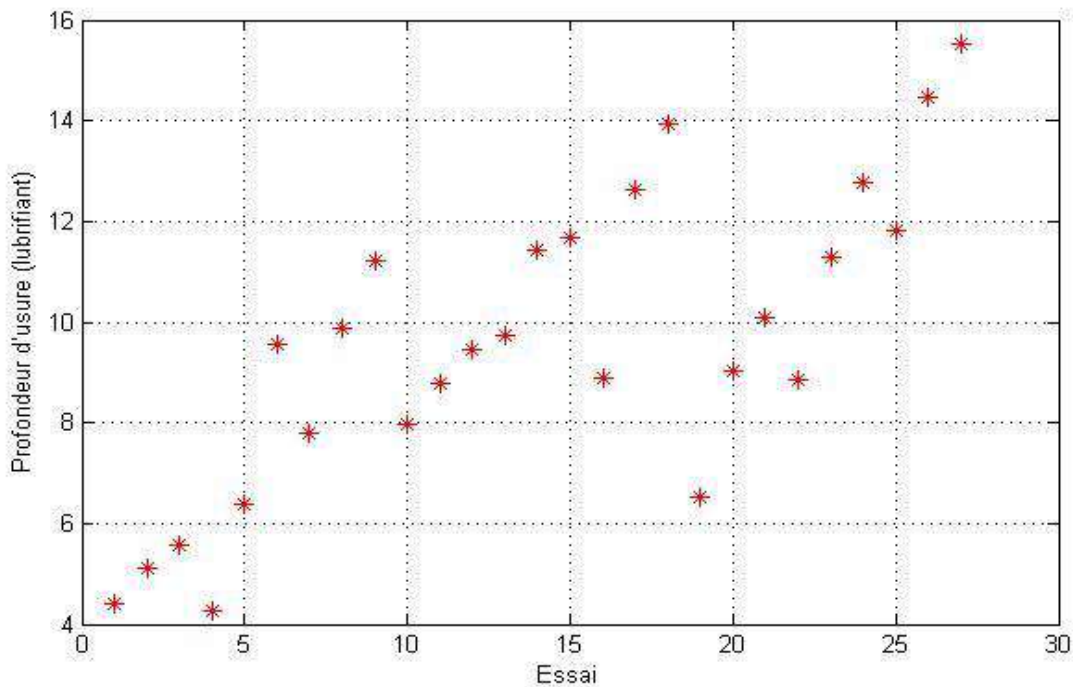
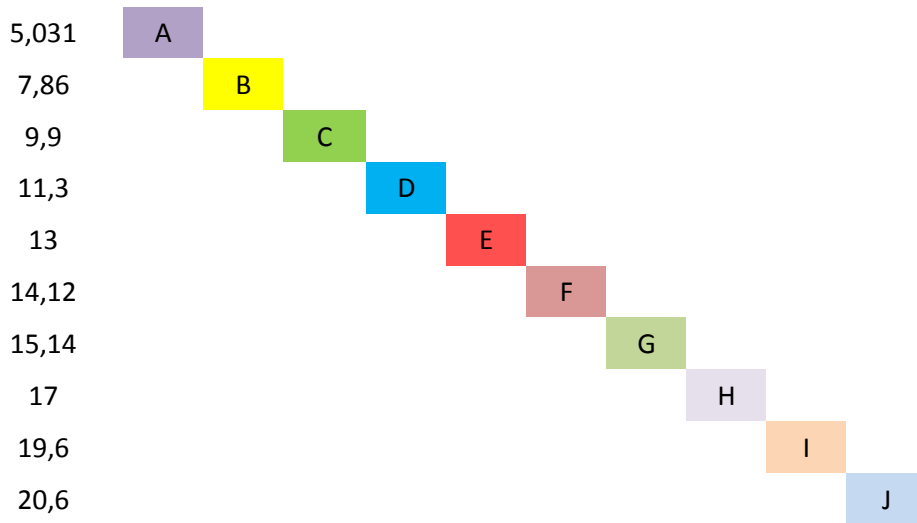


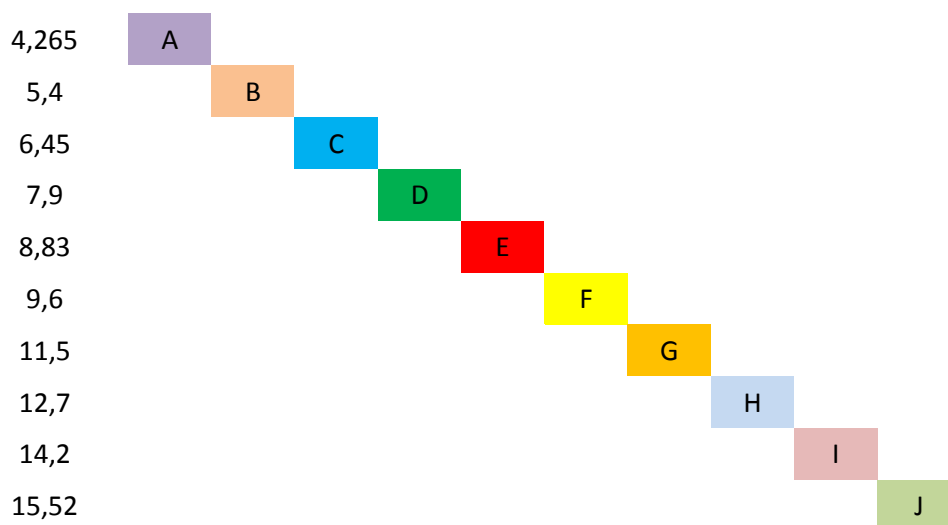
Figure III.12 Les valeurs de la profondeur d'usure (lubrifiant) en ensembles des essais

A la base de la figure (III.11) les variables linguistiques de la première sortie (la profondeur d'usure (sec)) est choisie comme qui constaté dans la figure (III.13).



**Figure III.13** Variables Linguistiques pour la profondeur d'usure (sec).

En se basant sur la figure (III.12) les variables linguistiques pour la deuxième sortie (la profondeur d'usure (lubrifiant)) est choisie comme il est indiqué dans la figure (III.14).



**Figure III.14** Variables Linguistiques pour la profondeur d'usure (lubrifiant).

### 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.

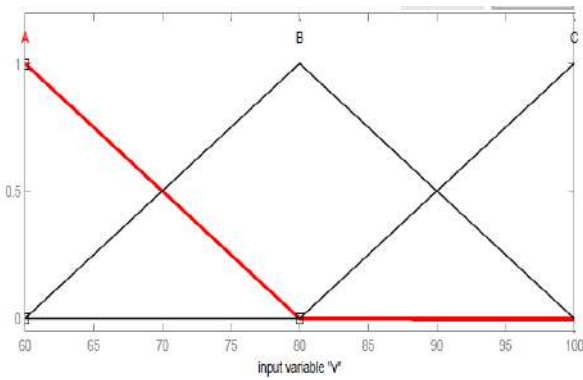
Les sous-ensembles flous sont utilisés soit pour modéliser l'incertitude et l'imprécision, soit pour représenter des informations précises sous forme lexicale assimilable par un système expert.

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

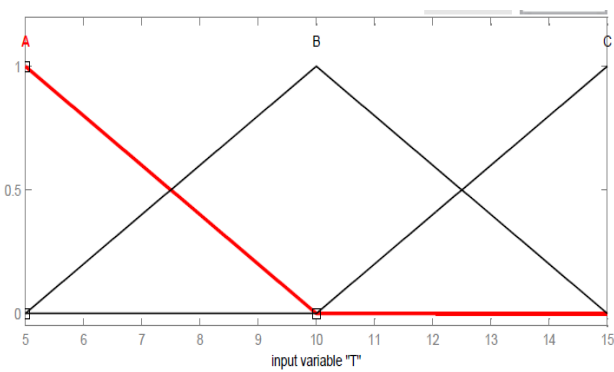
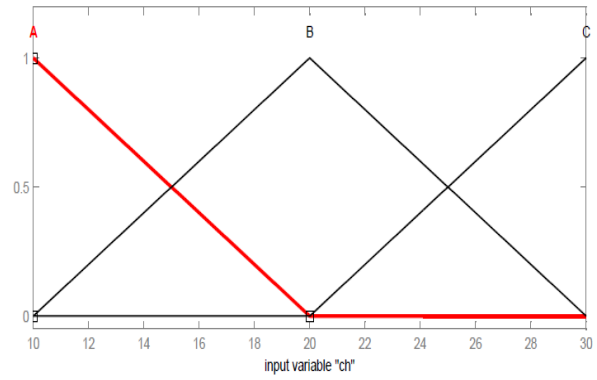
Les fonctions d'appartenance se présentent sous différentes formes, y compris triangulaire, trapézoïdale, gaussienne et sigmoïde. Dans la présente étude, les fonctions d'appartenance triangulaire, trapézoïdale et gaussienne ont été utilisées pour les paramètres d'entrée et le paramètre de sortie.

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

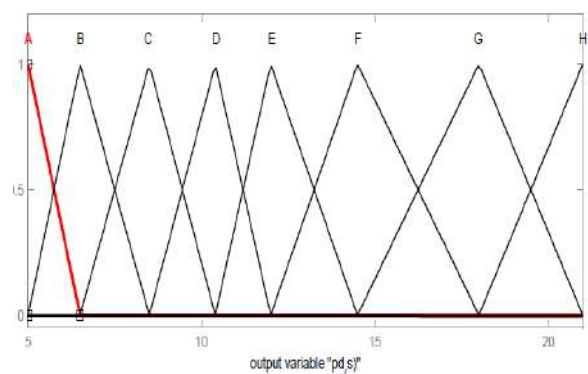
**Utilisation des fonctions d'appartenance triangulaires**

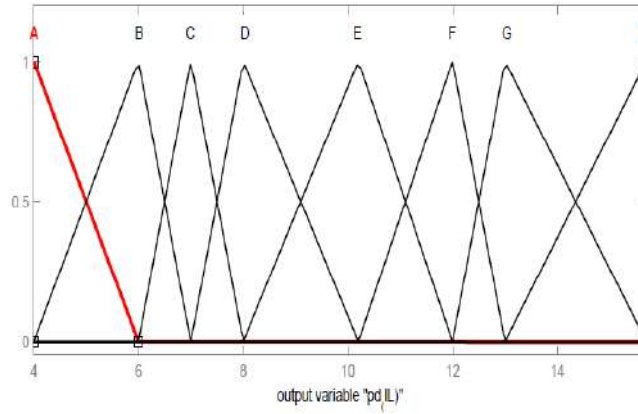


(A)



(B)

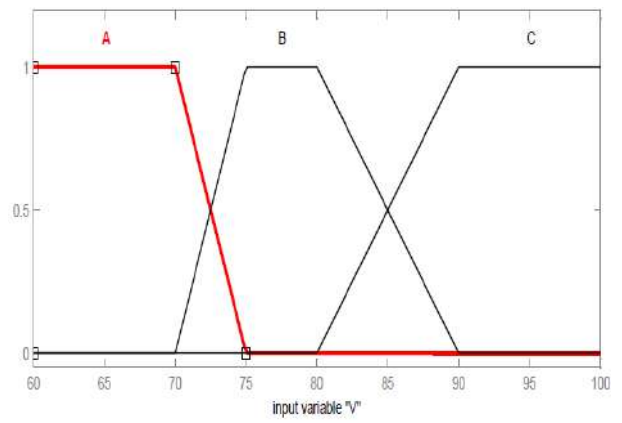
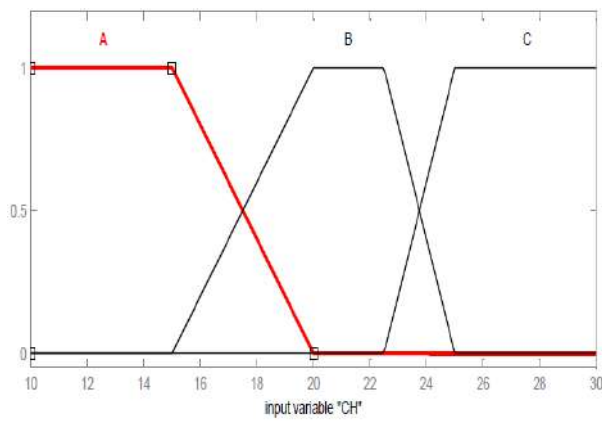




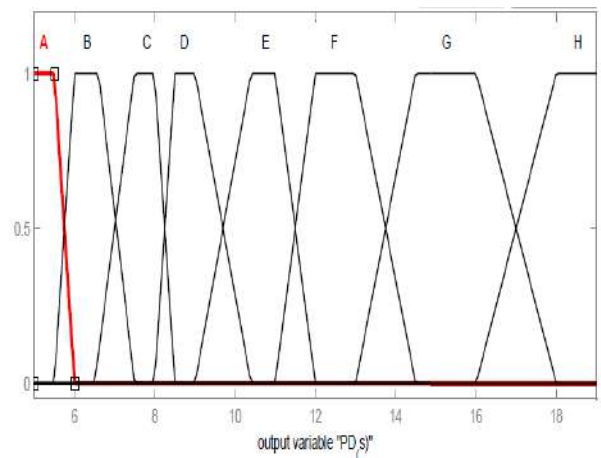
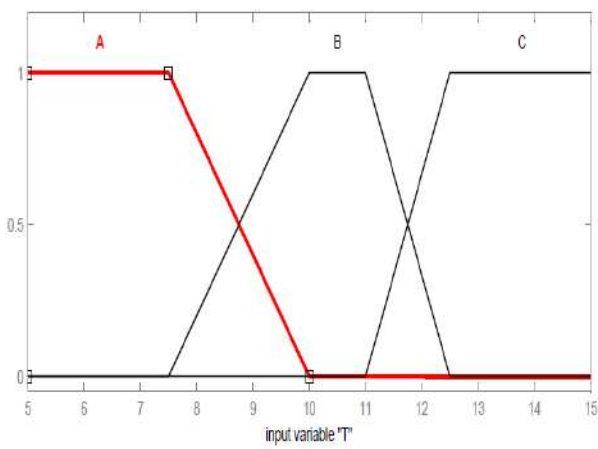
(C)

Figure III.15 Les fonctions d'appartenance triangulaires (A), (B), (C)

Utilisation des fonctions d'appartenance trapézoïdales

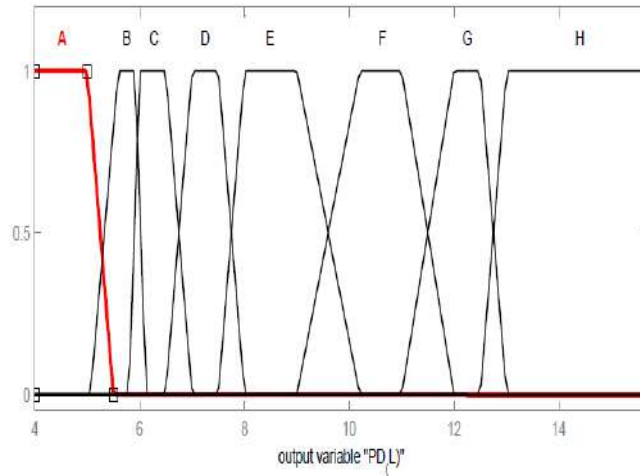


(A)



(B)

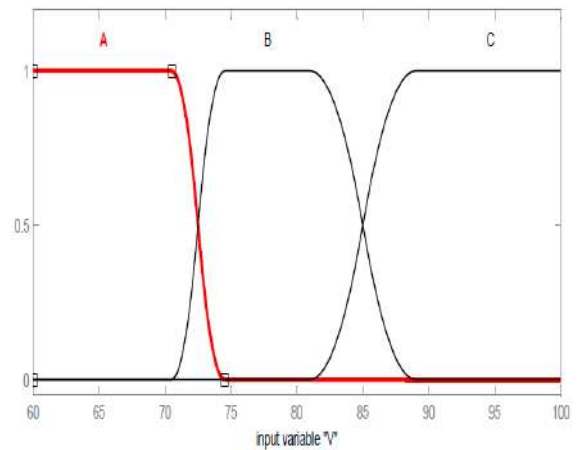
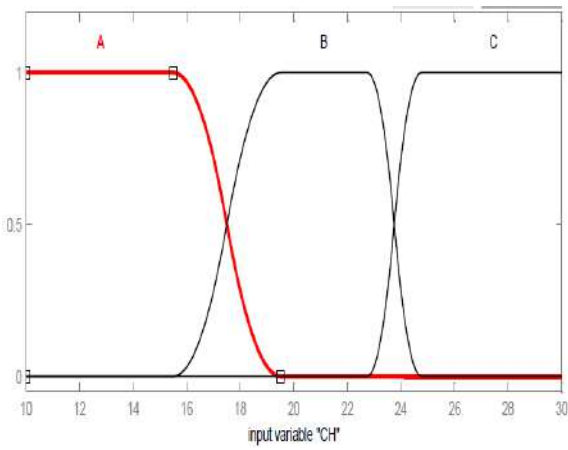




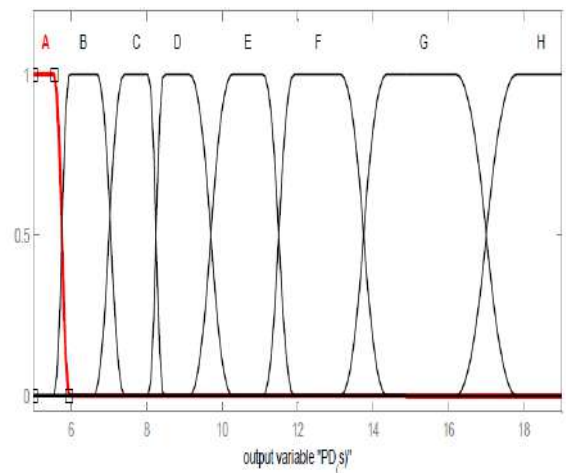
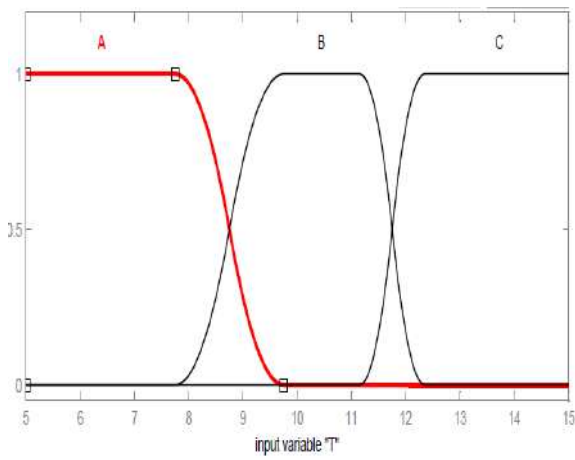
(C)

Figure III.16 Les fonctions d'appartenance trapézoïdale(A), (B), (C)

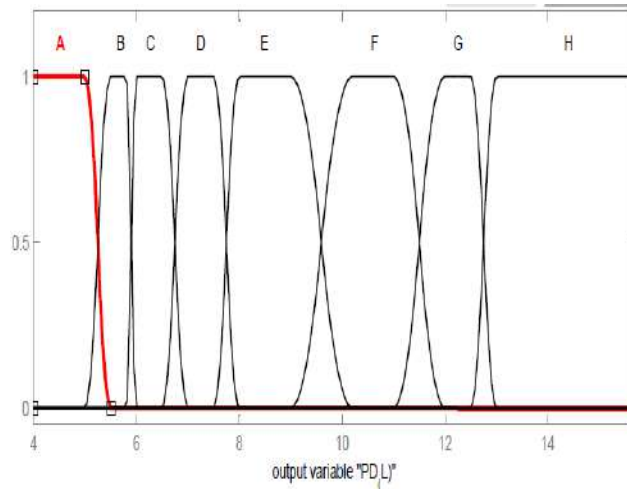
Utilisation des fonctions d'appartenance



(A)



(B)



(C)

Figure III.17 Les fonctions d'appartenance Pimf (A), (B), (C)

**III.3 Les règles floues**

Vingt-sept (27) règles floues ont été établies en fonction des conditions expérimentales indiquées dans les tableaux : III.1 et III.2 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 :

**a. Pour le composite Ni-P**

Si CH est (variable linguistique) et V est (variable linguistique) et t est (variable linguistique) Alors Pr .D est (variable linguistique)

L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau III.5

**Tableau III.5** Les règles floues pour le composite (Ni-P)

Essai	CH	V	t	Pr .D
1	A	A	A	A
2	A	A	B	C
3	A	A	C	E
4	A	B	A	A
5	A	B	B	B
6	A	B	C	E
7	A	C	A	B
8	A	C	B	D
9	A	C	C	D
10	B	A	A	F

11	B	A	B	H
12	B	A	C	J
13	B	B	A	G
14	B	B	B	I
15	B	B	C	I
16	B	C	A	G
17	B	C	B	H
18	B	C	C	H
19	C	A	A	J
20	C	A	B	K
21	C	A	C	L
22	C	B	A	J
23	C	B	B	J
24	C	B	C	K
25	C	C	A	H
26	C	C	B	J
27	C	C	C	K

**b. Pour le composite Ni-P-W**

Si CH est (variable linguistique) et V est (variable linguistique) et t est (variable linguistique) Alors Pr.D (S) est (variable linguistique) et Pr.D (L) est (variable linguistique)

L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau III.6

**Tableau III.6** Les règles floues pour le composite (Ni-P-W)

Essai	CH	V	t	Pr. D(S)	Pr. D(L)
1	A	A	A	A	A
2	A	A	B	B	B
3	A	A	C	C	B
4	A	B	A	B	A
5	A	B	B	C	C
6	A	B	C	D	F
7	A	C	A	E	D
8	A	C	B	F	F
9	A	C	C	G	G

10	B	A	A	C	D
11	B	A	B	D	E
12	B	A	C	E	F
13	B	B	A	C	F
14	B	B	B	D	G
15	B	B	C	E	G
16	B	C	A	E	E
17	B	C	B	H	H
18	B	C	C	I	I
19	B	A	A	D	C
20	C	A	B	E	E
21	C	A	C	F	F
22	C	B	A	C	E
23	C	B	B	E	G
24	C	B	C	H	H
25	C	C	A	H	G
26	C	C	B	I	I
27	C	C	C	J	J

### III.4 Résultats et discussion

Les résultats sont obtenus à partir de la dernière étape dans la logique floue (défuzzification). Cette étape dernière 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.

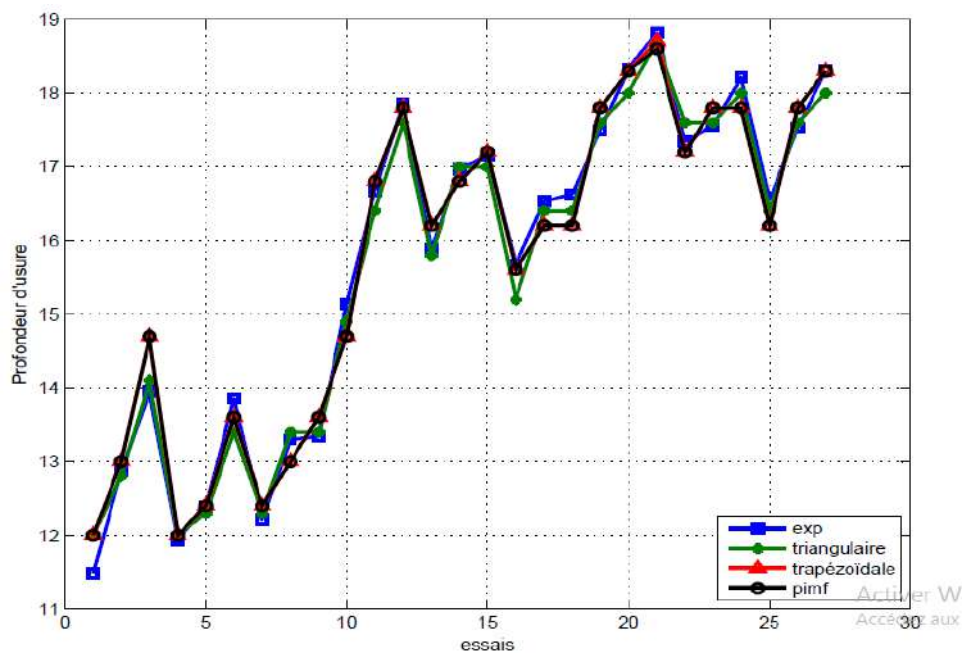
$$A = \frac{1}{N} \sum \left( 1 - \frac{|V_{ex} - V_p|}{V_{ex}} \right) \times 100\% \quad (\text{III-2})$$

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

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

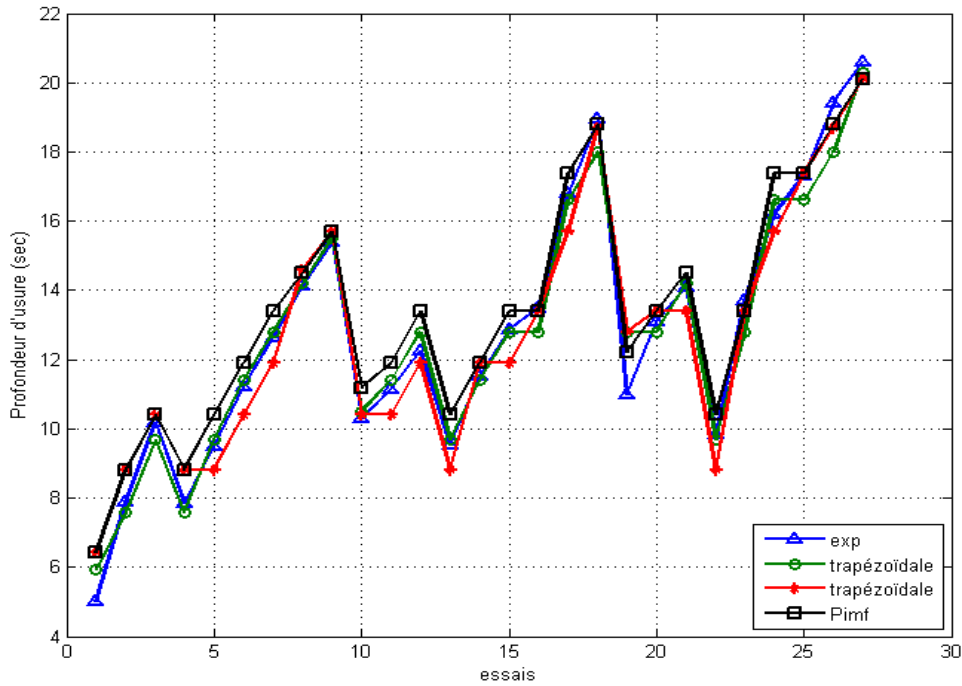
La figure ci-dessous illustre une comparaison directe entre les résultats obtenus avec les trois types de fonctions d'appartenance.

#### a. Pour Composite Ni-P



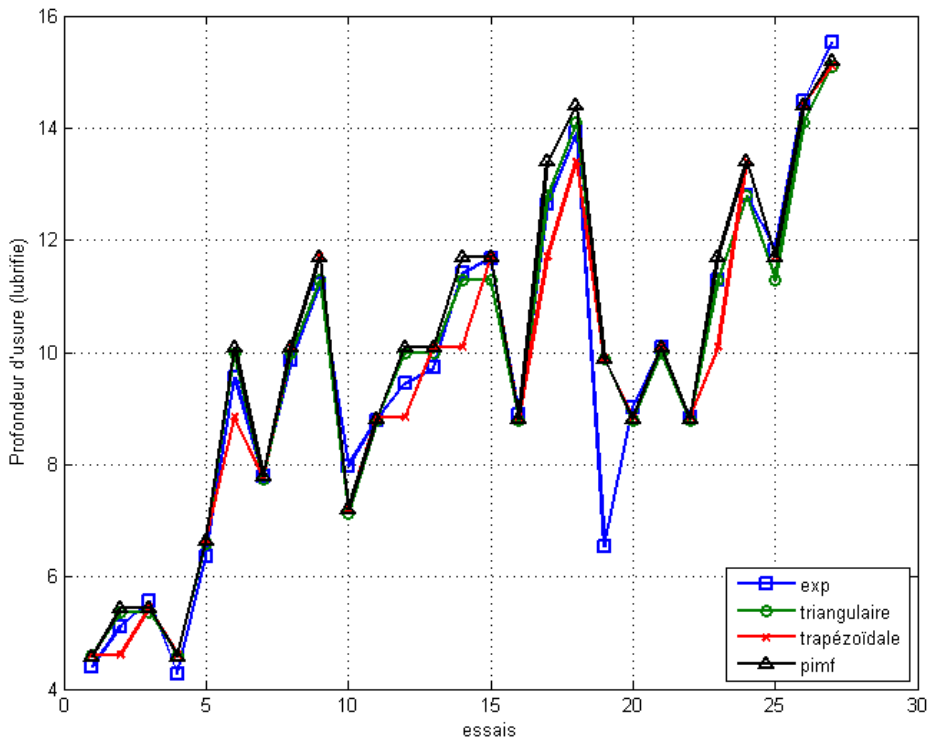
**Figure III.18** Variation de profondeur d'usure (trapézoïdale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essais

**b. Pour Composite Ni-P-W (sec)**



**Figure III.19** Variation de profondeur d'usure (sec) (trapézoïdale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essais

**c. Pour Composite Ni-P-W (Lubrifie)**



**Figure III.20** Variation de profondeur d'usure (l'lubrifie) (trapézoïdale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essais

Les figure (III.18) montre que la variation des trois sortie en utilisant les trois types de fonctions d'appartenance est presque la même. Donc, cette représentation ne nous permettons pas de choisir entre les trois types de fonctions.

Avec ce choix nous proposons d'utiliser l'écart-type pour définir les résultats les plus approchés aux résultats expérimentaux.

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

$$\sigma : \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_P - V_{Ex})^2} \quad (\text{III-3})$$

#### a. Pour Composite Ni-P

Pour : = N 27 on a :

En utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires l'écart-type est de l'ordre de 0.23

En utilisant des fonctions d'appartenance trapézoïdale l'écart-type est de l'ordre de 0.29

En utilisant des fonctions d'appartenance pimf l'écart-type est de l'ordre de 0.35

Donc les résultats proches aux résultats expérimentaux pour Ni-P sont celles obtenues avec des fonctions d'appartenance triangulaires.

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

Le tableau III.7 regroupe l'ensemble des résultats obtenus par notre système flou.

**Tableau III.7** Les résultats du système flou pour le composite Ni-P

Essai	Paramètres d'usure			Résultats de la profondeur d'usure			
	CH	V	t	Pr $D_{EX}$	Pr $D_P$	Erreur%	Précision%
1	50	60	5	11.84	12	4.529616725	95.47038328
2	50	60	10	12.87	12.8	0.543900544	99.45609946
3	50	60	15	13.95	14.1	1.075268817	98.92473118
4	50	70	5	11.93	12	0.586756077	99.41324392
5	50	70	10	12.4	12.3	0.806451613	99.19354839
6	50	70	15	13.85	13.4	3.249097473	96.75090253
7	50	80	5	12.21	12.3	0.737100737	99.26289926
8	50	80	10	13.3	13.4	0.751879699	99.2481203
9	50	80	15	13.34	13.4	0.449775112	99.55022489
10	75	60	5	15.14	14.9	1.585204756	98.41179524

11	75	60	10	16.67	16.4	1.619676065	98.38032394
12	75	60	15	17.86	17.6	1.455767077	98.54423292
13	75	70	5	15.89	15.8	0.5663939558	99.43360604
14	75	70	10	16.97	17	0.176782557	99.82321744
15	75	70	15	17..16	17	0.932400932	99.06759907
16	75	80	5	15.67	15.2	2.999361838	97.00063816
17	75	80	10	16.53	16.4	0.786448881	99.21355112
18	75	80	15	16.62	16.4	1.323706378	98.67629362
19	100	60	5	17.5	17.6	0.571428571	99.42857143
20	100	60	10	18.33	18	1.800327332	98.19967267
21	100	60	15	18.82	18.7	0.637619554	99.36238045
22	100	70	5	17.34	17.6	1.499423299	98.5005767
23	100	70	10	17.56	17.6	0.227790433	99.77220957
24	100	70	15	18.22	18	1.207464325	98.79253568
25	100	80	5	16.55	16.4	0.906344411	99.09365559
26	100	80	10	17.53	17.6	0.399315459	99.60068454
27	100	80	15	18.31	18	1.6930639	98.773393383
<b>La précision=98.77%</b>							

### b. Pour Composite Ni-P-W

Pour : = N 27 on a :

En utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires l'écart-type est de l'ordre de 0.61

En utilisant des fonctions d'appartenance trapézoïdale l'écart-type est de l'ordre de 0.75

En utilisant des fonctions d'appartenance pimf l'écart-type est de l'ordre de 0.73

Donc les résultats proches aux résultats expérimentaux pour Ni-P-W sont celles obtenues avec des fonctions d'appartenance triangulaires.

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



**Tableau III.8** Les résultats du système flou pour le composite Ni-P-W (sec)

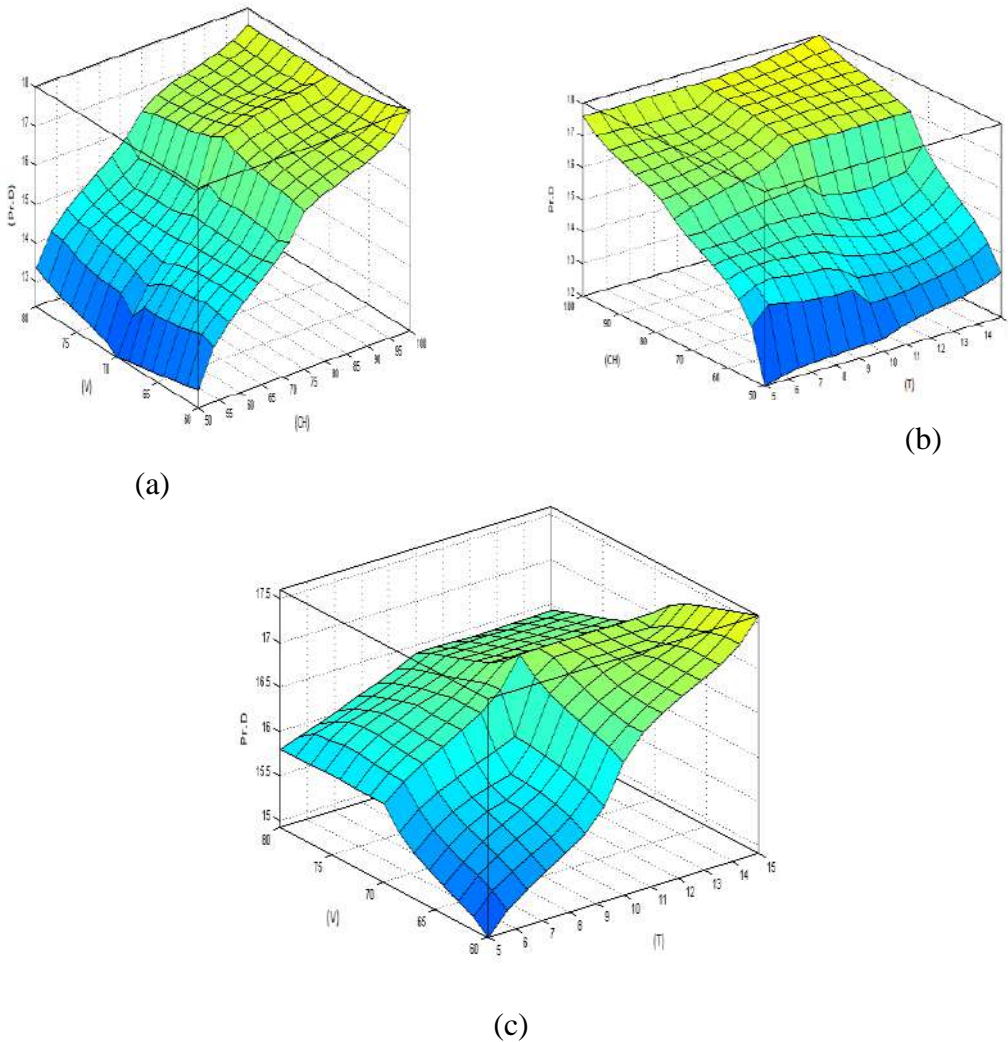
Essai	Paramètres d'usure			Résultats de la profondeur d'usure			
	CH	V	t	Pr $D_{EX}$	Pr $D_P$ (sec)	Erreur%	Précision%
1	10	60	5	5.031	5.92	17.670443	82.32955675
2	10	60	10	7.887	7.6	3.6388995	96.36110055
3	10	60	15	10.196	9.69	4.962730.5	95.0372692
4	10	80	5	7.849	7.6	3.1723786	96.82762135
5	10	80	10	9.486	9.69	2.1505376	97.84946237
6	10	80	15	11.203	11.4	1.7584576	98.24154244
7	10	100	5	12.649	12.8	1.1937703	98.80622974
8	10	100	10	14.14	14.2	0.4243281	99.57567158
9	10	100	15	15.407	15.5	0.603627	99.39637827
10	20	60	5	10.283	10.5	2.1102791	97.8897209
11	20	60	10	11.134	11.4	2.3890785	97.6109215
12	20	60	15	12.239	12.8	4.5837078	95.41629218
13	20	80	5	9.55	9.69	1.4659686	98.5340341
14	20	80	10	11.509	11.4	0.9470849	99.05291511
15	20	80	15	12.866	12.8	0.5129799	99.48702005
16	20	100	5	13.481	12.8	5.051554	94.94844596
17	20	100	10	16.861	16.6	1.284491	98.71550904
18	20	100	15	18.946	18	4.9931384	95.00686161
19	30	60	5	10.979	12.8	16.58621	83.41378996
20	30	60	10	13.1	12.8	2.2900753	97.70992366
21	30	60	15	14.088	14.2	0.7950028	99.20499716
22	30	80	5	9.825	9.69	1.3740458	98.6259542
23	30	80	10	13.718	12.8	6.6919376	93.3080624
24	30	80	15	16.21	16.6	2.4059223	97.59407773
25	30	100	5	17.318	16.6	4.1459753	95.85402471
26	30	100	10	19.423	18	7.3263656	92.67363435
27	30	100	15	20.602	20.3	1.4658771	98.5341229
<b>La précision=96.22%</b>							

**Tableau III.9** Les résultats du système flou pour le composite Ni-P-W (lubrifié)

Essai	Paramètres d'usure			Résultats de la profondeur d'usure			
	CH	V	T	Pr $D_{EX}$	Pr $D_P$ (lub)	Erreur%	Précision%
1	10	60	5	4.398	4.610	4.8303	95.17
2	10	60	10	5.114	5.370	35.0058	94.99
3	10	60	15	5.559	5.370	3.3998	96.60
4	10	80	5	4.265	4.610	8.0890	91.91
5	10	80	10	6.370	6.580	3.2967	96.70
6	10	80	15	9.552	9.980	4.4807	95.51
7	10	100	5	7.803	7.730	0.9355	99.06
8	10	100	10	9.859	9.980	1.2273	98.77
9	10	100	15	11.20	11.30	0.8568	99.14
10	20	60	5	7.982	7.140	10.5487	89.45
11	20	60	10	8.795	8.780	0.1705	99.82
12	20	60	15	9.439	9.980	5.7315	94.26
13	20	80	5	9.723	9.980	2.6432	97.35
14	20	80	10	11.41	11.30	0.9987	99.00
15	20	80	15	11.67	11.30	3.2037	96.79
16	20	100	5	8.890	8.780	1.2373	98.76
17	20	100	10	12.64	12.80	1.2177	98.78
18	20	100	15	13.92	14.10	1.2858	98.71
19	30	60	5	6.534	9.890	51.3621	48.63
20	30	60	10	9.012	8.780	2.5743	97.42
21	30	60	15	10.08	9.980	1.0313	98.96
22	30	80	5	8.837	8.780	0.6450	99.35
23	30	80	10	11.29	11.30	0.0088	99.99
24	30	80	15	12.78	12.80	0.1329	99.86
25	30	100	5	11.81	11.30	4.3507	95.64
26	30	100	10	14.47	14.10	2.5974	97.40
27	30	100	15	15.52	15.10	2.7061	97.29
						<b>La précision=95.38%</b>	

### III.4.3 Représentation schématique des résultats

#### a. Pour Composite Ni-P

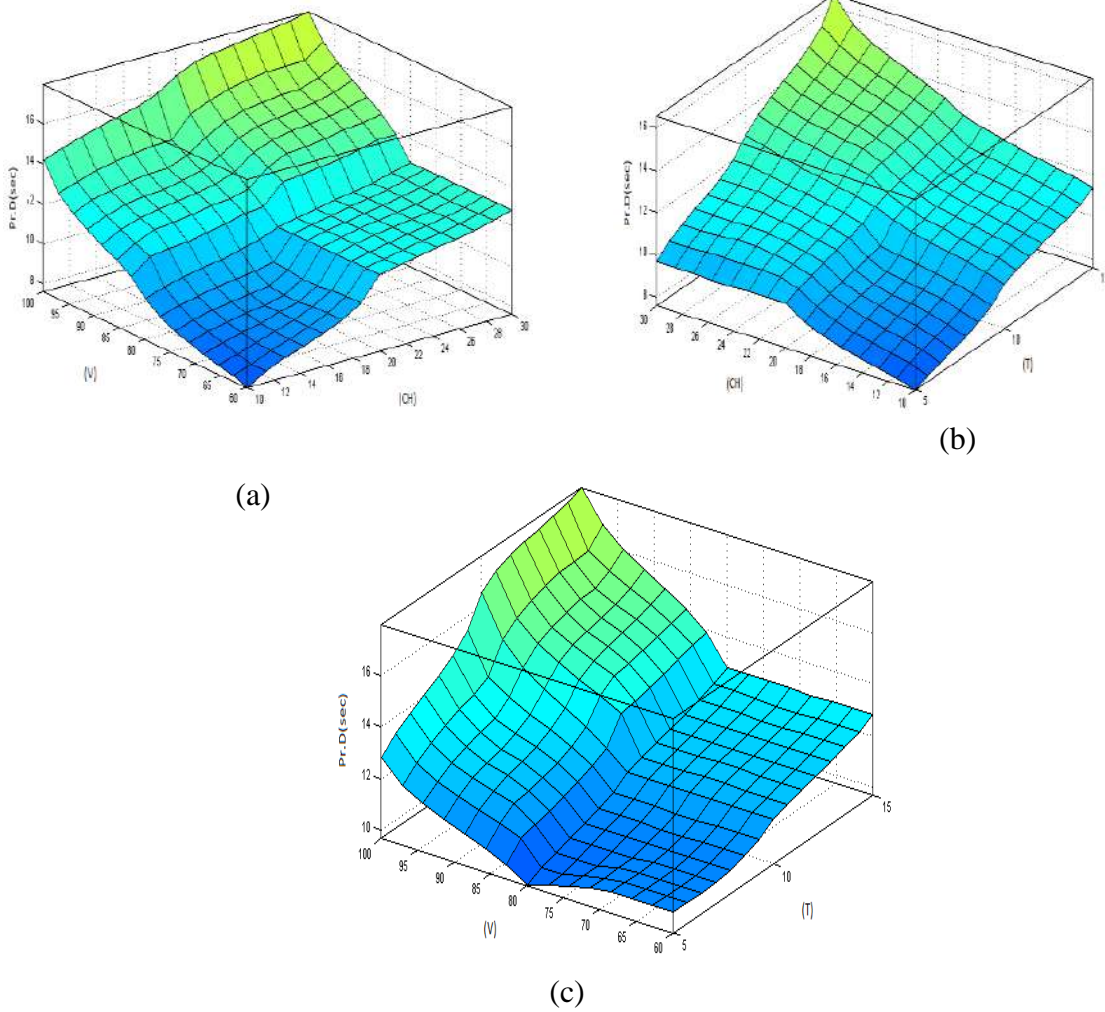


**Figure III.21** surface en trois dimensions de la variation de la profondeur d'usure en fonction (a) la charge et la vitesse (b) la charge et le temps et (c) la vitesse et le temps.

La figure III.21 montre l'effet de la charge (CH), la vitesse (V) et le temps (t) sur la profondeur d'usure de dépôt composite Ni-P.

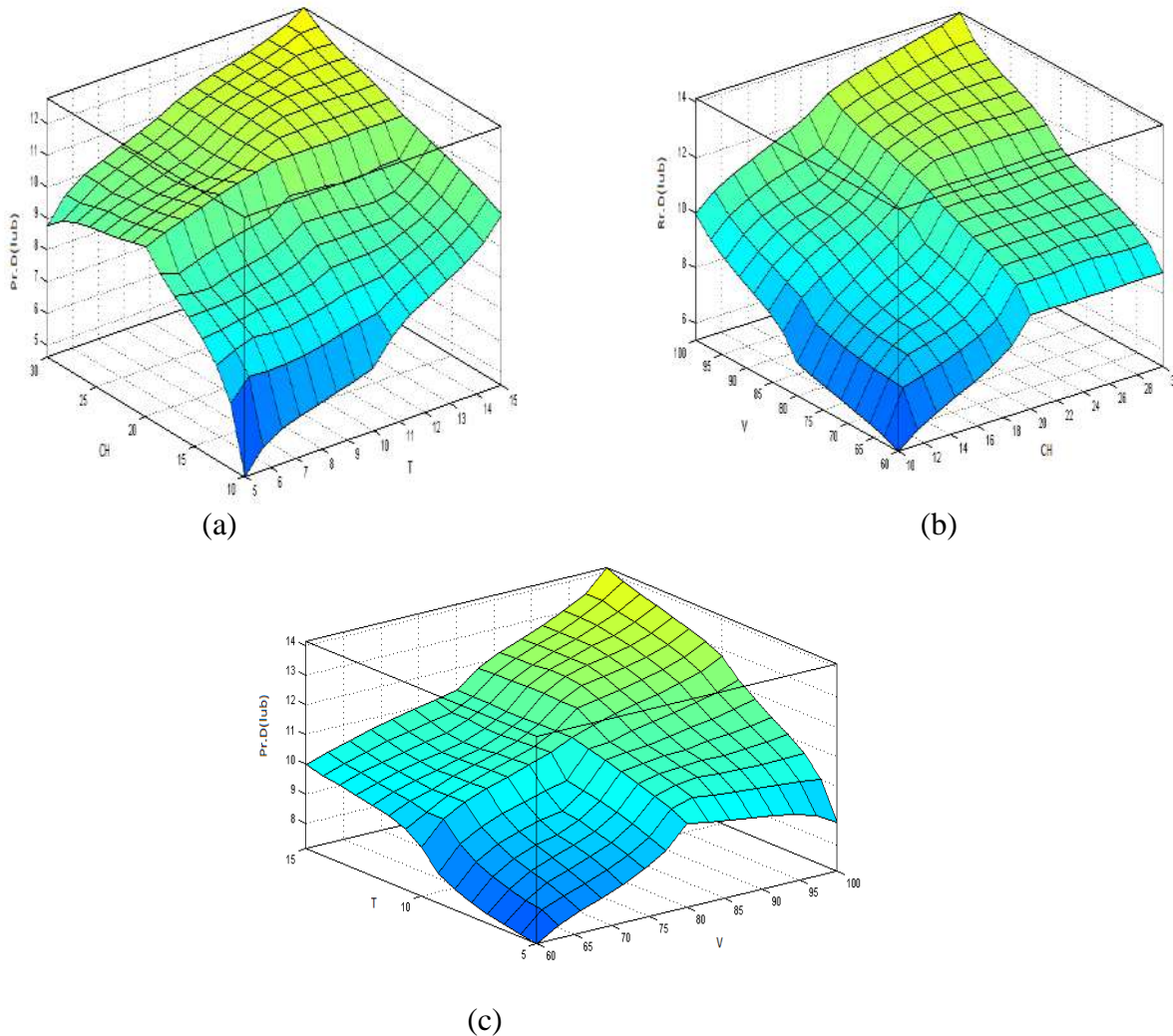
Pour des valeurs plus élevées de charge et de vitesse, on observe une usure plus importante de dépôt Ni-P (figure III.21 (a)). Des tendances similaires sont observées pour la variation de la profondeur d'usure avec la charge et le temps, ainsi que la vitesse et le temps sur les figures III.21(b), (c) respectivement.

En conséquence, la combinaison entre les paramètres d'usure conduit également à une valeur maximale de la profondeur d'usure de dépôt composite Ni-P.

**b. Pour Composite Ni-P-W (sec)**

**Figure III.22** Tracés de surface montrant la variation de la profondeur d'usure avec (a) la charge en fonction de la vitesse, (b) la charge en fonction du temps et (c) la vitesse en fonction du temps dans des conditions (sèc)

### c. Pour Composite Ni-P-W (lub)



**Figure III.23** Tracés de surface montrant la variation de la profondeur d'usure avec (a) la charge en fonction de la vitesse, (b) la charge en fonction du temps et (c) la vitesse en fonction du temps dans des conditions (lubrifiées).

L'analyse de ces surfaces (III .22 et III.23) montre que la profondeur d'usure augmente avec l'augmentation des paramètres d'usure (charge, vitesse, temps).

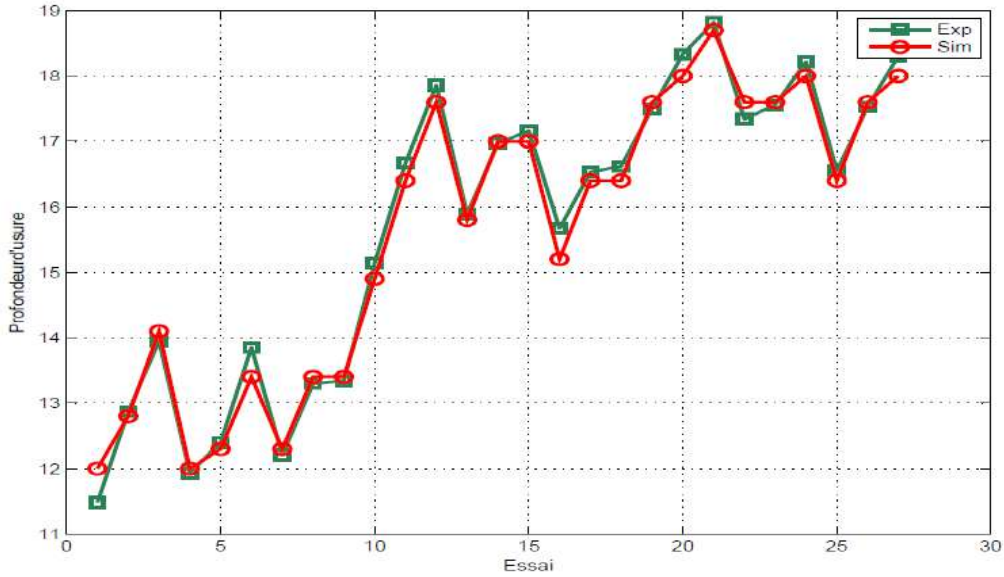
L'analyse des deux figures conduit à conclure que La profondeur d'usure à l'état lubrifié est inférieure à l'état sec, donc le comportement tribologique de dépôt composite Ni-P-W est amélioré dans les conditions lubrifiées.

#### III.4.4 Validation des résultats

Les Figure (III.24) et (III.25) lreprésentent une superposition des deux courbes de variation de la dureté du revêtement : expérimentale et prédite respectivement.

**a. Composite Ni-P**

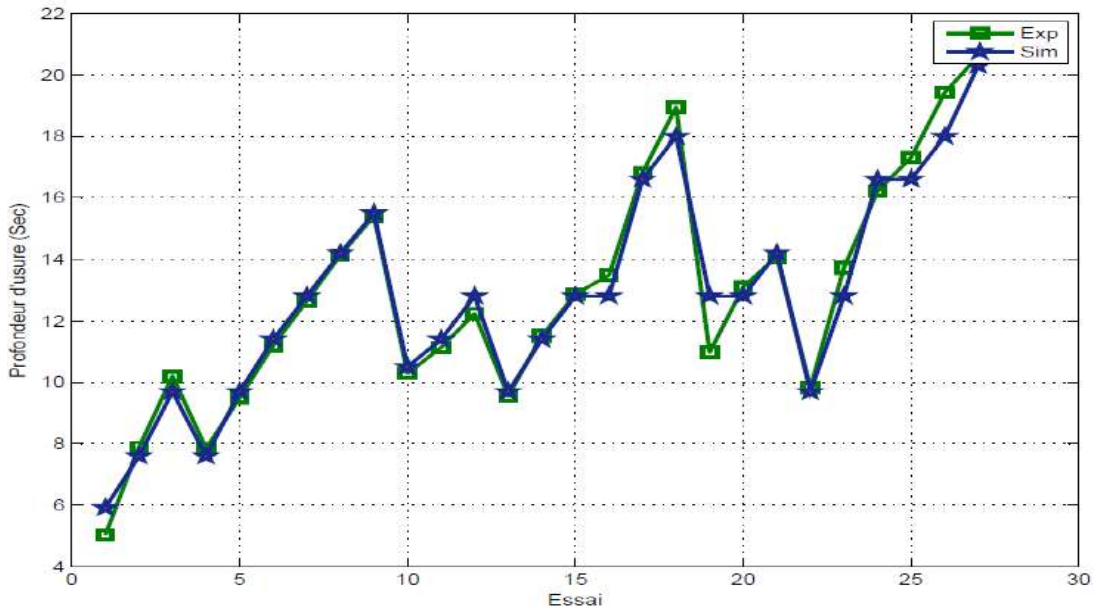
Les relations entre les valeurs de simulation et les valeurs expérimentales sont représentés sur la figure (III.24).



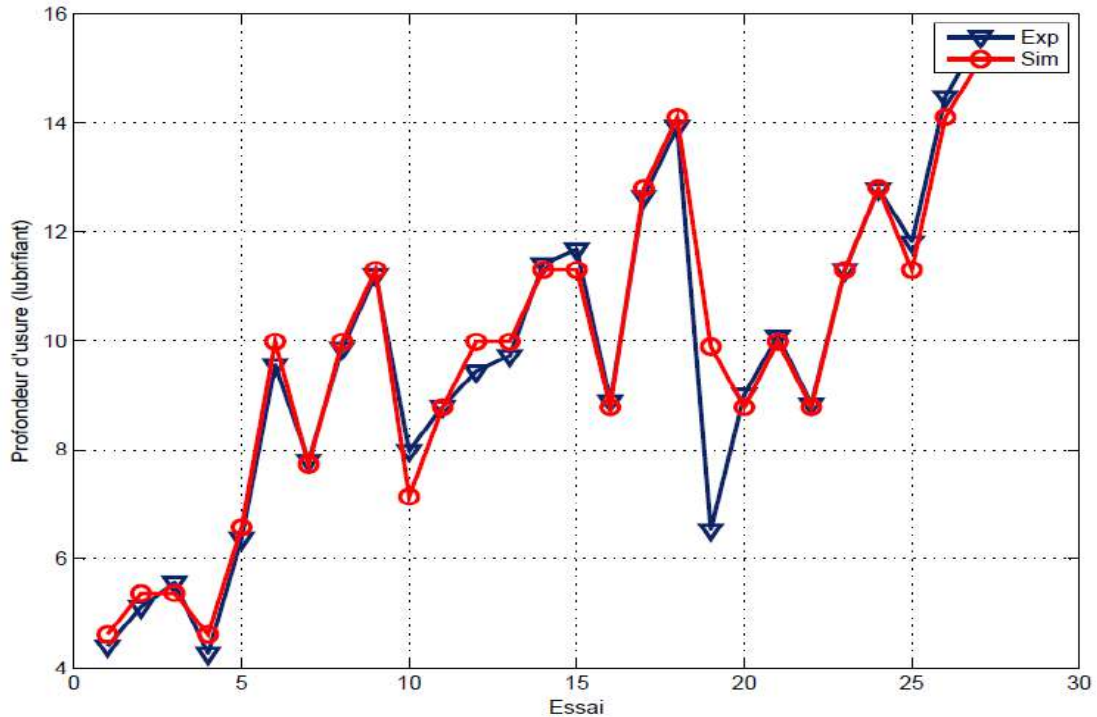
**Figure III.24** les courbes des résultats expérimentaux et de simulation Ni-P

Cette figure indique une corrélation très étroite entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites floues

**b. Composite Ni-P-W**



(A)



(B)

**Figure III.25** Les courbes des résultats expérimentaux et de simulation Ni-P-W (A) sec et (B) lubrifié.

Le résultat obtenu à partir la figure (III.25) confirme que la modélisation par la logique floue peut être utilisée efficacement pour prédire la profondeur d'usure de revêtement.

Afin de valider nos résultats le pourcentage d'erreur pour été calculé et la précision du modèle de la logique floue a été déterminé.

Les tableaux III.7, III.8, III.9 montrent également que la précision du modèle flou était de 98.77% pour le composite Ni-P, 96.22% pour le composite Ni-P-W (sec) et 95.38% pour le composite Ni-P-W (lubrifié).le pourcentage de précisions montre que le modèle proposé peut être utilisé avec succès pour prédire la profondeur d'usure des revêtements composites Ni-P et Ni-P-W.

### **III.5 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents résultats issus d'un modèle flou en se basant sur un travail expérimental regroupés dans les tableaux III.1 et III.2 obtenues depuis les références [24], [25].

Les résultats trouvés montrent clairement l'effet des paramètres tribologique sur la profondeur d'usure des revêtements Ni-P et Ni-P-W.



# *Conclusion Générale*

## Conclusion Générale

L'objectif de ce travail concerne la prédiction de la profondeur d'usure des revêtements Ni-Pet Ni-P-W électrolytique en fonction des paramètres tribologique.

L'étude que nous avons menés nous a permis de conclure que :

- Le tungstène (W) joue un rôle impératif sur la profondeur d'usure, de sorte que la profondeur d'usure du revêtement Ni-P-W inférieure à la profondeur d'usure du revêtement Ni-P.
- Le modèle flou utilisé, pour la prédiction des paramètres d'usure des composites Ni-Pet Ni-P-W, ont montré une bonne concordance entre les résultats de simulations et les résultats expérimentaux.
- Les valeurs prédites sont en accord avec la profondeur d'usure réelle avec un pourcentage d'erreur moyen de 1.23% et sont bien associées avec les valeurs expérimentales.

## *Références bibliographiques*

- [1] **Mekkaoui**, Élaboration et Caractérisation des Revêtements de Nickel Déposés Par Voie Electrochimique, Mémoire Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012- 2013.
- [2] **E. Bernard**, Adhérence, mécanique et tribologie des revêtements composites Ni-P – Talc multifonctionnels à empreinte écologique réduite, Thèse Doctorat, Science et Génie des Matériaux, 2006
- [3] **N. Belhamra**, Réalisations et caractérisations de revêtements durs à base de nitrures et de carbures : Applications à l’usinage des métaux, Thèse Doctorat, Sciences des matériaux, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [4] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux> .
- [5] **F. Ghanem**, Elaboration et Caractérisation de films de cuivre par la méthode de dépôt chimique dynamique, Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [6] **R. Chepuri, et al**, Chemical and electrochemical depositions of platinum group metals and their applications, Central Electrochemical Research Institute, India, 2004.
- [7] . <https://www.sharrettsplating.com/plating-methods/electroless-plating>  
ELECTROLESS PLATING
- [8] <https://www.thomasnet.com/products/electroless-nickel-plating-61650107-1.html> Electroless Nickel Plating Suppliers..
- [9] **K.Taliouine**, Effets des paramètres d’électrodéposition sur les dépôts de chrome, Mémoire Master Professionnel, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014/2015
- [10] **A. Benaissa**, L'effet de densité du courant sur l'électrodéposition d'un dépôt composite Zinc-Cobalt, Mémoire Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [11] **Journal of Applied Electrochemistry** 33: 807–816, 2003. 807 \_ Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 2003.
- [12] **Y. Ben Amor, et al**, **Dépôt** chimique de nickel : Synthèse bibliographique *Matériaux & Techniques* 102, 101 (2014).
- [13] **Kanigen, et al**, Nickelage chimique, Procédé de nickelage chimique, Atela, 2009.
- [14] <https://www.hindawi.com/journals/jcoat/2013/608140/> .
- [15] **V. Ijeri, et al**, The Electroless Deposition of Nickel-Phosphorus-Tungsten

- Alloys, Mumbai, India, 2014.
- [16] **H. Merabti**, Etude Des systèmes flous à intervalle, Mémoire de magistère, Université mentouri de constantine, 2008.
- [17] **A. Chiba**, Commande de la machine asynchrone a double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle, Thèse Doctorat, En électro technique, Université de Batna, 2010
- [18] **Z. Zouaoui**, Commande des convertisseurs statiques DC/DC Par la logique floue, Mémoire magistère, Electronique contrôle, Université de Batna, 2007.
- [19] **Y. El-Shayeb**, Apport de la logique floue à l'évaluation de l'aléa « Mouvement de Terrain des sites géotechniques » : Propositions pour une méthodologie générale55...3
- [20] **M. Laamayad Tahar** Commande Optimale d'une Machine Asynchrone Apport de La Logique Floue, Mémoire magistère, Commande Electrique, Université de Batna, 2008.
- [21] **N. Talbi** Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des Approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Non linéaires, Thèse Doctorat, Contrôle des Systèmes, Université Constantine 1, 201
- [22] **D. Mokeddem**, Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques, Thèse Doctorat, Sciences en Electronique, Université ferhat abbas de setif, 2010.
- [23] **F. Harrouch**, Application de la logique floue aux machines tournantes, Mémoire magistère, Mécanique appliquée, Université ferhat abbas-setif.
- [24] **A. Mukhopadhyay et al**, Wear Analysis of Electroless Ni-P Coating Under Lubricated Condition Using Fuzzy Logic, Department of Mechanical Engineering, Jadavpur University, Kolkata – 700032, India, 2016.
- [25] **A. Mukhopadhyay et al**, Optimization of wear behavior of electroless Ni-P-W coating under dry and lubricated conditions using genetic algorithm (GA), Department of Mechanical Engineering, Jadavpur University, Kolkata 700032, India, 2016.

## Résumé

Dans cette étude, nous avons utilisé la technique de la logique floue pour prédire la profondeur d'usure des revêtements Ni-P et Ni-P-W électrolytiques dans des conditions lubrifiées. Les résultats trouvés montrent un bon accord entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites obtenues par le modèle flou, les pourcentages d'erreur et les précisions étaient 1.23%, 98.77% pour le revêtement Ni-P et 4.62%, 95.38% pour le revêtement Ni-P-W.

**Mots clés :** la logique floue, usure, revêtement Ni-P, revêtement Ni-P-W

### Abstract

In this study, we used the fuzzy logic technique to predict the wear depth of electrolytic Ni-P and Ni-P-W coatings under lubricated conditions. The results found show a good agreement between the experimental results and the predicted values obtained by the fuzzy model, the percentages of error and the accuracies were 1.23%, 98.77% for the Ni-P coating and 4.62%, 95.38% for the coating Ni-P-W.

**Keywords:** fuzzy logic, wear, Ni-P coating, Ni-P-W coating .

### ملخص

في هذه الدراسة ، استخدمنا المنطق الضبابي للتنبؤ بعمق التآكل الإلكتروليتي Ni-P و Ni-P-W تحت ظروف مشحمة . تظهر النتائج التي تم العثور عليها إتفاقا جيدا بين النتائج التجريبية و القيم المتوقعة التي تم الحصول عليها من خلال النموذج الضبابي ، و نسب الخطأ و الدقة كانت % 1.23 ، 98.77 % ، للطلاء Ni-P و % 4.62 ، 95.38 % للطلاء Ni-P-W.

**الكلمات المفتاحية :** المنطق الضبابي ، التآكل ، طلاء Ni-P ، طلاء Ni-P-W .