

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



Mémoire

MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences Techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Présenté par : Djouhri Mohamed Seddik

Chiba El Hocine

Thème

**Effets des Paramètres d'Electrodéposition sur
les Revêtements Composites Ni-P-Al₂O₃**

Soutenu le : 29/05/2017

Devant le jury

ABDELKRIM Mourad	MCB	Université Kasdi Merbah Ouargla	Président
BELLOUFI Abderrahim	MCA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Encadreur
KOURAS Sidali	MAA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examineur

Année Universitaire : 2016/2017

Remerciement

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

*Nous tenant à exprimer toute nos gratitude et reconnaissance à notre encadreur **Dr. Abderrahim Belloufi** 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 **Dr.ABDELKRIM Mourad** 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.KOURAS Sidali** 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

Nous tient à dédier ce modeste travail à :

À nos parents.

À nos frères,

À nos sœurs,

À nos familles,

À tous nos amis et nos collègues.

Table des Matières

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

Chapitre I

Corrosion et méthodes de protection

I.1 Introduction	4
I.2 Mécanismes de la corrosion	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Le mécanisme	4
I.3 Les formes de la corrosion.....	4
I.3.1 La corrosion uniforme.....	5
I.3.2 La corrosion par piqures.....	5
I.3.3 La corrosion galvanique.....	5
I.3.4 Corrosion érosion.....	5
I.3.5 La corrosion sous contrainte	6
I.3.6 La corrosion caverneuse.....	6
I.3.7 La corrosion intergranulaire.....	6
I.4 Les facteurs de la corrosion.....	7
I.4.1 Facteurs définissant le réactif.....	7
I.4.2 Facteurs définissant le métal ou l'alliage.....	7
I.4.3 Facteurs définissant les conditions d'emploi	7
I.4.4 Facteurs dépendant du temps	7
I.5 Moyens de protection contre la corrosion	8
I.5.1 Prévention par un choix judicieux des matériaux	8
I.5.2 Protection par la géométrie des pièces	8
I.5.3 Emploi d'inhibiteurs de corrosion	9

I.5.4	Protection électrochimique.....	9
I.5.5	Protection par revêtements.....	10
I.6	Conclusion.....	11

Chapitre II

Généralités sur l'électrodéposition

II.1	Introduction	12
II.1.1	Définition.....	12
II.1.2	Electrolyse	13
II.1.3	Loi de Faraday	13
II.1.4	Relation de Nernst (potentiel de Nernst)	13
II.2	Mécanismes réactionnels de formation des dépôts métalliques	14
II.2.1	Mécanismes d'une réaction électrochimique	14
II.3	Facteurs et paramètres d'un dépôt électrolytique	15
II.3.1	La température	15
II.3.2	Agitation de l'électrolyse.....	15
II.3.3	PH du bain	15
II.3.4	La densité de courant	16
II.3.5	Conductibilité de l'électrolyte	16
II.3.6	Nature de l'électrolyte	16
II.3.7	Concentration de l'électrolyte	16
II.3.8	Métal de base	17
II.4	Propriétés des dépôts électrolytiques de Ni-P-Al ₂ O ₃	17
II.4.1	Propriétés et structure des dépôts	17
II.4.2	Propriétés de Nickel.....	17
II.4.3	Caractéristiques spécifiques de l'alumine	18
II.4.4	Caractéristiques spécifiques de phosphore	19
II.5	Contrôle des revêtements par dépôt électrolytique.....	20

II.5.1	Mesure de l'adhérence au substrat.....	20
II.5.2	Mesure de l'épaisseur.....	21
II.5.3	Etude de la tenue à la corrosion.....	21
II.5.4	Méthode de la masse perdue.....	21
II.5.5	Méthode potentiodynamique.....	21
II.6	Avantage et inconvénients des dépôts électrolytiques.....	22
II.6.1	Avantages.....	22
II.6.2	Inconvénients.....	22
II.7	Dispositifs expérimentaux.....	22
II.7.1	Produits chimiques.....	22
II.7.2	Matérielles utilisés.....	23
II.7.3	Cellules électrochimiques et électrolytes.....	23
II.8	Revue de littérature.....	24
II.8.1	Revêtements composites Ni-Al ₂ O ₃	24
II.9	Conclusion.....	24

Chapitre III

La logique floue

III.1	Introduction.....	25
III.2	La logique floue.....	25
III.3	L'idée de la logique floue.....	25
III.4	Principe de la logique floue.....	25
III.5	L'utilisation de la logique floue.....	26
III.6	La logique classique et la logique floue.....	26
III.7	Propriétés des ensembles flous.....	27
III.7.1	Egalité.....	27
III.7.2	Inclusion.....	27
III.7.3	Support.....	27

III.7.4	Hauteur	27
III.7.5	Noyau	27
III.7.6	Cardinal	27
III.8	Variable linguistique	27
III.9	Fonction d'appartenance.....	28
III.9.1	Différentes formes pour les fonctions d'appartenance	28
III.10	Les opérateurs de la logique floue.....	30
III.10.1	Opérateur ET	30
III.10.2	Opérateur OU	31
III.11	Command floue	31
III.11.1	Fuzzification	32
III.11.2	Moteur d'inférence	32
III.11.3	Défuzzification	32
III.12	Conclusion.....	33

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1	Introduction	34
IV.2	Procédure et données expérimentales.....	34
IV.2.1	Système flou.....	36
IV.2.2	Modélisation floue.....	37
IV.3	Les règles floues	46
IV.4	Résultats et discussion	48
IV.4.1	Etude de la précision et de l'erreur du système flou.....	49
IV.4.2	Comparaison entre les résultats obtenus avec des fonctions d'appartenance trapézoïdales, triangulaires et gaussienne.....	49
IV.4.3	Représentation schématique des résultats	52
a.	Composite	52
b.	Composite Ni-P-Al ₂ O ₃	54

IV.4.4	Discussion des résultats.....	55
IV.4.5	Validation des résultats	57
IV.4.6	Comparaissant entre Ni-Al ₂ O ₃ et Ni-P-Al ₂ O ₃	58
IV.5	Conclusion	59
	Conclusion Générale	60
	Bibliographie.....	62

Liste des Figures

Chapitre I

Corrosion et méthodes de protection

Figure I.1	Corrosion uniforme d'une chicane en acier.....	5
Figure I.2	Corrosion par piqûres d'un acier inoxydable.....	5
Figure I.3	Corrosion galvanique.....	5
Figure I.4	Corrosion érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau.....	6
Figure I.5	Fissures de CSC.....	6
Figure I.6	Corrosion caverneuse.....	6
Figure I.7	Corrosion intergranulaire d'un inox par HCl.....	7
Figure I.8	Prévention par la forme du récipient.....	8
Figure I.9	Diminution des risques de corrosion-érosion et de corrosion-cavitation.....	9
Figure I.10	Revêtement cathodique et Revêtement anodique.....	11

Chapitre II

Généralités sur l'électrodéposition

Figure II.1	Schéma de montage d'une cellule d'électrolyse.....	12
Figure II.2	Courbe de polarisation.....	14
Figure II.3	Représentation schématique des différentes étapes d'une réaction électrochimique.....	14
Figure II.4	Potentiel standard de réaction d'électrode par rapport à l'électrode normale à hydrogène.....	18
Figure II.5	Cellule électrochimique à 3 électrodes.....	24
Figure II.6	Schéma de montage d'électrodéposition.....	24

Chapitre III

La logique floue

Figure III.1	Classification des températures d'une pièce en deux ensembles (A) logique classique (B) logique floue.....	26
Figure III.2	Variable linguistique.....	28

Figure III.3	Fonction triangulaire.....	29
Figure III.4	Fonction trapézoïdale.....	29
Figure III.5	Fonction Gaussienne.....	30
Figure III.6	Exemple pour l'opérateur ET (intersection).....	31
Figure III.7	Exemple pour l'opérateur OU (Union)	31
Figure III.8	Defuzzification par valeur maximum.....	33

Chapitre IV

Résultats et discussions

Figure IV.1	Schéma de conventionnel Type électro-Co-dépôt technique.....	34
Figure IV.2	Système flou pour le composite (Ni-Al ₂ O ₃).....	36
Figure IV.3	Système floue (Ni-P-Al ₂ O ₃) : la dureté.....	37
Figure IV.4	Variable linguistique pour la densité de courant.....	38
Figure IV.5	Variable linguistique pour la densité de la température.....	38
Figure IV.6	Variable linguistique pour PH.....	38
Figure IV.7	Variable linguistique pour la concentration en alumine.....	38
Figure IV.8	Variable linguistique pour la vitesse d'agitation.....	38
Figure IV.9	Les valeurs de la Dureté en ensembles des essais	39
Figure IV.10	Les valeurs de Volume fractionnel en ensembles des essais	39
Figure IV.11	Les valeurs de masse de dépôt en ensembles des essais	40
Figure IV.12	Variable linguistique pour la dureté.....	40
Figure IV.13	Variable linguistique pour la masse de dépôt	41
Figure IV.14	Variable linguistique pour volume fractionnel.....	41
Figure IV.15	Variable linguistique pour la teneur de phosphore	42
Figure IV.16	Variable linguistique pour le cycle de service	42
Figure IV.17	Les valeurs de la Dureté en ensembles des essais	42
Figure IV.18	Variable linguistique pour la dureté	43
Figure IV.19	les fonctions d'appartenance triangulaire.....	44
Figure IV.20	les fonctions d'appartenance trapézoïdale.....	45
Figure IV.21	les fonctions d'appartenance gaussienne	46
Figure IV.22	Variation de la dureté (trapézoïdale, triangulaire et gaussienne) en fonction du nombre essais	49
Figure IV.23	Fonction D=f(T, I) avec PH=3,5 Co=20g/l Va=300tr/min.....	52
Figure IV.24	Fonction D=f (Co, I) avec PH=3,5 T=45°C Va=300tr/min.....	53

Figure IV.25	Fonction $D=f$ (PH, I) avec $T=45^{\circ}\text{C}$ $\text{Co}=20\text{g/l}$ $\text{Va}=300\text{tr/min}$	53
Figure IV.26	Fonction $D=f$ (Va, I) avec $\text{PH}=3,5$ $\text{Co}=20\text{g/l}$ $\text{Va}=300\text{tr/min}$	54
Figure IV.27	Fonction $D=f$ (DC, P%) avec $I=10\text{A/dm}^2$	55
Figure IV.28	Effet des paramètres électrodéposition (a), (b), (c), (d), (e) sur la dureté des revêtements sur $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$	56
Figure IV.29	Effet des paramètres électrodéposition (P% et DC) sur la dureté des revêtements sur $\text{Ni-P-Al}_2\text{O}_3$	57
Figure IV.30	les courbes des résultats expérimentaux et de simulation $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$	58
Figure IV.31	les courbes des résultats expérimentaux et de simulation $\text{Ni-P-Al}_2\text{O}_3$ (A) Triangulaire et (B) Gaussienne	58
Figure IV.32	Comparaissant de la dureté de $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ et $\text{Ni-P-Al}_2\text{O}_3$	59

Liste des tableaux

Chapitre II Généralités sur l'électrodéposition

Tableau II.1	les propriétés physiques de nickel.....	19
Tableau II.2	propriétés mécaniques, physiques de l'alumine.....	20
Tableau II.3	propriétés thermiques de l'alumine.....	20
Tableau II.4	propriétés physiques de phosphores.....	21

Chapitre IV Résultats et discussions

Tableau IV.1	les données expérimentales de composite Ni-Al ₂ O ₃	34
Tableau IV.2	les données expérimentales de composite Ni-P-Al ₂ O ₃ avec I=10A et [Al ₂ O ₃]=10g/l.....	35
Tableau IV.3	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite Ni-Al ₂ O ₃	37
Tableau IV.4	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite Ni-P-Al ₂ O ₃	41
Tableau IV.5	les règles floues (Ni-Al ₂ O ₃).....	47
Tableau IV.6	les règles floues (Ni-P-Al ₂ O ₃).....	48
Tableau IV.7	les résultats de simulation : la dureté (Ni-Al ₂ O ₃).....	50
Tableau IV.8	les données expérimentales de composite : la dureté (Ni-P-Al ₂ O ₃).....	51

Nomenclature

Symbole	Unité	Désignation
<i>Ox</i>		Oxydant
<i>Red</i>		Réducteur
<i>CSC</i>		Corrosion Sous Contrainte
E_0	V	Potentiel standard pris dans la condition standard
E	V	le potentiel moyen
E_{corr}	V	le potentiel de corrosion
E_{pasiv}	V	le potentiel passif
m	mg	La masse du revêtement
F	$C.mol^{-1}$	Constante de Faraday
ρ	(g / cm ³)	Masse volumique
M	(mol)	Masse molaire
S	Cm^2	Surface du substrat
e	Cm	Epaisseur du revêtement
n		Valence du métal.
I	(A)	Courant d'électrolyse
R	$J.mol^{-1}K^{-1}$	Constante des gaz parfaits
T	(K)	Température
a		<i>Ox</i> ou <i>Red</i> activité de l'espèce
Ni		Nickel
P		Phosphore
Al_2O_3		L'alumine ou oxyde d'aluminium
ESH		l'électrode de référence absolue pour la mesure du potentiel d'oxydo-réduction d'un couple
H	HV	Dureté
PH		Le potentiel hydrogène
Co	g / l	Concentration
Va	tr / min	Vitesse d'agitation
Vf	%	Volume fractionnel

Introduction Générale

Introduction générale

La corrosion est connue depuis longtemps, mais son étude scientifique a dû attendre les essais de Delerive, à l'université de Grenoble, et ceux de Faraday sur l'électricité et la pile de courant en 1830. Ces chercheurs ont alors découvert que la corrosion des métaux était un phénomène électrochimique. Cependant, cette explication ne s'applique pas à toutes les formes de corrosion, la corrosion sèche fait intervenir la réaction chimique du milieu extérieur directement sur le matériau, elle est typique de la corrosion par les gaz et se rencontre à haute température. [1]

L'importance considérable de la corrosion dans la vie quotidienne (domestique ou industrielle) n'est plus à démontrer. En effet, ce phénomène touche pratiquement toutes les réalisations de l'ingénieur, des plus grandes au plus petites : production de l'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, etc. Dans les pays industrialisés les conséquences de la corrosion ne résident pas seulement dans le coût économique (gaspillage de matière première, énergie et temps) mais également dans les accidents que peut provoquer (sécurité public en jeu) ainsi que le mauvais impact sur l'environnement. [1]

Parmi les moyens qui sont fréquemment utilisés pour lutter contre les phénomènes corrosifs, on peut citer les revêtements des pièces à protéger. Le traitement le plus couramment employé est le revêtement de chromage et nickelage. C'est un traitement de conversion électrochimique qui conduit à la formation d'une couche métallique sur le substrat. [2]

Le choix des conditions opératoires (densité de courant et concentration de l'électrolyte, et vitesse d'agitation, température, etc.) jouent un rôle important sur la qualité de revêtement. Les études expérimentales effectuées par plusieurs travaux ont permis de choisir de façon aléatoire les paramètres d'électrodéposition, les méthodes et les techniques d'essai sont énormément difficiles et nécessitent beaucoup de temps.

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

L'objectif de la présente étude est de mettre en évidence l'influence des paramètres d'électrodéposition sur les caractéristiques des revêtements composites Nickel-Alumine.

En vue d'atteindre cet objectif, le travail présenté dans ce mémoire s'articule de la façon suivante :

Le premier chapitre porte sur une étude bibliographique permet dans un premier temps de définir le phénomène de corrosion, ensuite les différentes méthodes de protection contre ce phénomène.

Le deuxième chapitre permet de faire le point sur les dépôts électrolytiques et les conditions d'élaboration des composites Nickel-Alumines.

Le troisième chapitre va mettre l'accent sur la théorie de la logique floue.

Dans le quatrième chapitre, la problématique est alors ciblée, en se basant sur les connaissances obtenus du trois premiers chapitres nous présentons un model flou pour la prédiction des paramètres d'électrodéposition pour les revêtements composites Nickel alumine.

Chapitre I

Corrosion et Méthodes de Protection

I.1 Introduction

La corrosion est un grand problème mondiale qui touche tous les domaines (domestiques ou industriel), Il touche pratiquement toutes les réalisations de l'engineering, des plus grandes au plus petites : production de l'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, etc.

Dans ce chapitre nous présentons quelques généralités sur le phénomène de corrosion, et les facteurs de corrosion ainsi que les différentes moyennes de protection contre la corrosion.

I.2 Mécanismes de la corrosion

I.2.1 Définition

La corrosion peut être définie comme une interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant, et modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs [3]:

a. Electrolyte

Milieu électriquement conducteur (eau, sol...), car elle contient des ions mobiles [3].

b. Agent corrosif/oxydant

Elément qui, mis au contact d'un métal donné, réagit avec ce dernier et contribue à sa corrosion. Il peut être contenu dans l'électrolyte (oxygène contenu dans l'eau par exemple).

A chaque couple oxydant/réducteur « *Ox / Red* » est associé une énergie potentiel [3].

Oxydant : capte des électrons $Ox \rightarrow n e^- + Red$ (I-1)

Réducteur : cède des électrons $M \rightarrow M^{n+} + n e^-$ (I-2)

Dans le cas des métaux :

Exemple: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (I-3)

I.2.2 Le mécanisme

Corrosion d'un métal :

–Oxydation du métal

–Formation de produit de corrosion solide

I.3 Les formes de la corrosion

Le comportement à la corrosion d'un matériau en service dépend d'une multitude des facteurs [4] :

I.3.1 La corrosion uniforme

La perte du métal est à peu près uniformément répartie sur l'ensemble de la surface exposée au milieu corrosif. Elle se caractérise par une réaction d'oxydoréduction sur la totalité de la surface, et se manifeste par la même vitesse [2].

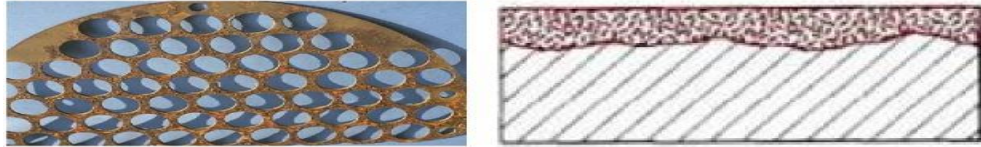


Figure I.1 Corrosion uniforme d'une chicane en acier [2].

I.3.2 La corrosion par piqures

Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse. L'attaque se limite à des trous, très localisés et pouvant progresser rapidement en profondeur alors que le reste de la surface reste indemne [2].



Figure I.2 Corrosion par piqures d'un acier inoxydable [2].

I.3.3 La corrosion galvanique

Elle est due, à un contact entre des métaux de nature différente, exposés au même milieu. Le moins noble (l'anode) se corrode et le plus noble (la cathode) est protégé. Elle résulte de la formation d'une pile électrochimique [2].

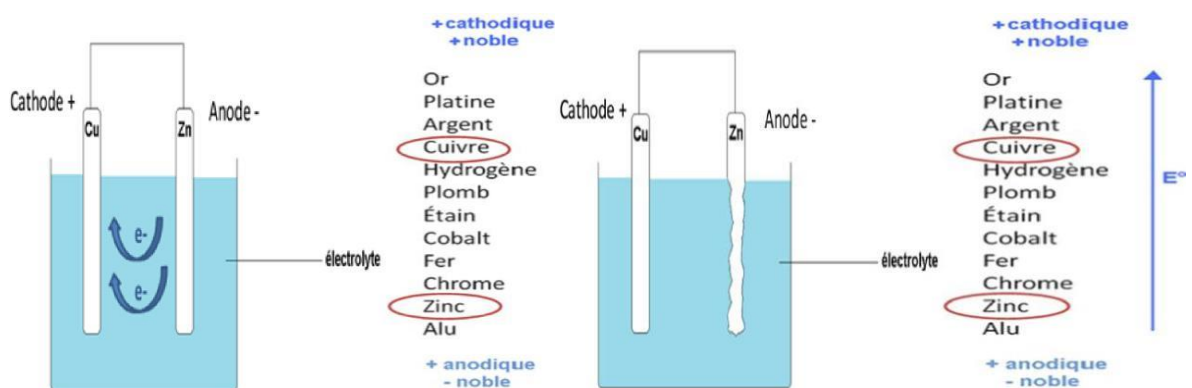


Figure I.3 Corrosion galvanique [2].

I.3.4 Corrosion érosion

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière, elle a souvent lieu sur les métaux exposés à l'écoulement [2].

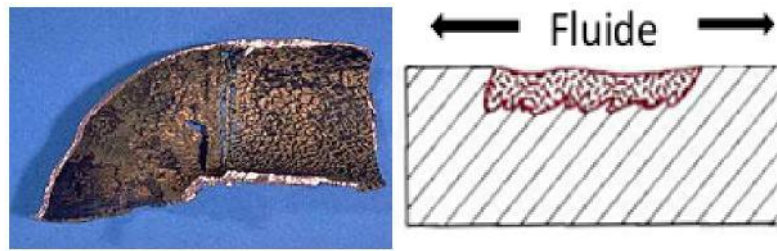


Figure I.4 Corrosion érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau [2].

I.3.5 La corrosion sous contrainte

Elle résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique (résiduelle ou appliquée), et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager la structure [2].



Figure I.5 Fissures de CSC [5].

I.3.6 La corrosion caverneuse

Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. On observe une attaque sélective du métal dans les fentes et autres endroits peu accessibles à l'oxygène [4].

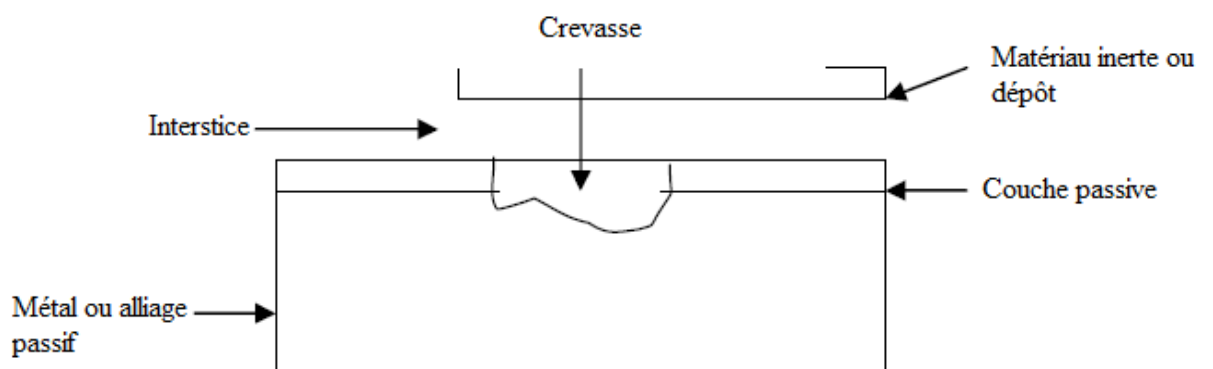


Figure I.6 Corrosion Caverneuse [6].

I.3.7 La corrosion intergranulaire

C'est une attaque sélective aux joints de grains. Souvent, il s'agit de phases qui ont précipité lors d'un traitement thermique [4].

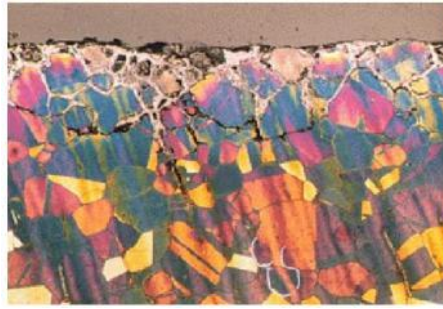


Figure I.7 Corrosion intergranulaire d'un inox par HCl [5].

I.4 Les facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux [2] :

I.4.1 Facteurs définissant le réactif

- Concentration.
- teneur en oxygène.
- PH
- addition d'inhibiteurs.
- température.
- pression.

I.4.2 Facteurs définissant le métal ou l'alliage

- composition chimique.
- procédé d'élaboration.
- impuretés traitements thermiques.
- traitements mécaniques.
- addition protectrices.

I.4.3 Facteurs définissant les conditions d'emploi

- état de surface.
- forme des pièces.
- solicitation mécanique.
- emploi d'inhibiteurs.
- procédés d'assemblage.

I.4.4 Facteurs dépendant du temps

- Vieillessement.
- tension mécanique.
- température.

–modification des revêtements protecteurs.

I.5 Moyens de protection contre la corrosion

Etant donné que la corrosion résulte de l'action de deux partenaires, le métal ou l'alliage d'une part, la solution d'autre part, il sera possible de lutter contre ces effets par les méthodes suivantes [4] :

I.5.1 Prévention par un choix judicieux des matériaux

Il sera possible de lutter contre les risques de corrosion en agissant sur le choix judicieux du matériau [2].

Le choix des matériaux prend en compte les facteurs suivants :

- Domaine d'utilisation.
- Nature et niveau des sollicitations mécaniques et thermiques.
- Traitements sélectionnés.
- Prix et disponibilité des matériaux.

I.5.2 Protection par la géométrie des pièces

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie. Nous aborderons ici quelques solutions types couramment employées pour limiter les risques en fonction du type de corrosion à redouter [2].

a. Elimination des zones humides

De façon général la corrosion atmosphérique ne se produit qu'en présence d'humidité, cela dit en prévoyant un drainage plus ou moins parfait, on évite une accumulation d'humidité d'où le risque de corrosion [2].



Figure I.8 Prévention par la forme du récipient (a) : mauvais, (b) : correct [2].

b. Réduction de l'effet d'érosion du fluide dans la canalisation

En général les canalisations utilisées dans le transport des hydrocarbures admettent un revêtement interne, permettant de protéger la conduite contre toute forme de corrosion interne. Sachant que ce revêtement est le seul moyen prévu à cet effet, il est important de le sauvegarder le plus longtemps possible. Or, dans les changements brusques, au niveau des

coudes, il se produit une abrasion pouvant emporter ce revêtement, mettant ainsi la surface intérieure de la conduite à nue. Pour éviter ce phénomène il est important d'éviter les coudes à angle droit, au profit d'une forme atténuant l'effet d'abrasion, permettant ainsi de réduire l'effet d'érosion [2].

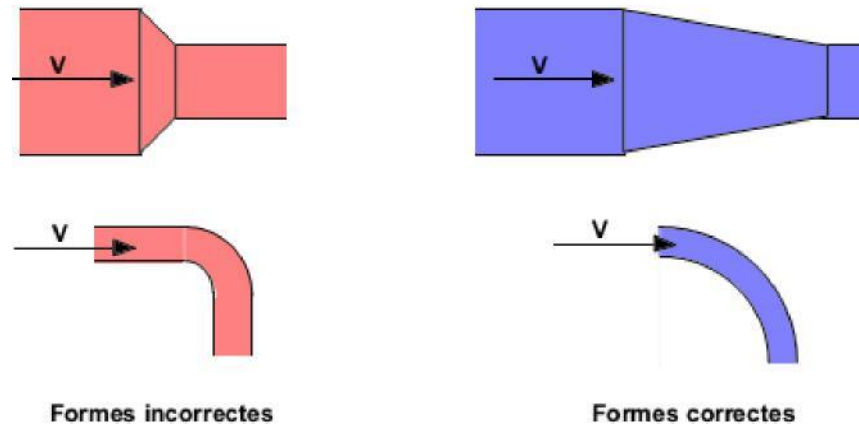


Figure I.9 Diminution des risques de corrosion-érosion et de corrosion-cavitation [2].

I.5.3 Emploi d'inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement. En général, les inhibiteurs sont classés en fonction de leur mode d'action. On distinguera ainsi [2] :

a. Les inhibiteurs anodiques

Ils diminuent la densité de courant partiel anodique et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens positif.

b. Les inhibiteurs cathodiques

Ils diminuent la densité de courant partiel cathodique et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens négatif.

c. Les inhibiteurs mixtes

Ils diminuent la vitesse des deux réactions partielles, mais il ne modifie que le potentiel de corrosion [2].

I.5.4 Protection électrochimique

Elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. En effet cette méthode consiste à imposer au métal un potentiel suffisamment bas pour que la vitesse de corrosion devienne négligeable, voire nulle. On distingue deux méthodes de protection [4].

a. La protection cathodique

Elle consiste à abaisser le potentiel (métal – milieu) de manière à l'amener dans sa zone d'immunité ($E \leq E_{prot}$). Cette dernière doit être maintenue durant toute la durée de service.

Deux possibilités sont pratiquement utilisées :

La protection par anode sacrificielle : l'anode forme une pile électrochimique avec la structure à protéger qui joue alors un rôle de cathode, donc l'anode sacrificielle doit posséder un potentiel réversible inférieur à celui du métal que l'on veut préserver. La force électromotrice nécessaire est obtenue à partir de la différence entre le potentiel moyen du couple de corrosion et le potentiel propre d'une anode (plus négatif) dite sacrificielle.

La protection par courant imposé : Cette méthode utilise un générateur extérieur et une anode auxiliaire. Elle offre l'avantage de pouvoir régler la force électromotrice ou le courant en fonction des besoins, ceci permet d'optimiser le système et de protéger de grandes surfaces (implique l'utilisation d'un redresseur) [4].

b. La protection anodique

Elle consiste à élever la tension (métal – milieu) de manière à l'amener dans sa zone de Passivation. Elle s'applique aux métaux passivables, dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif $E_{corr} < E_{passiv}$. Une polarisation anodique permet dans ce cas de déplacer le potentiel dans le domaine passif où la densité du courant passif est très faible. En revanche pour atteindre l'état passif, il faut appliquer une densité de courant nettement plus élevée, car elle doit être supérieure à la densité de courant de passivation. Donc avant d'exercer cette méthode, il est nécessaire d'avoir recours à des essais préliminaires permettant de déterminer la densité de courant correspondante à l'établissement de la passivité ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c'est à dire l'étendue du palier de passivité. La protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitriques ou phosphoriques), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane et le zirconium. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés [4].

I.5.5 Protection par revêtements

La structure à protéger est isolée de l'agressivité du milieu corrosif en utilisant des revêtements. Ils peuvent être métalliques ou non métalliques [4].

a. Revêtements métalliques

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique, on peut aussi les appliquer sur d'autres

substrats comme le cuivre et ou le laiton, outre leurs effets anti – corrosion ils remplissent souvent une fonction décorative.

Selon leur comportement, il existe deux types de revêtements métalliques :

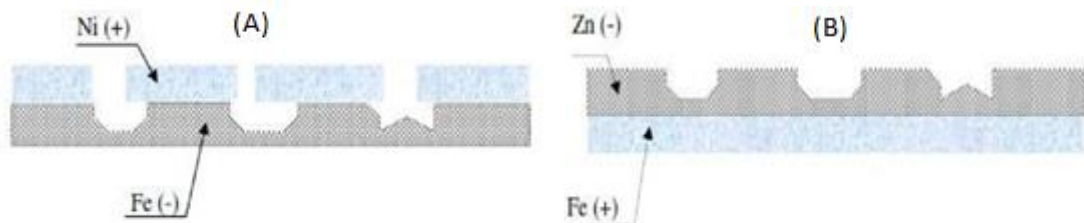


Figure I.10 (A) Revêtement cathodique (cas du nickel sur fer)(B) Revêtement anodique (cas du zinc sur fer) [2].

b. Revêtements organiques

Il existe une grande variété de revêtements organiques parmi lesquels les polymères et les peintures, ces revêtements limitent ou empêchent l'accès du milieu corrosif au métal et sont souvent faciles à appliquer. L'utilisation des oxydes de zinc et le carbonate de calcium comme des additifs à la peinture, fait diminuer la perméabilité du revêtement [2].

c. Revêtement chimique

On produit les revêtements chimiques par anodisation, dans ce processus on produit le revêtement, généralement un oxyde sur une surface de métal de façon à ce que le métal soit une anode dans une pile contenant un électrolyte [2].

I.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les principales méthodes de protection contre la corrosion ainsi que les facteurs influant sur la corrosion des métaux.

Cette étude permet de choisir la méthode de protection la plus adéquate pour chaque installation.

Chapitre II

Généralités sur l'Electrodéposition

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques informations sur la procédure de l'électrodéposition, ainsi que les méthodes d'élaboration des revêtements composites avec un état de l'art sur les revêtements composites Al_2O_3 .

II.1.1 Définition

L'électrodéposition est une technique permettant de réduire les espèces présentes en solution afin de réaliser un dépôt sur un substrat. Le schéma de principe, la figure(II.1), présente les différents éléments d'un montage d'électrodéposition. Pour réaliser une électrodéposition, le substrat est placé à la cathode d'une cellule d'électrolyse qui renferme un électrolyte contenant les ions du métal à déposer, et selon les cas, un sel porteur, des agents complexant ou des additifs [7].

Le générateur permet de faire circuler un courant entre les deux électrodes dont le potentiel diffère de leur potentiel d'équilibre .L'électrolyte est choisi en fonction du dépôt désiré. La couche obtenue a bien évidemment des caractéristiques précises qui dépendent des différents paramètres du mécanisme électrolytique [7].

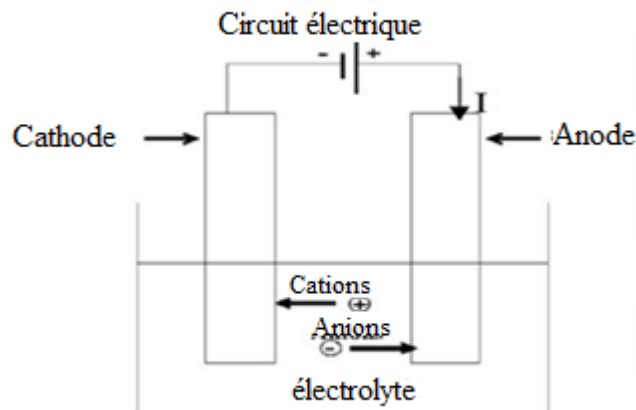


Figure II.1 Schéma de montage d'une cellule d'électrolyse [7].

Cette opération a pour but de conférer au métal certaines propriétés de surface dont:

- La résistance à la corrosion.
- L'aspect (mat, semi-brillant, brillant...).
- Les propriétés optiques.
- La soudabilité ; conductibilité, résistance de contact.
- La dureté.
- La ductilité.
- La résistance à l'usure, à l'abrasion et au frottement.

II.1.2 Electrolyse

L'électrolyse est la transformation chimique d'une substance par le passage d'un courant électrique. Au cours d'une électrolyse, il se produit une migration des espèces ioniques vers les électrodes en direction d'électrolyte et par la suite une réaction électrochimique se produit. L'électrolyse se manifeste par la circulation d'un courant électrique dont l'intensité peut être mesurée [7].

II.1.3 Loi de Faraday

La masse du revêtement mise en solution par électrolyse est donnée par la loi de Faraday [7]:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} \cdot It \quad (\text{II-1})$$

$$\text{Avec } m = \rho S e \quad (\text{II-2})$$

ρ : Masse volumique (g/cm³).

S : Surface du substrat (cm²).

e : Epaisseur du revêtement (cm).

F : Constante de Faraday (96500 C/mole).

n : Valence du métal.

I : Courant d'électrolyse (A).

t : Temps d'électrolyse (s).

M : Masse molaire (mol).

Alors, l'épaisseur (e) du dépôt donnée par la formule suivante :

$$e = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n\rho} \cdot \frac{I}{s} \cdot t \quad (\text{II-3})$$

M , n , ρ Sont des paramètres qui dépendent du matériau.

II.1.4 Relation de Nernst (potentiel de Nernst)

L'échelle des potentiels représentés sur la figure (I.3) reporte les potentiels d'équilibre dans les conditions standard (1 atm, 25 °C, activité 1M/l). Mais en réalité, dans une expérience d'électrodéposition, les conditions de travail sont différentes des conditions standard. On définit alors un autre potentiel à l'aide de l'équation de Nernst s'applique à une réaction d'électrode en équilibre. Elle permet de relier la potentielle thermodynamique (ou d'équilibre) E d'un couple redox en solution à son potentiel standard E_0 en fonction des concentrations de ses espèces en solution et de leur température [7]:

$$E = E_0 + \frac{Rt}{nF} \ln \frac{a(Ox)}{a(Red)} \quad (\text{II-4})$$

E_0 : Potentiel standard pris dans la condition standard (donné par les tables).

F : Constante de Faraday (96500 $C.mol^{-1}$).

n : Nombre d'électron mis en jeu.

R : Constante des gaz parfaits (8,314 $J.mol^{-1}K^{-1}$).

T : Température (K).

a : (Ox ou red activité de l'espèce).

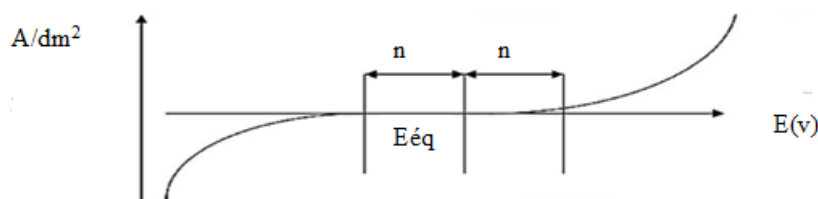


Figure II.2 Courbe de polarisation [7].

Lorsqu'on applique à une électrode un potentiel inférieur à son potentiel d'équilibre, on parle d'une réaction de réduction et la polarisation est dite cathodique. Lorsque le potentiel appliqué est supérieur au potentiel d'équilibre, on parle d'une réaction d'oxydation et la polarisation est anodique. La courbe donnant le courant (I) en fonction du potentiel (E) est appelée courbe de polarisation figure (II.2) Le supplément de tension η s'appelle surtension [7].

II.2 Mécanismes réactionnels de formation des dépôts métalliques

II.2.1 Mécanismes d'une réaction électrochimique

Une réaction électrochimique est généralement constituée d'un ensemble d'étapes qui sont représentées schématiquement sur la figure ci-dessous.

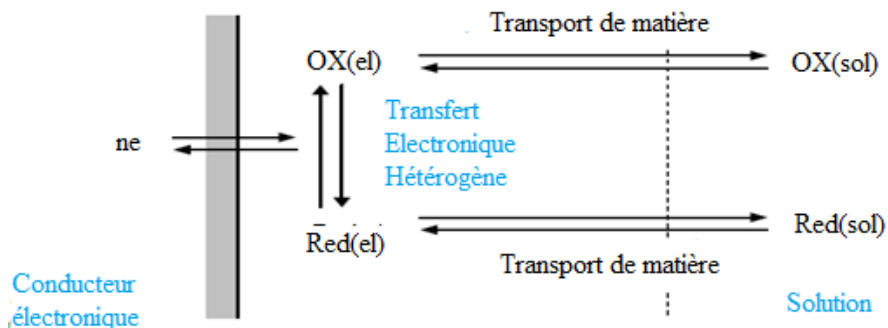


Figure II.3 Représentation schématique des différentes étapes d'une réaction électrochimique [8].

a. Le transfert de masse

Transport de matière entre la solution et la surface de l'électrode. Il se fait sous l'action associée de trois effets [9] :

- La migration : déplacement des espèces sous l'influence d'un champ électrique.
- La diffusion : déplacement des espèces sous l'influence d'un gradient de concentration.
- La convection : transport hydrodynamique ou par agitation mécanique.

b. Le transfert de charge

Adsorption de l'ion solvates sur l'électrode et désolvation de cation.

Le transfert de charge peut se décomposer en plusieurs étapes [9] :

- Adsorption de l'ion solvate sur le substrat.
- Désolvation de l'ion, c'est-à-dire perte de la gaine de solvation.
- Diffusion et fixation de l'ion adsorbé (adion) sur un centre actif de la cathode et agrégation de ces atomes pour constituer un germe de cristallisation (centre de nucléation)

II.3 Facteurs et paramètres d'un dépôt électrolytique**II.3.1 La 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 accélère le processus de microcristallisation. 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 [7].

II.3.2 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 [7].

II.3.3 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 [7].

II.3.4 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.

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 [7].

II.3.5 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 [7].

II.3.6 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 ($AgNO_3$)) 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 [7].

II.3.7 Concentration de l'électrolyte

En général, une augmentation de concentration conduit à une meilleure microcristallisation, 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 [7].

II.3.8 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 [7].

II.4 Propriétés des dépôts électrolytiques de Ni-P-Al₂O₃

II.4.1 Propriétés et structure des dépôts

Ces caractéristiques dépendent de très nombreux paramètres, composition d'électrolyte, présence d'additifs spécifiques ou d'impuretés, conditions d'électrolyte (agitation, et parfois post traitement : Thermiques, usinages, autres dépôts.).

La qualité et la stabilité d'un bain de dépôt chimique ne peuvent être obtenues que par un ajustage précis d'un certain nombre de paramètres [10].

II.4.2 Propriétés de Nickel

a. Les propriétés physiques

Tableau II.1 les propriétés physiques de nickel [10].

Symbole	Ni
Masse volumique	8,9 g / cm ³ (dépôts électrolytiques : variant de 8,85 à 8,93)
Température de fusion	1 455° C
Coefficient de dilatation	13,6 10 ⁻⁶ (° C) ⁻¹ à 20° C
Conductivité thermique	6.85 μΩ .cm (de 6,8 à 11,5 pour les dépôts électrolytiques)
Résistivité électrique	> 350 MPa
Résistance à la rupture <i>Rm</i>	150 MPa
Limite élasticité <i>Re</i>	Cubique faces centrées (<i>a</i> ₀ = 0,3524 nm)
Cristallisation	359 °C
Température de Curie	280 à 400 A/m (Fer : 50 à 80 A/m)
Champ coercitif	0,61 T (Fer : 2,16 T)
Aimantation à saturation	> 350 MPa

b. Propriétés chimiques et électrochimiques

Le nickel sous forme d'ions, se trouve essentiellement au degré d'oxydation + 2. Il peut se présenter au degré + 3 et très exceptionnellement au degré + 4. Au degré d'oxydation 2, le nickel donne de manière générale des composés verts, de degrés d'hydratation différents (essentiellement avec 6 ou 7 molécules d'eau).

Le métal, après s'être recouvert d'une couche de passivation d'oxyde, n'est pas oxydable à froid dans l'oxygène. Il résiste bien à la corrosion par l'eau distillée et par l'eau de mer. On peut cependant constater une attaque locale par l'eau de mer stagnante. Le potentiel standard du couple Ni / Ni^{2+} correspondant à la réaction : $Ni \leftrightarrow Ni^{2+} + 2e^-$ Est égal à $-0,25 / ESH$. Figure (II.4) [10].

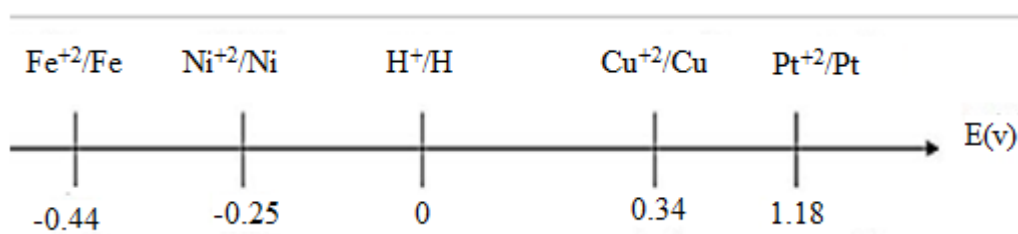


Figure II.4 Potentiel standard de réaction d'électrode par rapport à l'électrode normale à hydrogène [10].

c. Caractéristiques physico-chimiques du nickel

Le nickelage constitue le procédé de revêtement électrolytique le plus répandu tant par les quantités utilisées que par le grand nombre d'applications liées à sa relative facilité de dépôt à des épaisseurs très variables, à ses propriétés mécaniques et à la variété des substrats ainsi couverts.

L'application la plus fréquente (95%) du nickelage reste le revêtement mince pour sa résistance à la corrosion et son aspect décoratif associé au chromage décor, d'où les nombreux procédés de nickelage brillant ou nivelant en usage industriel.

Cependant, le nickelage épais et fonctionnel se développe en raison de la flexibilité du procédé qui permet d'ajuster les performances du dépôt en fonction des applications requises : dureté, résistance à la corrosion, ce dépôt étant associé ou non à d'autres dépôts métalliques ou non métalliques (nickel composite) [10].

II.4.3 Caractéristiques spécifiques de l'alumine

Les propriétés mécaniques, physiques et thermiques de l'alumine sont regroupées dans les tableaux ci-dessous

Tableau II.2 propriétés mécaniques, physiques de l'alumine [11].

Propriétés physiques	
Masse volumique (g/cm ³) (ρ)	3.9
Poids moléculaire (g/mole) (M)	102
Température maximale d'utilisation sous air (°C)	1700 – 1800
Propriétés mécaniques	
Dureté (Mohs)	9
Module d'Young (GPa) (E)	300-400
Coefficient de Poisson (ν)	0.5
Résistance à la flexion (MPa) (σ_f)	380
Ténacité (Mpa.m ^{1/2}) ($K1C$)	2-3

Tableau II.3 propriétés thermiques de l'alumine [11].

Propriétés thermiques	
Chaleur spécifique (J / K / Kg) (C_p)	900
Conductivité thermique (W/m/K) (λ)	
à 20°C	26-35
à 500 °C	10-15
Dilatation linéaire (x10 ⁻⁶) de 20 à 1000 °C (α)	8-9
Point de fusion (°C)	2050

II.4.4 Caractéristiques spécifiques de phosphore

a. Propriétés physiques

Les propriétés physiques de phosphore sont regroupées dans le tableau II.4

Tableau II.4 propriétés physiques de phosphores [12].

Propriétés physiques		
Point de fusion	Blanc	44.15 °C
	Noir	610 °C
Point d'ébullition	Blanc	280.5 °C
sublimation point	Rouge	431 °C
Triple point	Rouge	590 °C
Point critique	Rouge	721 °C
	Blanc	721 °C
Densité	Rouge	2.16 g/cm ³
	Blanc	1.823 g/cm ³

b. Propriétés thermochimique

- Chaleur spécifique : $0.769 \text{ J} / \text{g}^\circ\text{C}$ ¹² = $0.184 \text{ cal} / \text{g}^\circ\text{C}$ = $5.693 \text{ cal} / \text{mol}^\circ\text{C}$
- Conductivité thermique : $0.235 \text{ (W} / \text{m)} / \text{K}$, 27°C
- Température de fusion : $0.657 \text{ kJ} / \text{mol}$ ¹⁴ = $21.2 \text{ J} / \text{g}$
- Chaleur de vaporisation : $12.129 \text{ kJ} / \text{mol}$ ¹⁵ = $391.6 \text{ J} / \text{g}$ [12].

II.5 Contrôle des revêtements par dépôt électrolytique

Le contrôle des revêtements est l'une des actions de l'assurance qualité. Dans le cas des revêtements, le contrôle intervient au stade final ; il sanctionne alors le respect d'un cahier des charges et l'aptitude du produit à remplir une fonction. Pour guider l'utilisateur dans le choix des méthodes, un effort considérable a été fait en matière de normalisation française. Il est possible, dans l'éventail proposé par l'Association française de normalisation (AFNOR), de ne pas retenir les méthodes dont le caractère industriel est discutable ; en effet, l'un des critères de validité essentiels d'une opération de contrôle est sa reproductibilité, et celle-ci peut être compromise si les paramètres dépendant de l'opérateur sont trop nombreux.

Pour être efficace, le contrôle des revêtements porte sur leurs différentes propriétés caractéristiques : aspect, adhérence, épaisseur, corrodabilité, et sur chacune de leurs propriétés spécifiques [6].

La première opération à effectuer lors d'un contrôle est le prélèvement des pièces. Certains procédés de contrôle sont destructifs ; pour tous ceux-là, il sera exclu de procédés autrement que par échantillonnage, avec prélèvement d'un nombre de pièces qui soit représentatif de l'ensemble.

Les examens non destructifs, au contraire, permettent un contrôle de la totalité des pièces, toutes les fois que cela est possible ou nécessaire. Le choix du mode de prélèvement étant fait, il ne reste plus qu'à sélectionner les différents contrôles représentatifs des conditions réelles d'emploi de la pièce ; de choix dépendent la crédibilité du contrôle et la validité des résultats [6].

II.5.1 Mesure de l'adhérence au substrat

Un dépôt n'est bon et durable que si l'adhérence au substrat est meilleure. La réalisation d'un dépôt de bonne qualité est subordonnée avant tout à son adhérence. La plupart des revêtements sont effectués dans un but précis : La décoration, la protection contre la corrosion ...etc. Il est évident que ce but n'est atteint que si le revêtement est bien adhérent au substrat, l'adhérence sanctionne donc la qualité de la préparation de la surface à revêtir et la qualité de l'opération de revêtement.

L'adhérence parfaite existe dans la mesure où la force de liaison entre le revêtement et le substrat est supérieure à la résistance propre (traction, par exemple) de chacun deux. Le but de l'essai d'adhérence est donc de mettre en évidence les cas d'adhérence imparfaite.

Nous avons effectué un test d'adhérence connu sous le nom du choc thermique qui est décrit par la norme ASTM.B571 [6].

Cet essai consiste à placer les échantillons ainsi revêtus dans un four pendant une heure à une température qui dépend du métal de base (cas d'acier à 250°C). Ensuite une trempe rapide dans l'eau à la température ambiante est effectuée. Le degré d'adhérence est caractérisé par la grandeur et la présence ou non d'écaillage et de fissures [6].

II.5.2 Mesure de l'épaisseur

L'épaisseur des revêtements est une caractéristique essentielle lorsque le but recherché est la protection contre la corrosion. Très souvent, l'épaisseur du revêtement détermine le coût de l'opération.

Les échantillons ont été coupés transversalement, polis mécaniquement jusqu'à 1200 puis polis avec la patte de diamant jusqu'à 3 µm, puis attaqués chimiquement jusqu'à 5%.

Ces échantillons sont observés à la microscopie optique, l'épaisseur est déterminée à partir de la moyenne de dix mesures [6].

II.5.3 Etude de la tenue à la corrosion

L'amélioration de la résistance des dépôts électrodéposés et des couches codéposées à la corrosion électrochimique en milieu agressif est l'un des objectifs les plus importants en galvanoplastie [6].

II.5.4 Méthode de la masse perdue

Cette méthode de caractérisation consiste à plonger dans chaque bûcher contenant une solution d'NaCl (0,6 M), un échantillon de chaque bain pendant une durée de 21 jours, à la température ambiante. La partie nue de chaque échantillon est enrobée d'une couche de vernis pour ne pas être attaquée par le milieu agressif.

Après cette période d'immersion, les échantillons sont rincés avec l'eau distillée, séchés puis pesés afin de déterminer la masse perdue et la vitesse de corrosion pour chaque revêtement [6].

II.5.5 Méthode potentiodynamique

Une seule face des échantillons doit être polarisée, et laissée nue, alors que le reste a été recouvert d'une couche de vernis.

Le milieu agressif est toujours la solution de $NaCl$ à $35g/l$. Pour la détermination de la courbe de polarisation, on applique, à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail (ET) (à étudier) et l'électrode de référence (ER) (électrode au calomel saturé).

Ensuite, on mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre l'électrode de travail et une contre électrode ou électrode auxiliaire (EA) Figure (II.5).

Un potentiostat est un appareil électronique destiné à l'étude des phénomènes électrochimiques. Maintient le potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence constante et égale à la valeur désirée par l'opérateur.

Le potentiostat est relié avec un micro-ordinateur, à l'aide d'un logiciel, les courbes $i = f(E)$ (courant en fonction du potentiel) sont tracées [6].

II.6 Avantage et inconvénients des dépôts électrolytiques

II.6.1 Avantages

- La limitation de la densité du courant augmente significativement en remplissant les ions métalliques dans la couche de diffusion seulement pendant le temps d'arrêt.
- La flexibilité des paramètres d'impulsion réduit les limitations du processus.
- Dépôt à grain fin avec une faible porosité et un stress réduit.
- Améliore l'adhésion du dépôt, crée une épaisseur uniforme.
- Amélioration des propriétés physiques et mécaniques des dépôts [13].

II.6.2 Inconvénients

- Les générateurs d'impulsions sont coûteux que l'unité à courant continu.
- Cette technique nécessite une planification adéquate à l'avance avec une série de afin d'obtenir de meilleurs résultats [13].

II.7 Dispositifs expérimentaux

On commencera par présenter le dispositif expérimental consacré à la réalisation nos dépôts : les différents produits chimiques, le bain d'électrolyse, les électrodes, les cellules électrochimiques et le montage électrochimique.

II.7.1 Produits chimiques

Les produits chimiques utilisés : Ni , Al_2O_3 , CH_3COCH_3 , H_2O , $NaOH$, Na_2CO_3

II.7.2 Matérielles utilisés

- Générateur de courant continu.
- Multimètre.
- pH – mètre.
- Agitateur mécanique avec leur barreau aimanté.
- Balance électronique.
- Microscope optique équipé d'un appareil photo numérique et d'un logiciel de mesure.
- Microscope électronique à balayage Joël 5900 équipé d'un appareil de microanalyse EDS Microdureté [14].

II.7.3 Cellules électrochimiques et électrolytes

a. Cellule électrochimique et montage électrochimique

Il s'agit d'un montage classique à trois électrodes [14] :

- Electrode de référence : toutes les valeurs de potentiel sont mesurées par rapport à une électrode saturée en nikel-alumine.
- Electrode de travail : acier ordinaire d'une surface S.
- Electrode auxiliaire électrode de platine : ce type d'électrode utilisé tout au long des essais électrochimiques d'une aire de 0.25 cm^2 . L'électrode est maintenue parallèle à l'électrode de travail pour assurer une bonne répartition des lignes de courant. Les électrodes sont reliées à un potentiostat-galvanostat piloté par un microordinateur doté d'un logiciel Voltmaster, prédestiné pour commander le potentiostat précité. Ce potentiostat est qualifié comme un circuit électronique qui permet d'une façon générale de modifier le potentiel et d'enregistrer le courant ou vice versa Figure(II.6) [14].

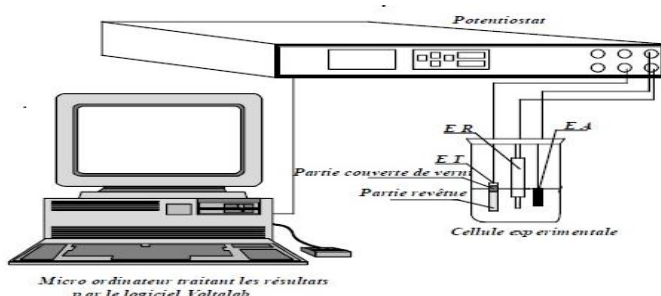


Figure II.5 : cellule électrochimique à 3 électrodes [14].

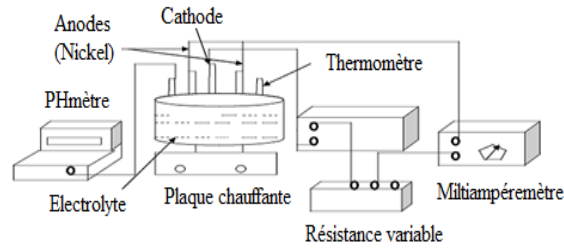


Figure II.6 Schéma de montage d'électrodéposition [6].

II.8 Revue de littérature

II.8.1 Revêtements composites Ni-Al₂O₃

- Bahrololoom et al [13]. A analysé minutieusement l'influence des paramètres de plaquage par impulsions sur la dureté et la résistance à l'usure des revêtements composites nickel-alumine. La dureté et la résistance à l'usure des revêtements composites ainsi que la microstructure et la morphologie de la surface ont été fortement influencées par la densité du courant.
- Chen et al [13]. Étude de l'influence de la fréquence des impulsions sur la microstructure et de la Nickel-alumine Aux basses fréquences, les revêtements composites Ont montré une meilleure dureté et une meilleure résistance à l'usure que les fréquences plus élevées. En raison de Présence d'usure par adhésif, résistance à l'usure des revêtements composites largement influencée par Microstructure et moins influencée par les particules d'alumine renforcée.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les revêtements obtenus par électrodéposition et nous avons mis l'accent sur les procédures d'élaboration et différentes conditions opératoires. Nous avons présenté aussi dans ce chapitre une petite synthèse bibliographique sur les travaux traitant le problème de sélection des paramètres de fabrication des dépôts composites nickel-alumine.

Chapitre III

La Logique Floue

III.1 Introduction

Avec le développement des calculateurs numériques, les automaticiens commencent à s'intéresser à de nouvelles approches de commande telles que la commande adaptative, la commande prédictive, la commande robuste, ainsi que les techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle, parmi ces dernières, la commande par logique floue.

Dans ce chapitre, nous allons expliquer la différence entre la logique floue et la logique classique, Où nous donnerons une généralité sur la logique floue, Ainsi que le son principe.

III.2 La logique floue

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes [2].

III.3 L'idée de la logique floue

Comme La science s'appuie sur la notion de mesure, la question qui se pose est : Comment représenter les valeurs non mesurables ? Comment représenter ce qui est incertain ou subjectif ? Comment représenter les termes du langage humain ? D'un système sont souvent vagues. Mais le flou n'est pas imprécis. Si une donnée n'est pas connue précisément, elle peut être exprimée par un intervalle de confiance précis. Cet intervalle est un ensemble de valeurs possible pour la donnée [15].

III.4 Principe de la logique floue

Le principe du réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques, proches du langage humain de tous les jours. De plus ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font références à une certaine connaissance du comportement du système [2].

Toute une série de notions fondamentales sont développées dans la logique floue. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base. Dans ce qui suit, on ne retiendra que les éléments indispensables à la compréhension du principe du réglage par logique floue [2].

III.5 L'utilisation de la logique floue

La logique floue est une technique de résolution de problèmes très puissants avec une large applicabilité dans le control et la prise de décision. Elle est très utile lorsque le modèle mathématique du problème à traiter n'existe pas ou existe mais difficile à implémenter, ou il est trop complexe pour être évalué assez rapidement pour des opérations en temps réel. Ou bien lorsque des experts humains sont disponibles pour fournir des descriptions subjectives du comportement du système avec des termes en langage naturel. La logique floue est aussi supposée de travailler dans les situations où il y a de large incertitude et des variations inconnues dans les paramètres et la structure du système [15].

III.6 La logique classique et la logique floue

Dans le cadre de la logique classique, une proposition est soit vraie, soit fausse (1 ou 0). Par exemple, la logique classique peut facilement partitionner la température d'une pièce en deux sous-ensembles, «moins de 15 degrés» et «15 degrés ou plus». La figure 1.1a montre le résultat de cette partition. Toutes les températures de moins de 15 degrés sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur affecte une valeur de 1. Toutes les températures atteignant 15 degrés ou plus ne sont pas considérées comme appartenant à l'ensemble «moins de 15 degrés». On leur attribue une valeur de 0. Cependant, le raisonnement humain s'appuie fréquemment sur des connaissances ou des données inexactes, incertaines ou imprécises. Une personne placée dans une pièce dont la température est soit de 14.95 degrés soit de 15.05 degrés, ne fera certainement pas de distinction entre ces deux valeurs. Cette personne sera pourtant capable de dire si la pièce est «froide» ou «chaude», sans pour cela utiliser de température limite ni de mesure précise [16].

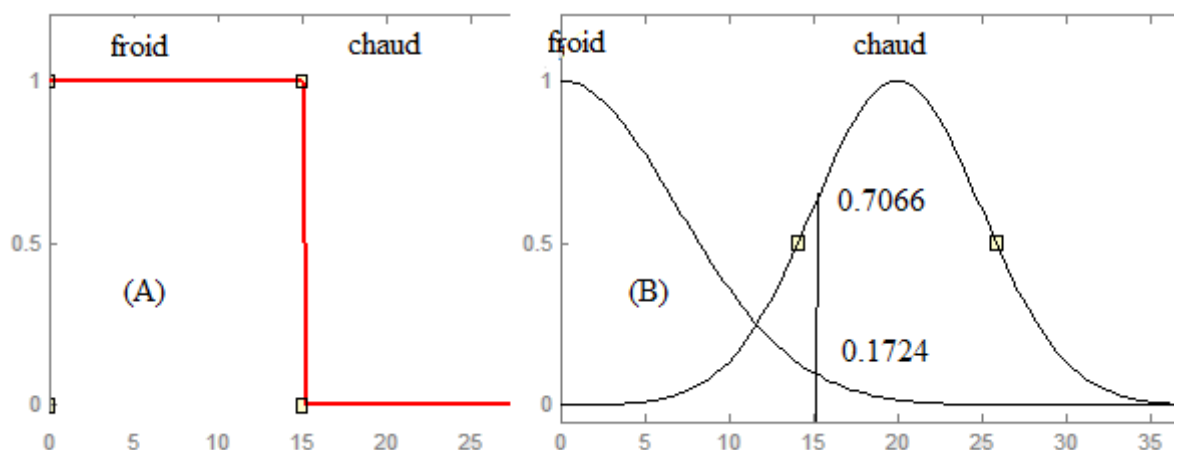


Figure III.1 Classification des températures d'une pièce en deux ensembles (A) logique classique (B) logique floue [16].

La logique floue permet de définir des sous-ensembles, comme «froid» ou «chaud», en introduisant la possibilité pour une valeur d'appartenir plus ou moins à chacun de ces sous-ensembles [16].

III.7 Propriétés des ensembles flous

III.7.1 Egalité

Deux ensembles flous A et X sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent les mêmes valeurs pour tout l'élément de X [2]:

$$\forall x \in X, \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (\text{III-1})$$

III.7.2 Inclusion

Un ensemble floue A est inclusion dans un ensemble floue B si toutes ses valeurs de fonction d'appartenance est sont inferieur à celle B sur toutes domaine X [2] :

$$\forall x \in X, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (\text{III-2})$$

III.7.3 Support

Le support est défini comme l'ensemble des valeurs du domaine X pour lesquelles la fonction d'appartenance n'est pas nulle [2].

$$\text{supp}(A) = \{x \in X, \mu(x) \neq 0\} \quad (\text{III-3})$$

III.7.4 Hauteur

La hauteur d'un ensemble flou A est la valeur max de la fonction d'appartenance sur le domaine X. Un ensemble flou A est dit normal si $h(A) = 1$ [2].

$$h(A) = \max_{x \in X} \mu_A(x) \quad (\text{III-4})$$

III.7.5 Noyau

Le noyau d'un ensemble flou A est l'ensemble qui contient tous les éléments qui appartiennent sûr et certain à A (leurs degrés d'appartenance sont égaux à 1) [2].

$$n(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\} \quad (\text{III-5})$$

III.7.6 Cardinal

Le cardinal d'un ensemble floue A est la somme des fonctions d'appartenance [2].

$$\text{card}(A) = \sum_{x \in X} \mu_A(x) \quad (\text{III-6})$$

III.8 Variable linguistique

La notion de variable linguistique permet de modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise est inconnue. Une variable linguistique, ou

variable floue, est donc une variable dont les valeurs floues appartiennent à des ensembles flous pouvant représenter des mots du langage naturel. Ainsi une variable floue peut prendre simultanément plusieurs valeurs linguistiques. Le domaine sur lequel ces termes et ces variables sont définies, constitue l'univers de discours. Le découpage de cet univers de discours par les termes flous est appelé une partition floue. Lorsque l'univers de discours est totalement recouvert par les termes flous, et que pour toutes valeurs, la somme des degrés d'appartenance est égale à 1, on parle alors de partition floue forte [17].

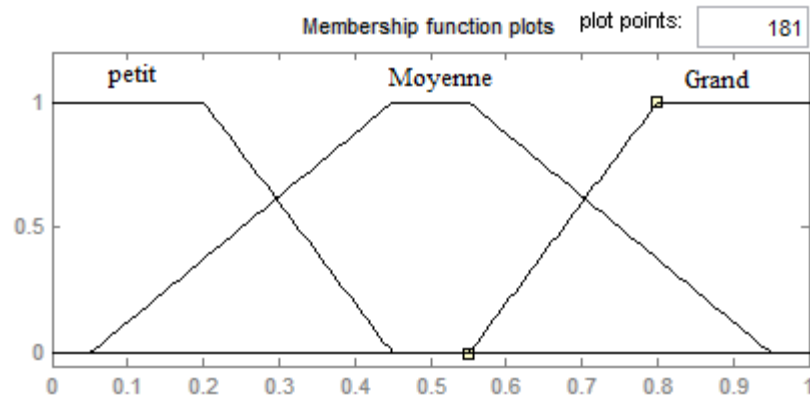


Figure III.2 Variable linguistique

Petit, Moyenne, Grand, c'est des termes linguistique

III.9 Fonction d'appartenance

Un sous-ensemble floue A dans un univers du discours X est caractérisé par sa fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui associe à chaque élément x de X une valeur dans l'intervalle des nombres réels $[0, 1]$ [17].

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (\text{III-7})$$

III.9.1 Différentes formes pour les fonctions d'appartenance

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

Les deux premières formes sont les plus souvent employées en raison de leur simplicité [18].

a. La fonction triangulaire

Elle est caractérisée par trois paramètres (a, b, c) : les sommets du triangle [17]:

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{III-8})$$

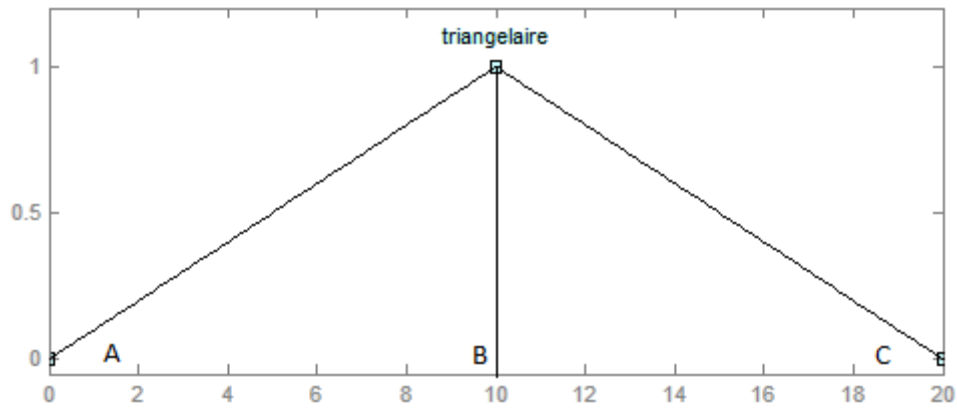


Figure III.3 Fonction triangulaire

a. La fonction trapézoïdale

Définie par quatre paramètres (a, b, c, d) [17] :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (\text{III-9})$$

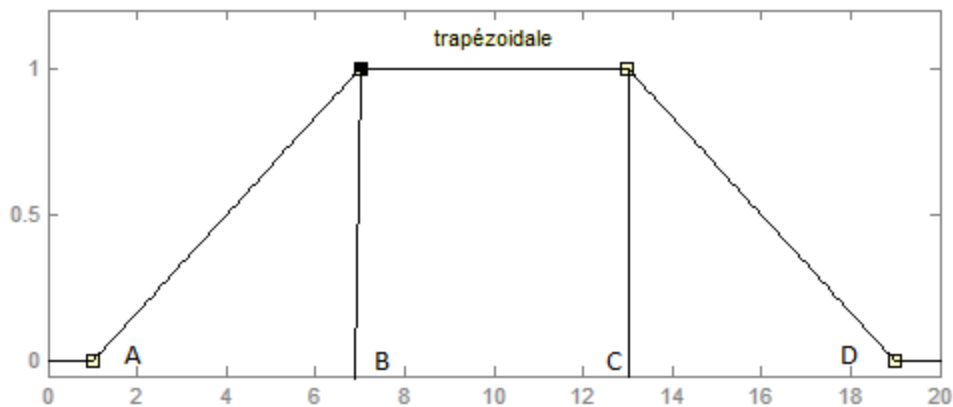


Figure III.4 Fonction trapézoïdale

b. La fonction Gaussienne

Définie par c et σ le centre, et l'épaisseur [17] :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{\sigma^2}\right) \quad (\text{III-10})$$

σ : L'écart type

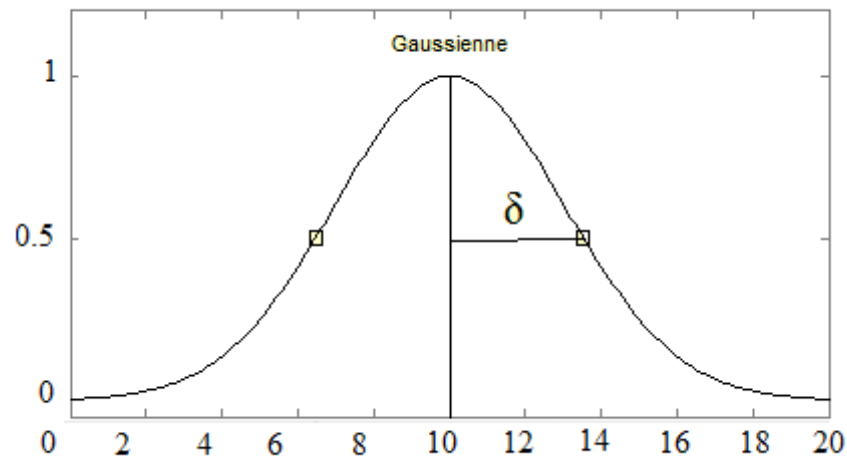


Figure III.5 Fonction Gaussienne

III.10 Les opérateurs de la logique floue

Une fois les ensembles flous définis, des mathématiques concernant ce type d'ensemble ont été développées. Les mathématiques élaborées ressemblent beaucoup à celles liées à la théorie des ensembles conventionnels. Les opérateurs d'union, d'intersection et de négation existent pour les deux types d'ensemble. Les opérateurs habituels, soit l'addition, la soustraction, la division et la multiplication de deux ou plusieurs ensembles flous existent aussi. Toutefois, ce sont les deux opérateurs d'union et d'intersection qu'on utilise le plus souvent dans la commande par la logique floue [18].

III.10.1 Opérateur ET

L'opérateur ET correspond à l'intersection de deux ensembles a et b et on écrit :

$$c = a \cap b \quad (\text{III-11})$$

Dans le cas de la logique floue, l'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la formation du minimum, qui est appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_a(x)$ et $\mu_b(x)$ des ensembles a et b, à savoir :

$$\mu_c = \min \{ \mu_a, \mu_b \} \quad (\text{III-12})$$

Où μ_c, μ_a, μ_b signifient respectivement le degré d'appartenance à l'ensemble a, b et c.

On parle alors d'opérateur minimum [18].

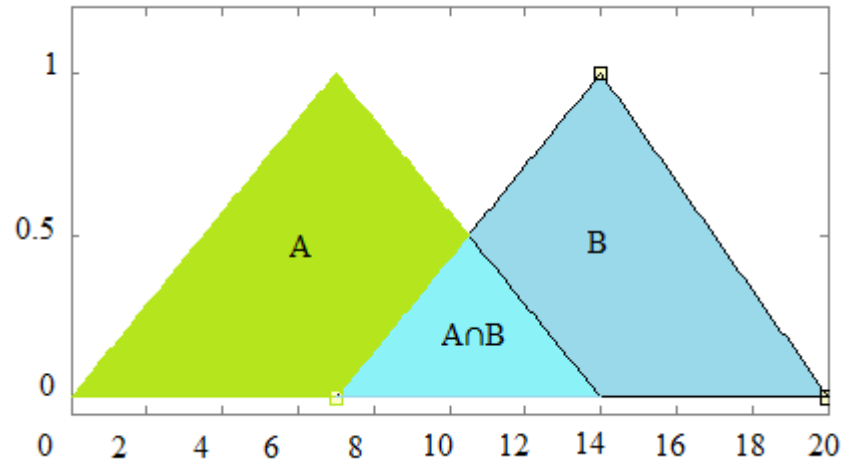


Figure III.6 Exemple pour l'opérateur ET (intersection)

III.10.2 Operateur OU

L'opérateur OU correspond à l'union de deux ensembles a et b et on écrit :

$$c = a \cup b \tag{III-13}$$

Il faut maintenant calculer le degré d'appartenance à l'ensemble c selon les degrés des ensembles a et b. Cela se réalise par la formation du maximum. On a donc l'opérateur maximum [18].

$$\mu_c = \max \{ \mu_a, \mu_b \} \tag{III-14}$$

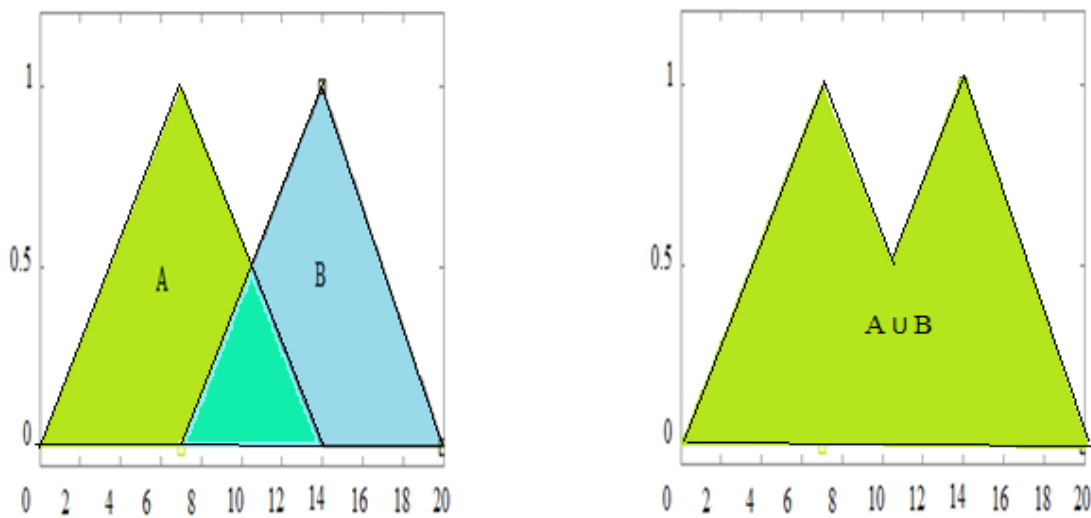


Figure III.7 Exemple pour l'opérateur OU (Union)

III.11 Command floue

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

On peut distinguer trois parties principales constituant la structure d'un régulateur floue [2].

III.11.1 Fuzzification

Les ensembles flous des variables d'entrée et leurs fonctions d'appartenance sont à définir en premier lieu [19].

L'étape de fuzzification permet de fournir les degrés d'appartenance de la variable floue à ses ensembles flous en fonction de la valeur réelle de la variable d'entrée. Le choix du nombre des ensembles flous, de la forme des fonctions d'appartenance, du recouvrement de ces fonctions et de leur répartition sur l'univers de discours n'est pas évident. Il y a cependant des facteurs qui sont plus important que d'autres [19].

III.11.2 Moteur d'inférence

Cette étape consiste à relier les variables physiques d'entrée du régulateur (grandeurs mesurées ou estimées), qui sont transformées en variables linguistiques pendant l'étape de fuzzification, la variable de sortie du contrôleur sous sa forme linguistique, par des règles mentales traduisant une action ou une décision linguistique sur la commande à la sortie du régulateur, face à toute situation se présentant à l'entrée de ce régulateur[2].

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 [2].

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' [2].

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 [2].

- 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 [2].

III.11.3 Défuzzification

Par cette étape se fait le retour aux grandeurs de sortie réelles. Il s'agit de calculer, à partir des degrés d'appartenance à tous les ensembles flous de la variable de sortie, l'abscisse qui correspond à la valeur de cette sortie. Différentes méthodes sont utilisées [19] :

a. Méthode de centre de gravité

C'est la méthode de Défuzzification la plus courante. L'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultant de l'inférence correspond à la valeur de sortie du régulateur [19].

$$dU_n = \frac{\int x \mu_R(x) dx}{\int \mu_R(x) dx} \quad (\text{III-15})$$

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

c. Méthode de valeur maximum

Cette méthode est beaucoup plus simple. La valeur de sortie est choisie comme l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance [19].

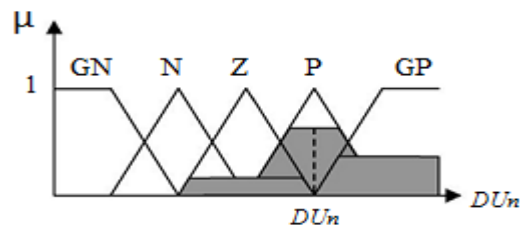


Figure III.8 Defuzzification par valeur maximum [19]

III.12 conclusion

Cette présentation a pour objectif de présenter les notions fondamentales et les principes de base de la logique floue. On a commencé par montrer la différence entre lui et la logique classique et nous avons illustré des éléments de base de la théorie des systèmes flous.

La logique floue a prouvé une grande efficacité de point de vue analyse et interprétation sans avoir recours au jugement d'un expert humain.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1 Introduction

La logique floue, 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 l'effet des paramètres d'électrodéposition (Température, Densité, pH, vitesse d'agitation, concentration d' Al_2O_3) sur la dureté du revêtement (H), la masse de dépôt (Md) et le volume fractionnel (Vf).

IV.2 Procédure et données expérimentales

En se basant sur le travail expérimental élaboré par S. Jeyaraj et al [20] qu'ils ont utilisé un bain de Watts pour la préparation des revêtements composites Al_2O_3 (figure IV. 1)

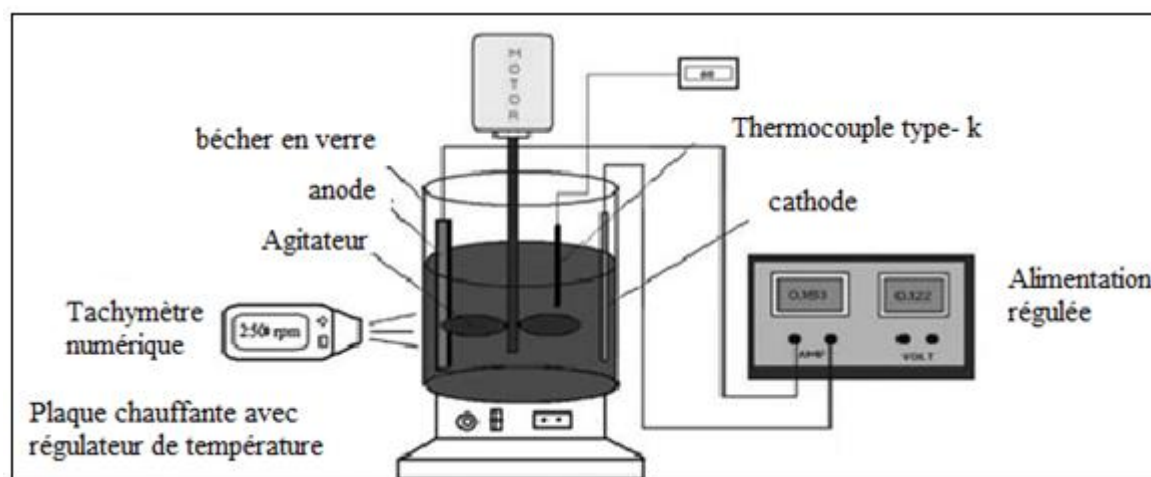


Figure IV.1 Schéma de conventionnel Type électro-Co-dépôt technique [20]

Pour étudier l'effet des paramètres d'électrodéposition sur la dureté du revêtement nous proposons d'utilisée une méthode de simulation basée sur la théorie du logique floue (Mamdani) avec le logiciel MATLAB, en se basant sur les donnée expérimentales regroupés dans les tableaux IV.1 et IV.2 obtenues depuis les références [20] et [21].

Tableau IV.1 Données expérimentales composite $Ni - Al_2O_3$ [20]

Essai	I (A/dm ²)	PH	T (°C)	Co (g/l)	Va (tr/min)	H (HV)	Md (mg)	Vf (%)
1	1	2,5	30	10	200	267	15,36	93,5
2	1	2,5	30	10	250	227	14,35	90,4
3	1	2,5	30	10	300	243	19,25	124,5
4	1	3,5	45	20	200	547	21,13	221
5	1	3,5	45	20	250	451	22,96	190,1
6	1	3,5	45	20	300	418	19,44	120

7	1	4,5	60	30	200	389	16,35	106,3
8	1	4,5	60	30	250	374	18,3	91,1
9	1	4,5	60	30	300	496	19,63	128,4
10	2	2,5	45	30	200	294	21,54	164,4
11	2	2,5	45	30	250	482	23,86	134,8
12	2	2,5	45	30	300	495	13,34	136,8
13	2	3,5	60	10	200	362	18,87	112,4
14	2	3,5	60	10	250	411	17,14	127,2
15	2	3,5	60	10	300	329	15,96	96,1
16	2	4,5	30	20	200	513	14,56	197,8
17	2	4,5	30	20	250	493	13,75	181,8
18	2	4,5	30	20	300	307	18,11	129,6
19	4	2,5	60	20	200	622	24,72	339
20	4	2,5	60	20	250	563	22,42	339
21	4	2,5	60	20	300	571	21,32	291,7
22	4	3,5	30	30	200	614	24,92	209,3
23	4	3,5	30	30	250	387	23,5	218,5
24	4	3,5	30	30	300	465	25,27	207,8
25	4	4,5	45	10	200	655	14,86	279
26	4	4,5	45	10	250	639	11,26	215,8
27	4	4,5	45	10	300	579	12,51	282,3

Tableau IV.2 Données expérimentales composite Ni – P – Al₂O₃ avec I=10A/dm² et [AL₂O₃]= 10g/l [21].

Essai	P (%)	D, C	H (HV)
1	2,64	0,2	642
2	2,7	0,22	644
3	2,75	0,24	646
4	2,84	0,26	648
5	2,93	0,28	650
6	2,99	0,3	652
7	3,05	0,32	654
8	3,13	0,34	656
9	3,2	0,36	658
10	3,28	0,38	660
11	3,37	0,4	662
12	3,43	0,43	664

13	3,52	0,45	666
14	3,62	0,47	669
15	3,69	0,5	671
16	3,72	0,51	672
17	3,77	0,53	674
18	3,83	0,55	676
19	3,89	0,57	678
20	3,94	0,59	680
21	3,98	0,6	681
22	4,04	0,62	683
23	4,07	0,64	685
24	4,1	0,65	686
25	4,15	0,67	688
26	4,2	0,68	689
27	4,23	0,7	690

IV.2.1 Système flou

Nous avons choisi, deux systèmes d'inférence flous de type Mamdani pour les deux types de revêtements.

a. Composite Ni-Al₂O₃

Nous utilisons un système flou avec 5 entrées : la densité de courant(I), la température (T) le PH de bain, la concentration (Co), et la vitesse d'agitation (Va)), et trois variables de sortie : la dureté (H), la masse de dépôt (Md) et le volume fractionnel (Vf). Figure (IV.2).

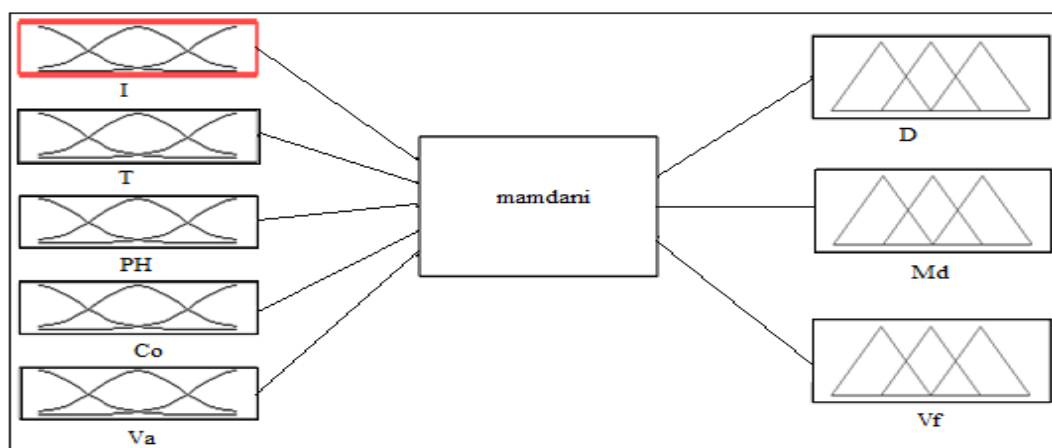


Figure IV.2 Système flou pour le composite (Ni-Al₂O₃)

b. Composite Ni-P-Al₂O₃

Nous utilisons un système flou avec 2 entrées : le pourcentage (la teneur) de phosphore (P%), et le cycle de service (D, C), et une variable de sortie : la dureté figure (IV.3).

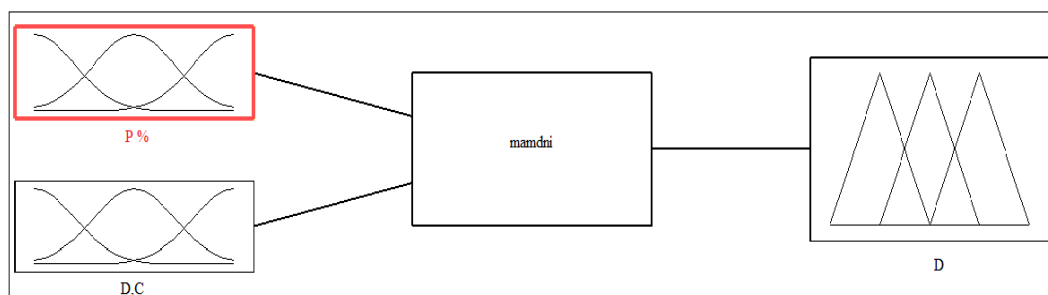


Figure IV.3 Système flou (Ni-P-Al₂O₃) : la dureté

IV.2.2 Modélisation floue

a. Les variables flous

Composite Ni-Al₂O₃

Dans la construction de notre premier modèle (*Ni-Al₂O₃*), nous avons choisi comme paramètres d'entrée : la densité du courant, la température, le PH du bain, la concentration en alumine et la vitesse d'agitation, et comme variables de sortie nous avons choisi la dureté, la masse de dépôt et le volume fractionnel.

Tableau IV.3 Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite *Ni-Al₂O₃*

	Valeur Mini	Valeur MAX
Les paramètres d'entrée		
La densité de courant (I) (A / dm^2)	1	4
La température (T) ($^{\circ}C$)	30	60
PH	2.5	3.5
Concentration (Co) (g/l)	10	30
Vitesse d'agitation (V_a) (tr / min)	200	300
Les paramètres de sortie		
La dureté (H) (HV)	227	655
La masse de dépôt (Md) (mg)	90.4	339
Le volume fractionnel (Vf) (%)	11.26	24.92

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 densité du courant) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (IV.4)



Figure IV.4 Variables Linguistiques pour la Densité de courant

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (la température) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (IV.5)



Figure IV.5 Variables linguistiques pour la Température

Les variables linguistiques pour la troisième variable (le pH du bain) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (IV.6)

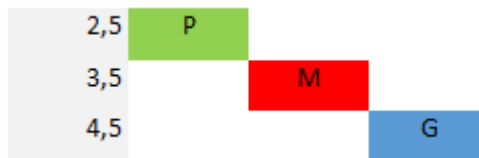


Figure IV.6 Variables Linguistiques pour PH

Les variables linguistiques pour la quatrième variable (la concentration en alumine) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (IV.7)



Figure IV.7 Variables Linguistiques pour la Concentration en Alumine

Les variables linguistiques pour la cinquième variable (la vitesse d'agitation) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (IV.8)

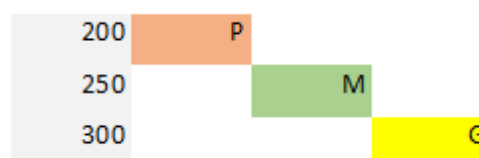


Figure IV.8 Variables Linguistiques pour la Vitesse d'Agitation

Afin de bien définir les variables linguistiques pour les sorties nous avons utilisé le nuage de points (figure IV.9, IV.10 et IV.11) qui présente la distribution des valeurs de la dureté, la masse de dépôt et le volume fractionnel 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.

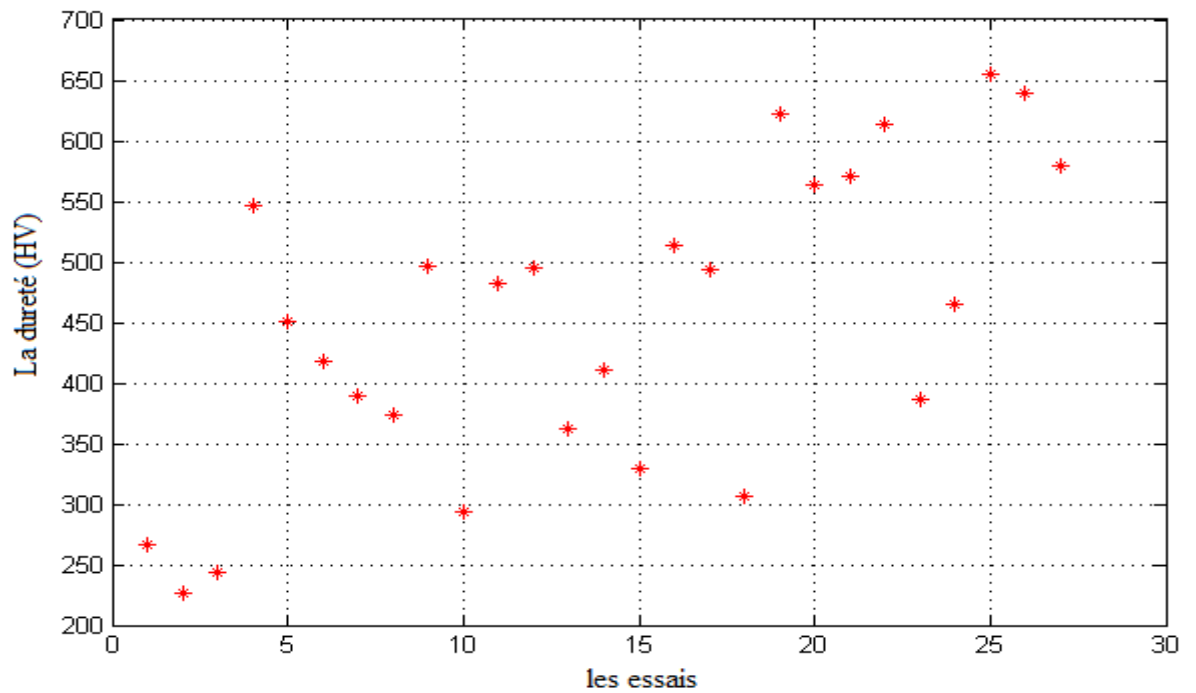


Figure IV.9 Les valeurs de la dureté en ensembles des essais

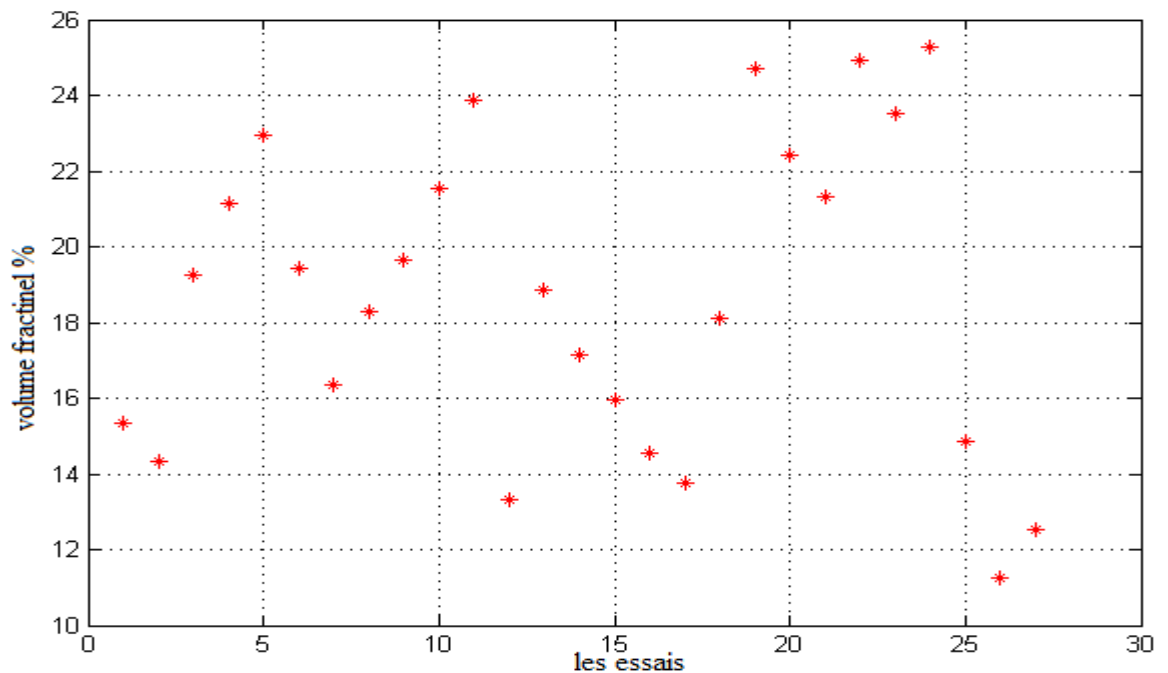


Figure IV.10 Les valeurs de volume fractionnel en ensembles des essais

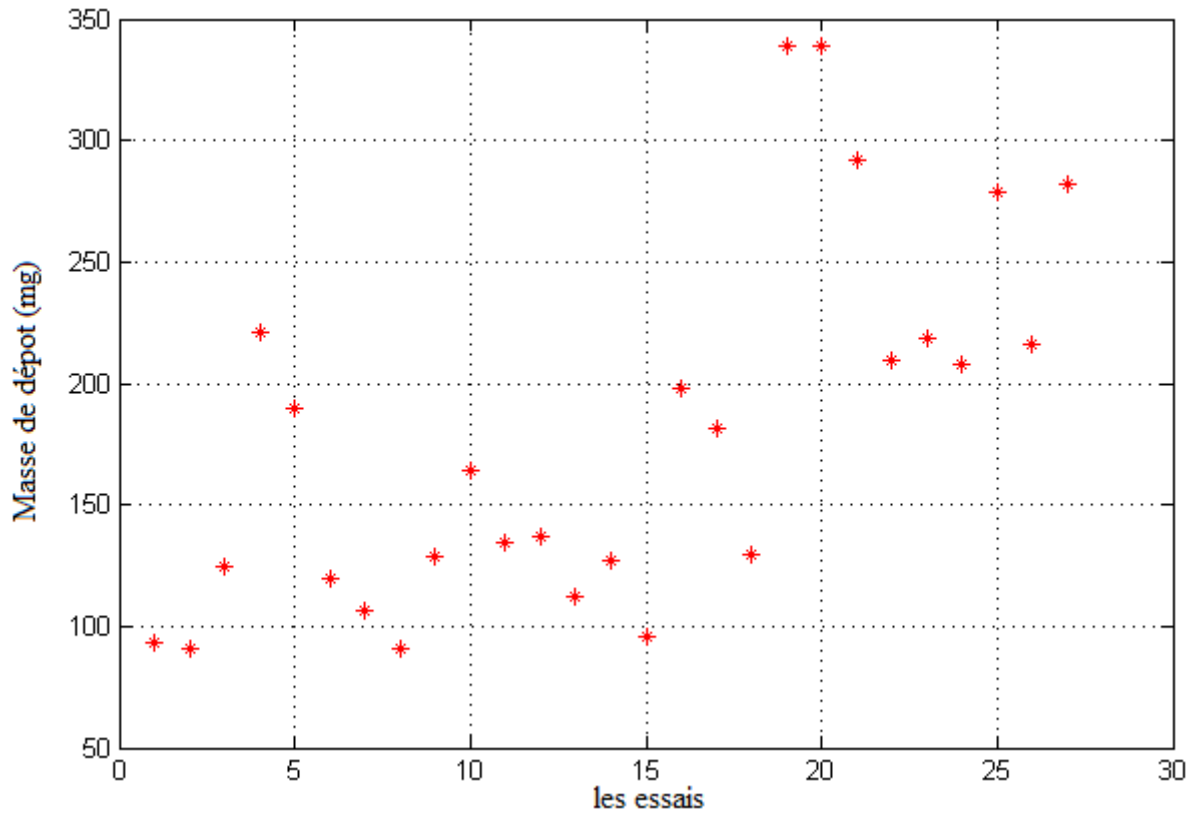


Figure IV.11 **Figure IV.10** *Les valeurs de Masse de Dépôt en ensembles des essais*

En se basant sur la figure (IV.9) les variables linguistiques pour la première sortie (la dureté) est choisie comme il est indiqué dans la figure (IV. 12)

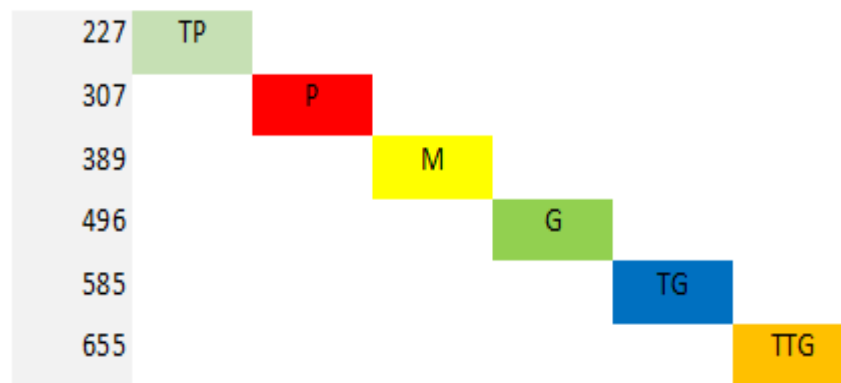


Figure IV.12 *Variables Linguistiques pour la Dureté*

En se basant sur la figure (IV.10) les variables linguistiques pour la deuxième sortie (la masse de dépôt) est choisie comme il est indiqué dans la figure (IV. 13)

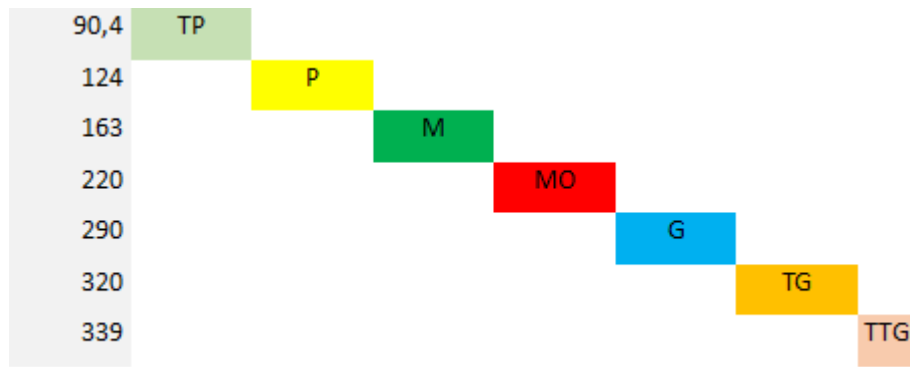


Figure IV.13 Variables Linguistiques pour la Masse de Dépôt

En se basant sur la figure (IV.11) les variables linguistiques pour la troisième sortie (le volume fractionnel) est choisie comme il est indiqué dans la figure (IV. 14)

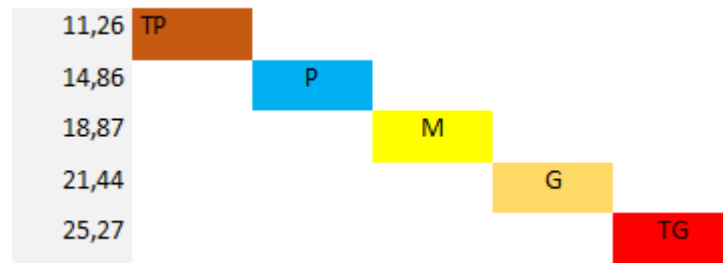


Figure IV.14 Variables Linguistiques pour Volume Fractionnel

Composite Ni-P-Al₂O₃

Dans la construction du deuxième modèle (*Ni-P-Al₂O₃*), figure (IV.3) nous avons choisi comme paramètres d’entrée : la teneur en phosphore, et la densité de courant et comme variable de sortie nous avons choisir la dureté du revêtement.

Tableau IV.4 Valeurs minimales et maximales des variables d’entrées et de sortie pour le système flou composite *Ni-P-Al₂O₃*

	Valeur MIN	Valeur MAX
Les paramètres d’entrée		
La teneur en phosphore (P) (%)	1	10
Le cycle de service (D,C)	0.2	0.7
Le paramètre de sortie		
La dureté (H) (HV)	642	690.3

Les variables linguistiques pour la première variable (la teneur en phosphore) sont choisis comme il est indiqué dans la figure (IV.15)

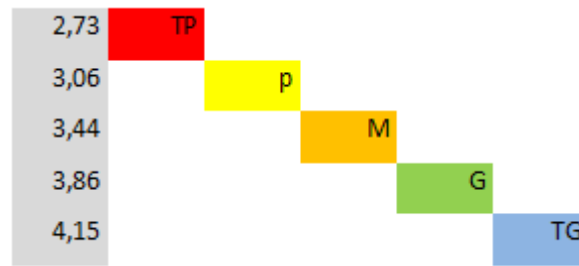


Figure IV.15 Variables Linguistiques pour Teneur de Phosphore

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (le cycle de service) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (IV.16)

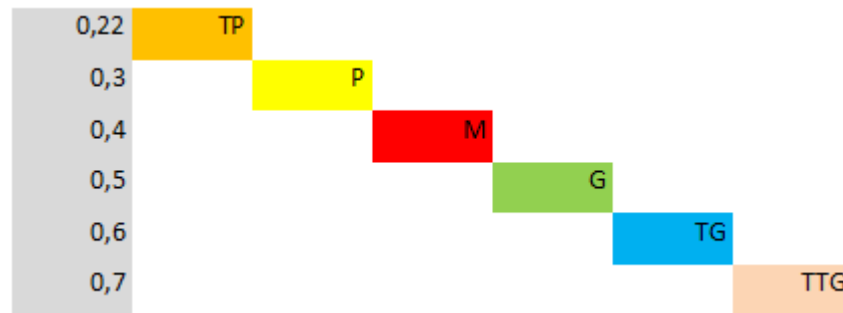


Figure IV.16 Variables Linguistiques pour le Cycle de Service

Afin de bien définir les variables linguistiques pour la sortie nous avons utilisé le nuage de points figure (IV.17) qui présente la distribution des valeurs de la dureté 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.

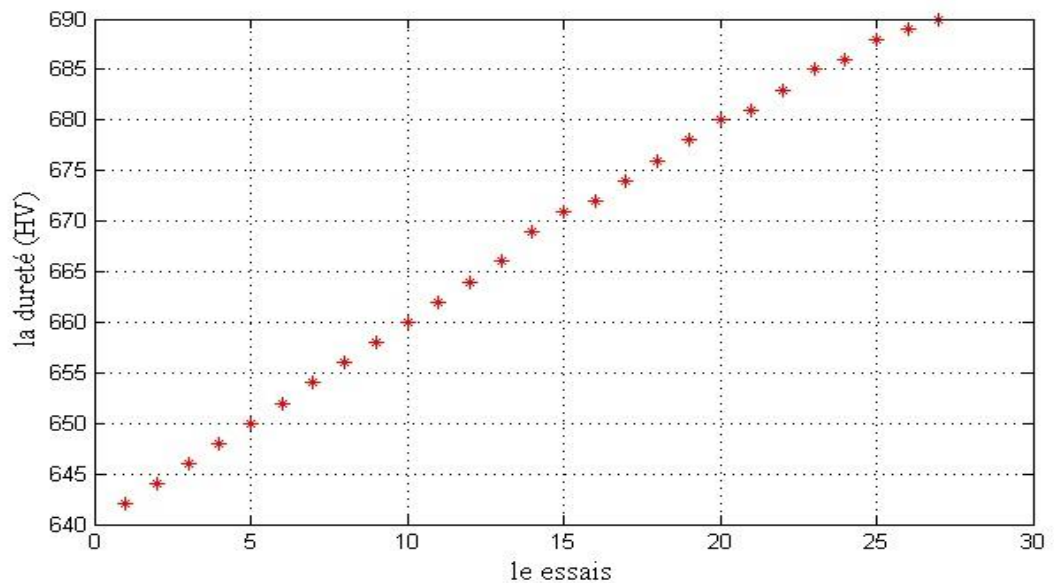


Figure IV.17 Les valeurs de la Dureté en ensembles des essais

Alors les variables linguistiques pour la sortie (la dureté) est choisie comme il est indiqué dans la figure (IV.18)

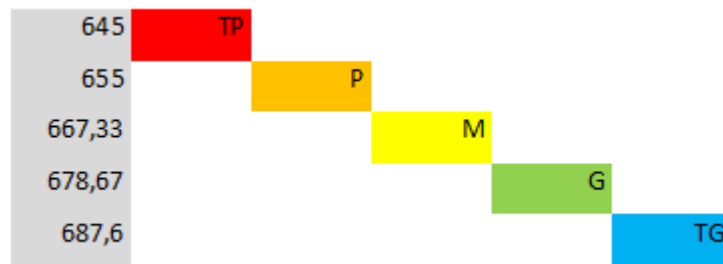


Figure IV.18 Variables linguistiques pour la Dureté

d. 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.

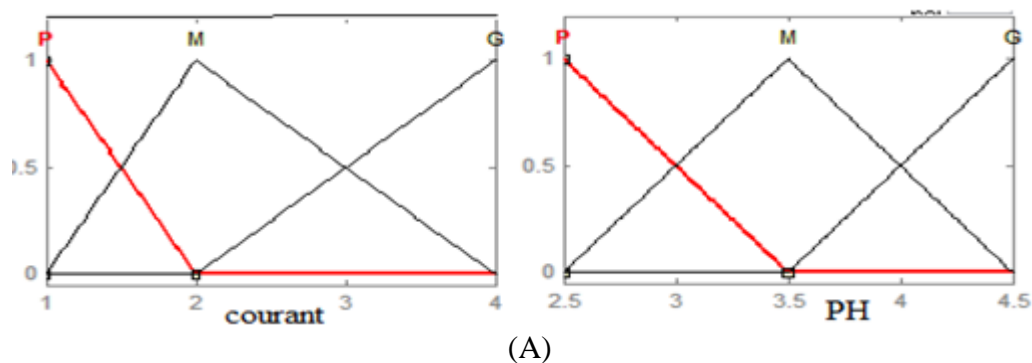
Les sous-ensembles flous sont utilisés soit pour modéliser l'incertitude et l'imprécision, soit pour représenter des informations précises sous forme lexicale assimilable par un système expert.

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 IV. 19, IV. 20 et IV. 21

Utilisation des fonctions d'appartenance triangulaires



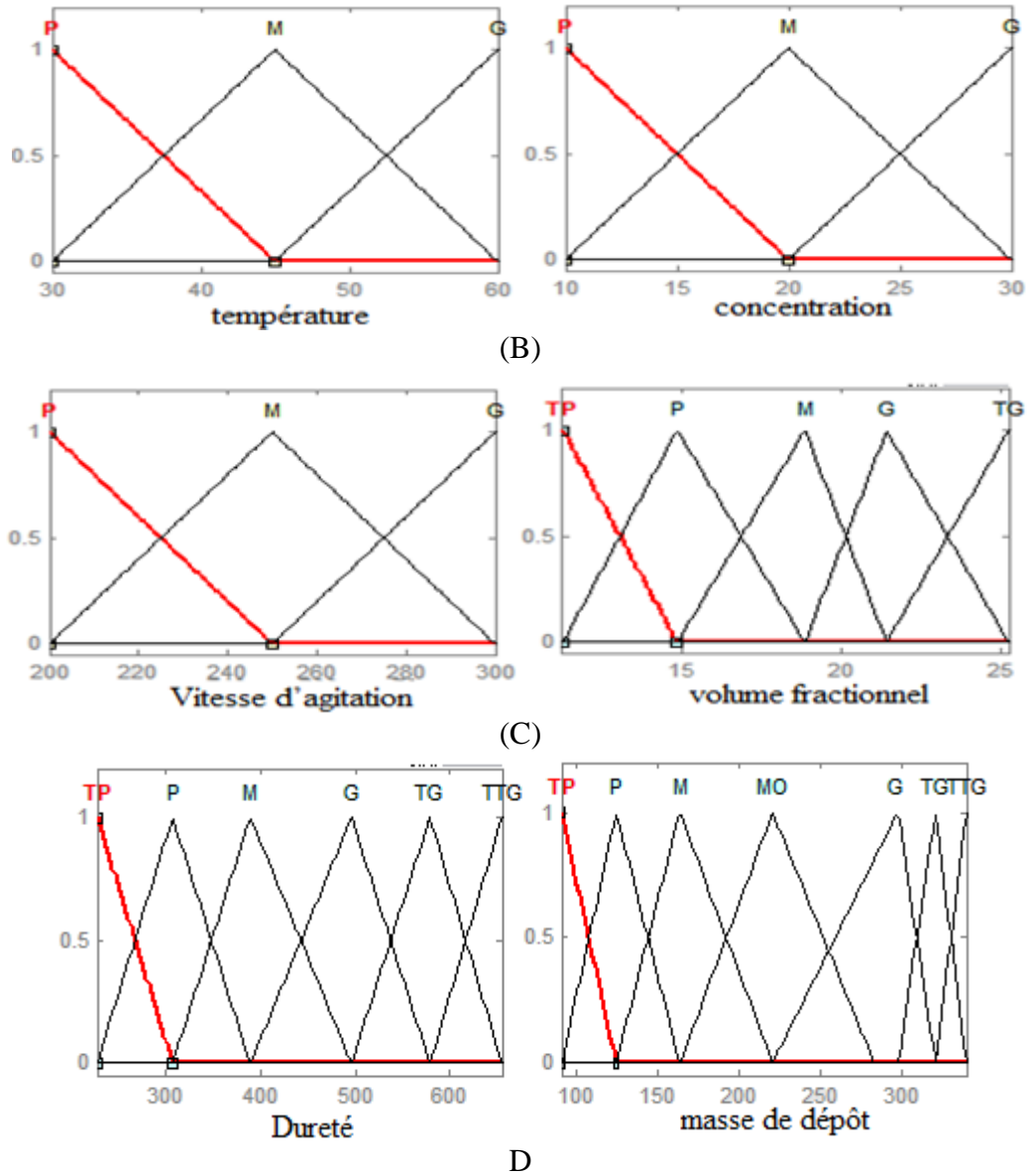
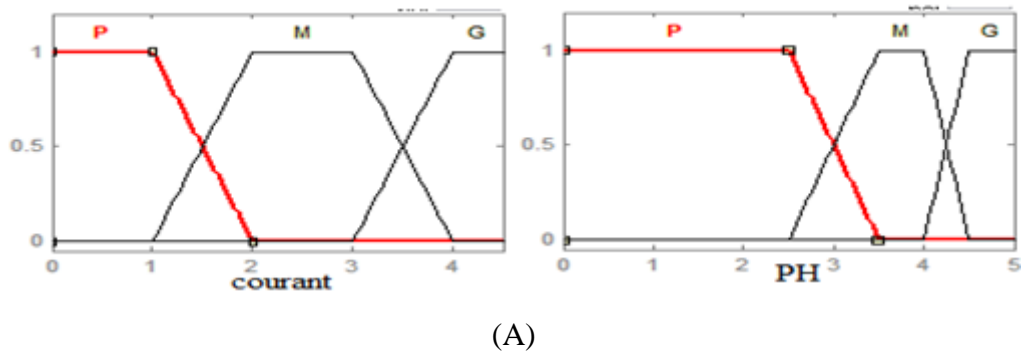
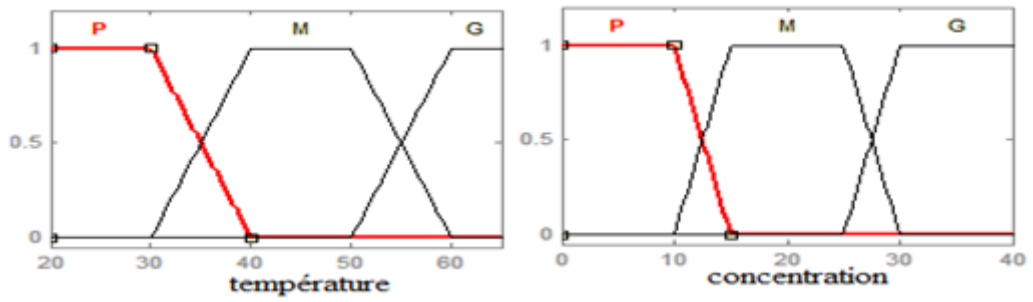


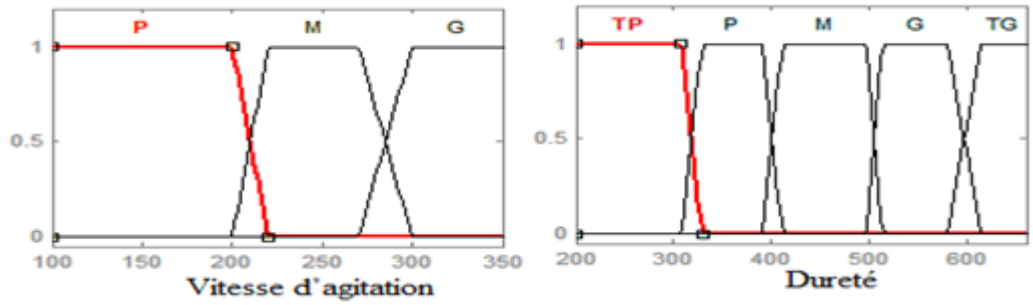
Figure IV.19 Les fonctions d'appartenance triangulaires (A), (B), (C), (D)

Utilisation des fonctions d'appartenance trapézoïdales

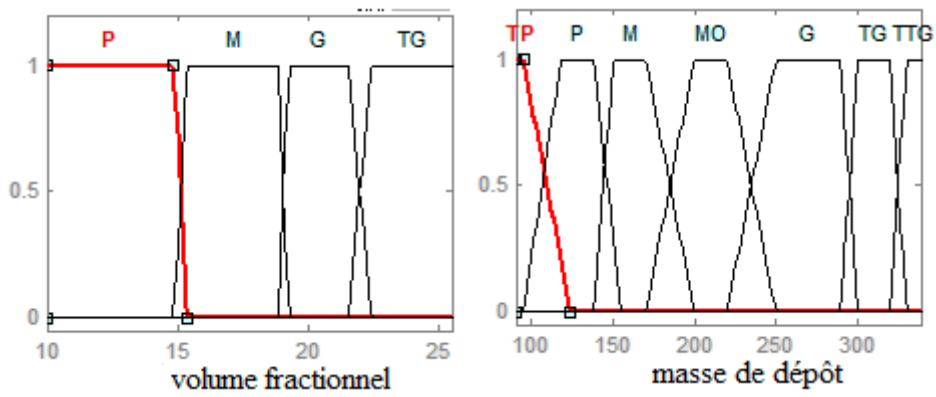




(B)



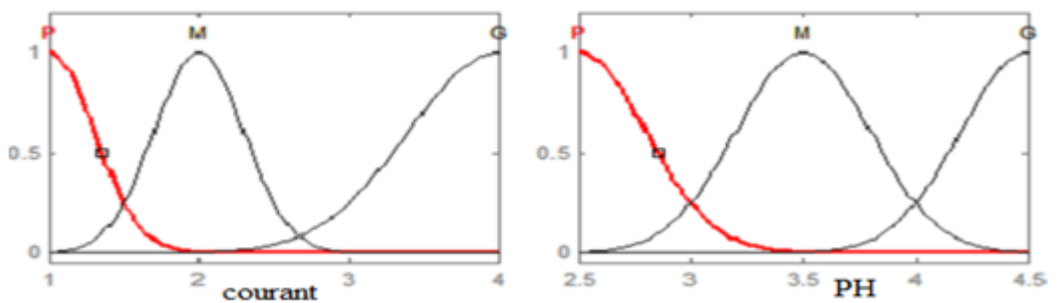
(C)



(D)

Figure IV.20 Les fonctions d'appartenance trapézoïdale(A), (B), (C), (D)

Utilisation des fonctions d'appartenance gaussienne



(A)

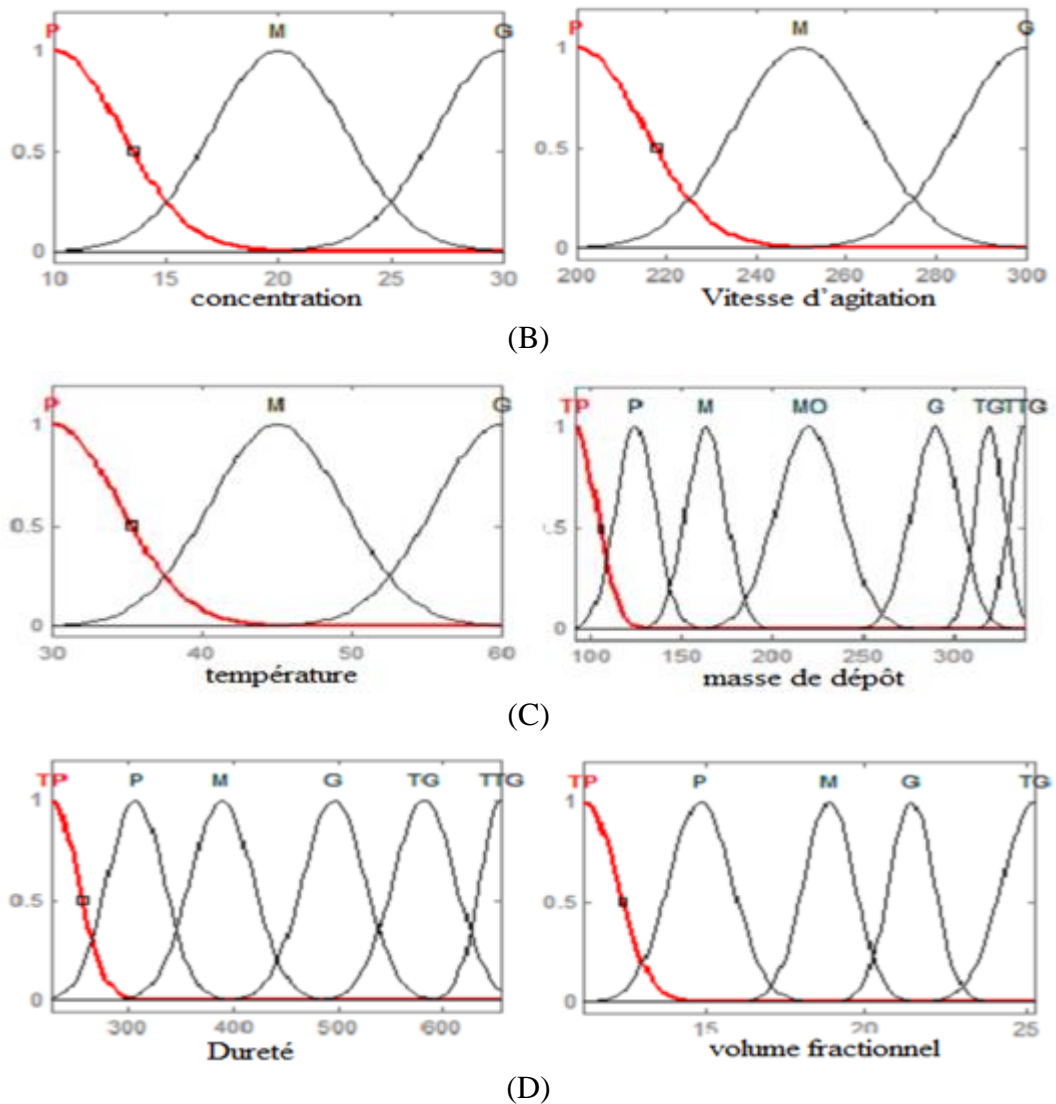


Figure IV.21 Les fonctions d'appartenance gaussienne (A), (B), (C), (D)

IV.3 Les règles floues

Vingt-sept (27) règles floues ont été établies en fonction des conditions expérimentales indiquées dans les tableaux : IV.1 et IV.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-Al₂O₃

Si *I* est (variable linguistique) **et** *PH* est (variable linguistique) **et** *T* est (variable linguistique) *Co* est (variable linguistique) *Va* est (variable linguistique) **Alors** *D* est (variable linguistique) *Md* est (variable linguistique) *Vf* est (variable linguistique)

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

Tableau IV.5 Les règles floues pour le composite (Ni-Al₂O₃)

Essai	I	PH	T	Va	[Al ₂ O ₃]	H	Md	Vf
1	P	p	P	P	P	TP	P	TP
2	P	p	P	P	M	TP	P	TP
3	P	p	P	P	G	TP	M	P
4	P	M	M	M	P	TG	G	MO
5	P	M	M	M	M	G	G	M
6	P	M	M	M	G	M	M	P
7	P	G	G	G	P	M	P	P
8	P	G	G	G	M	M	M	TP
9	P	G	G	G	G	G	M	P
10	M	P	M	G	P	P	G	M
11	M	P	M	G	M	G	TG	P
12	M	P	M	G	G	G	P	P
13	M	M	G	P	P	M	M	P
14	M	M	G	P	M	M	M	P
15	M	M	G	P	G	P	P	TP
16	M	G	P	M	P	G	P	MO
17	M	G	P	M	M	G	P	M
18	M	G	P	M	G	P	M	P
19	G	P	G	M	P	TG	TG	TTG
20	G	P	G	M	M	TG	G	TTG
21	G	P	G	M	G	TG	G	G
22	G	M	P	G	P	TG	TG	MO
23	G	M	P	G	M	M	G	MO
24	G	M	P	G	G	G	TG	MO
25	G	G	M	P	P	TTG	P	G
26	G	G	M	P	M	TTG	TP	MO
27	G	G	M	P	G	TG	TP	G

e. Pour le Composite Ni-P-Al₂O₃

Si $P\%$ est (variable linguistique) et D, C est (variable linguistique) Alors D est (variable linguistique).

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

Tableau IV.6 Les règles floues pour le composite (Ni-P-Al₂O₃)

Essai	P (%)	D, C	H
1	TP	TP	TP
2	TP	TP	TP
3	TP	TP	TP
4	TP	P	TP
5	P	P	P
6	P	P	P
7	P	P	P
8	P	P	P
9	P	M	P
10	M	M	P
11	M	M	M
12	M	M	M
13	M	M	M
14	M	G	M
15	G	G	M
16	G	G	M
17	G	G	G
18	G	G	G
19	G	TG	G
20	G	TG	G
21	G	TG	G
22	G	TG	G
23	TG	TG	TG
24	TG	TG	TP
25	TG	TTG	TP
26	TG	TTG	TP
27	TG	TTG	TP

IV.4 Résultats et discussion

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

IV.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 IV-1. Le pourcentage d'erreurs individuelles a été obtenu en divisant la différence absolue de la prédiction par la valeur de mesure.

$$e_i = \left(\frac{N_{ex} - V_P /}{V_{ex}} \right) \times 100\% \quad (IV-1)$$

La précision est calculée en trouvant l'approchement de la valeur prédite à la valeur mesurée. Dans l'équation IV-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.

$$A = \frac{1}{N} \sum \left(1 - \frac{N_{ex} - V_P /}{V_{ex}} \right) \times 100\% \quad (IV-2)$$

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

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

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

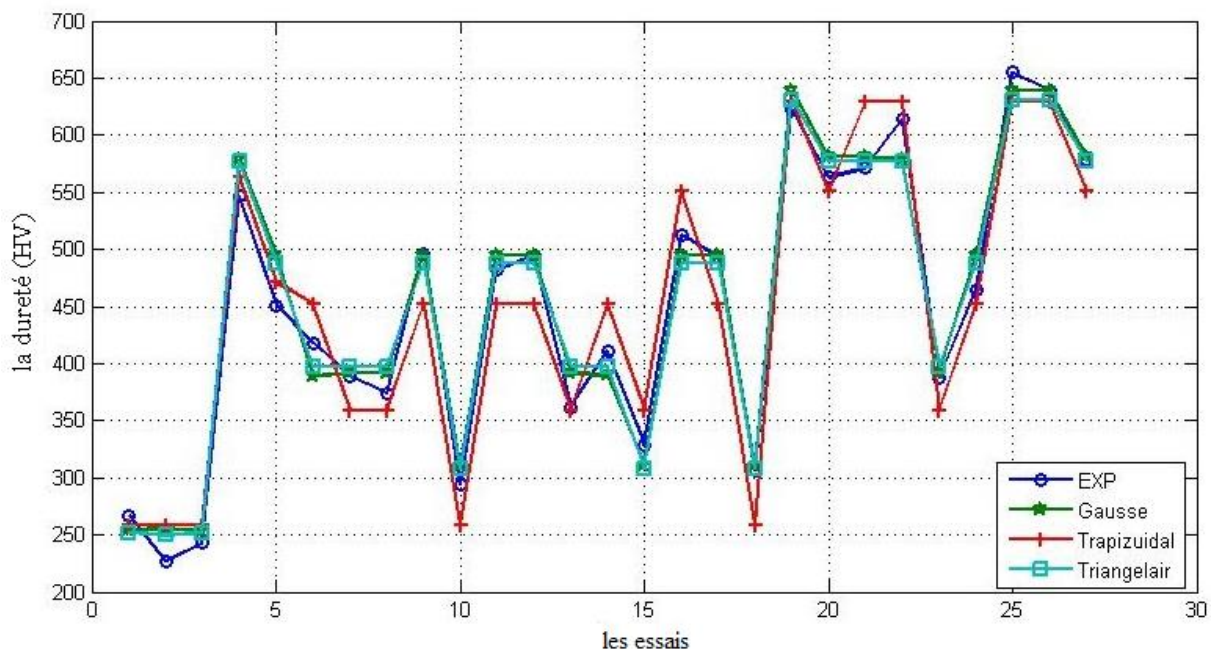


Figure IV.22 Variation de la Dureté (trapézoïdale, triangulaire et gaussienne) en fonction du nombre d'essais

La figure (IV.22) 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.

Pour faire 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 :

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

Pour : $N = 27$ on a :

En utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires l'écart-type est de l'ordre de 19.87

En utilisant des fonctions d'appartenance trapézoïdale l'écart-type est de l'ordre de 30.20

En utilisant des fonctions d'appartenance gaussienne l'écart-type est de l'ordre de 19.19

Donc les résultats proches aux résultats expérimentaux sont celles obtenues avec des fonctions d'appartenance gaussienne.

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

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

Tableau VI.7 Les résultats du système flou pour le composite Ni-Al₂O₃

Essai	Paramètres d'électrodéposition					Résultats de la dureté			
	I	PH	T	Co	Va	D_{ex}	D_p	Erreur %	Précision %
1	1	2,5	30	10	200	267	254	4,86891386	95,1310861
2	1	2,5	30	10	250	227	255	12,3348018	87,6651982
3	1	2,5	30	10	300	243	253	4,11522634	95,8847737
4	1	3,5	45	20	200	547	579	5,85009141	94,1499086
5	1	3,5	45	20	250	451	495	9,75609756	90,2439024
6	1	3,5	45	20	300	418	389	6,93779904	93,062201
7	1	4,5	60	30	200	389	391	0,51413882	99,4858612
8	1	4,5	60	30	250	374	391	4,54545455	95,4545455
9	1	4,5	60	30	300	496	495	0,2016129	99,7983871
10	2	2,5	45	30	200	294	310	5,44217687	94,5578231
11	2	2,5	45	30	250	482	495	2,69709544	97,3029046
12	2	2,5	45	30	300	495	495	0	100
13	2	3,5	60	10	200	362	391	8,01104972	91,9889503
14	2	3,5	60	10	250	411	390	5,10948905	94,8905109

15	2	3,5	60	10	300	329	310	5,77507599	94,224924
16	2	4,5	30	20	200	513	495	3,50877193	96,4912281
17	2	4,5	30	20	250	493	495	0,40567951	99,5943205
18	2	4,5	30	20	300	307	310	0,9771987	99,0228013
19	4	2,5	60	20	200	622	639	2,73311897	97,266881
20	4	2,5	60	20	250	563	581	3,19715808	96,8028419
21	4	2,5	60	20	300	571	581	1,75131349	98,2486865
22	4	3,5	30	30	200	614	579	5,70032573	94,2996743
23	4	3,5	30	30	250	387	391	1,03359173	98,9664083
24	4	3,5	30	30	300	465	495	6,4516129	93,5483871
25	4	4,5	45	10	200	655	639	2,44274809	97,5572519
26	4	4,5	45	10	250	639	639	0	100
27	4	4,5	45	10	300	579	581	0,34542314	99,6545769

La précision=96.12%

Tableau VI.8 Les résultats du système flou pour le composite Ni-P-Al₂O₃

Essai	Paramètres d'électrodéposition		Résultat de la dureté			
	P%	D, C	H _{EX}	H _P	Erreur %	Précision %
1	2,64	0,2	642	641	0,15576324	99,8442368
2	2,7	0,22	644	642	0,31055901	99,689441
3	2,75	0,24	646	643	0,46439628	99,5356037
4	2,84	0,26	648	649	0,15432099	99,845679
5	2,93	0,28	650	654	0,61538462	99,3846154
6	2,99	0,3	652	654	0,30674847	99,6932515
7	3,05	0,32	654	654	0	100
8	3,13	0,34	656	654	0,30487805	99,695122
9	3,2	0,36	658	656	0,30395137	99,6960486
10	3,28	0,38	660	660	0	100
11	3,37	0,4	662	660	0,3021148	99,6978852
12	3,43	0,43	664	660	0,60240964	99,3975904
13	3,52	0,45	666	660	0,9009009	99,0990991
14	3,62	0,47	669	667	0,29895366	99,7010463
15	3,69	0,5	671	672	0,1490313	99,8509687
16	3,72	0,51	672	672	0	100
17	3,77	0,53	674	672	0,29673591	99,7032641

18	3,83	0,55	676	672	0,59171598	99,408284
19	3,89	0,57	678	677	0,14749263	99,8525074
20	3,94	0,59	680	678	0,29411765	99,7058824
21	3,98	0,6	681	678	0,44052863	99,5594714
22	4,04	0,62	683	682	0,14641288	99,8535871
23	4,07	0,64	685	686	0,1459854	99,8540146
24	4,1	0,65	686	687	0,14577259	99,8542274
25	4,15	0,67	688	689	0,14534884	99,8546512
26	4,2	0,68	689	689	0	100
27	4,23	0,7	690	690	0	100

La précision = 99.78

IV.4.3 Représentation schématique des résultats

Les fonctions obtenues par simulation par logique floue sont représentées dans les figures de : IV.23 a IV.27.

a. Composite Ni-Al₂O₃

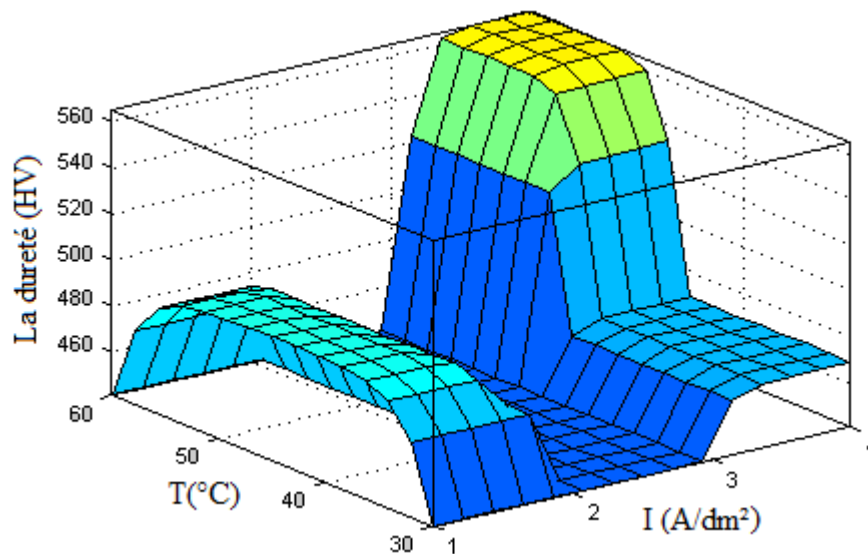


Figure IV.23 Fonction $H = f(T, I)$ avec $PH = 3.5$, $Co = 20$ g/l, $Va = 300$ tr/min

La figure (IV.23) représente la variation de la dureté en fonction de la température et la densité du courant, la figure montre que les valeurs maximales de la dureté sont obtenues pour des valeurs maximales de la température et de la densité du courant. Donc pour avoir un revêtement dur il faut utiliser les valeurs les plus élevés (dans la mesure de possible) de la température et de la densité du courant.

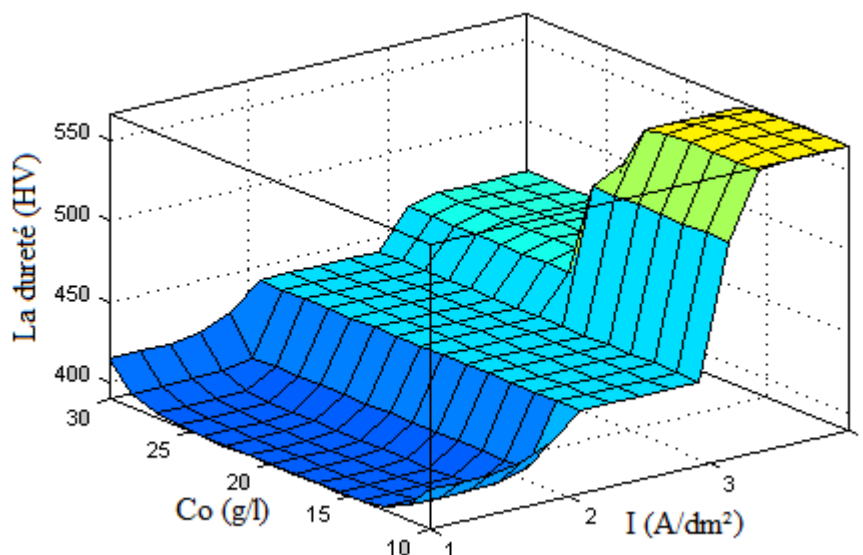


Figure IV.24 Fonction $H = f (Co, I)$ avec $PH= 3.5$, $T=45^{\circ}C$, $Va = 300tr / min$

La figure (IV.24) qu'il y a une corrélation positive entre la dureté et le courant avec une concentration d' Al_2O_3 de 10 à 15 g/l, nous notons aussi qu'à chaque fois la concentration d' Al_2O_3 augmente la dureté est clairement diminuée.

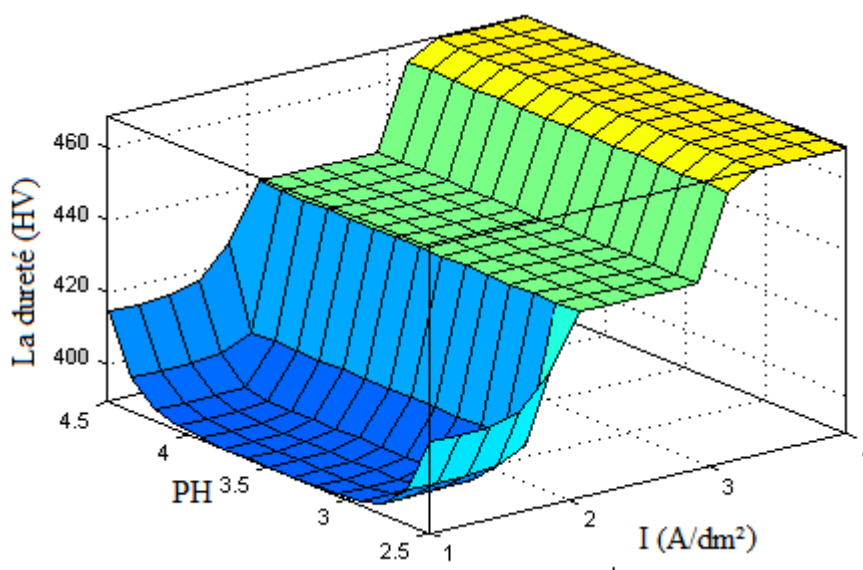


Figure IV.25 Fonction $H = f (PH, I)$ avec $Co= 20g / l$, $T=45^{\circ}C$, $Va = 300tr / min$

La figure (IV.25) représente la variation de la dureté en fonction du pH et la densité du courant, la figure montre que les valeurs maximales de la dureté sont obtenues pour des valeurs maximales du pH et de la densité du courant.

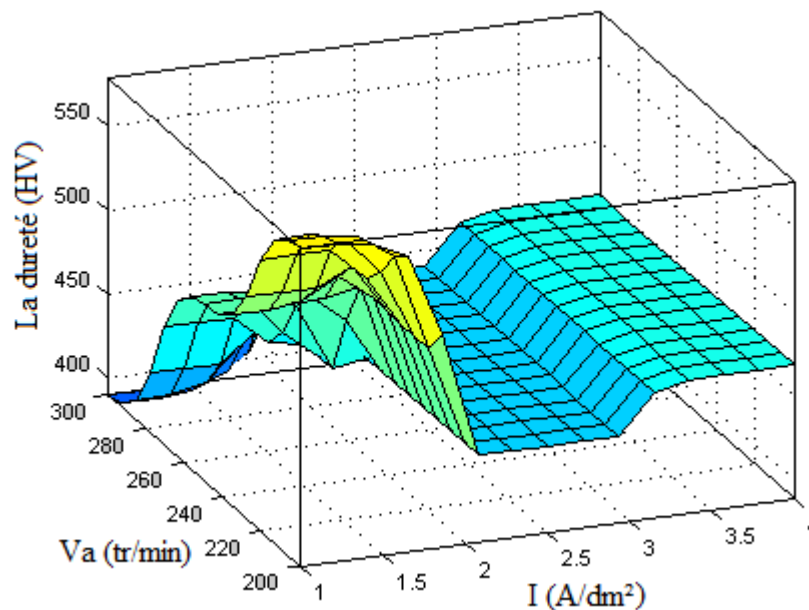


Figure IV.26 Fonction $H = f (Va, I)$ avec $Co = 20g/l$, $T = 45^{\circ}C$, $PH = 3.5$

La figure (IV.26) représente la variation de la dureté en fonction de la densité de courant et la vitesse d'agitation, où l'on note que la valeur de la dureté est maximale est obtenus lorsque le courant égal à peu près $1.5 A / dm^2$

Il est clair que la diminution de la vitesse d'agitation et de la densité du courant en même temps indique une augmentation remarquable de la dureté du dépôt.

D'après les figures ci-dessus, nous notons que la densité de courant et la température du bain constituent les deux paramètres principaux, qui ont la plus grande influence sur la dureté. La dureté maximale est atteinte pour des températures d'ordre de $45^{\circ}C$ et des densités de courant d'ordre de $4 A / dm^2$

b. Composite Ni-P-Al₂O₃

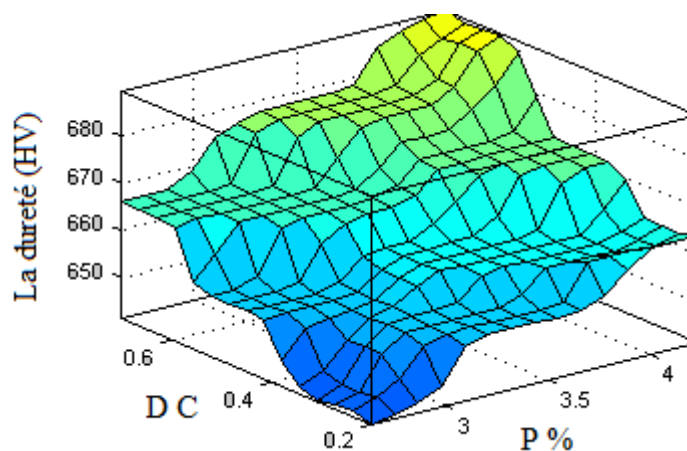


Figure IV.27 Fonction $H = f (D .C, P\%)$ avec $I=10A / dm^2$

La figure IV.27 représente la variation de la dureté en fonction de la teneur en P et le cycle de service D.C , Où l'on note que la valeur de la dureté est maximale est obtenues pour des valeurs maximale de la teneur en P et du cycle de service.

IV.4.4 Discussion des résultats

L'influence des paramètres électrodeposition sur la dureté des revêtements est illustrée dans les graphes de la figure IV.28 :

a. Composite Ni- Al_2O_3

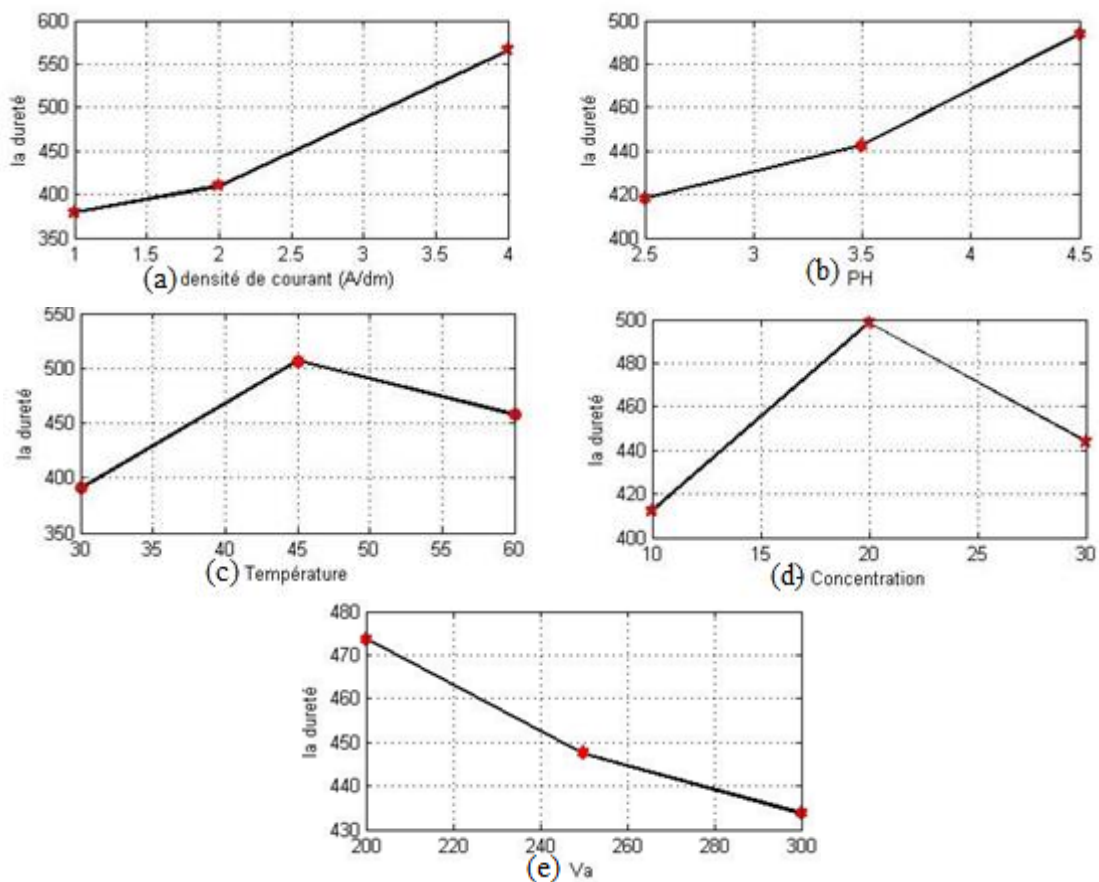


Figure IV.28 Effet des paramètres électrodeposition (a), (b), (c), (d), (e) sur la dureté des revêtements sur Ni-P- Al_2O_3

Selon les résultats obtenus à partir de Figure (IV.28), la densité de courant joue un rôle impératif sur les propriétés des dépôts(a).

La variation de la dureté du composite en fonction du pH de bain est montrée dans la figure (b), la variation de la dureté pour des valeurs de pH supérieure à 3.5 devient plus élevée par rapport à la variation pour des valeurs de pH inférieure à 3.5 car le bain deviendra très visqueux à des niveaux de pH plus élevés ce qui rend la Co-déposition des particules Al_2O_3 plus facile. Cette figure illustre bien que la dureté du revêtement augmente considérablement

avec des niveaux de pH plus élevés. De meilleures valeurs de la dureté ont été enregistrées pour des pH entre 3,5 et 4,5.

Dans (c), les essais sont effectués à des températures entre 30°C et 60°C , On observe que le taux de dépôt d'alumine dans la matrice est favorable à des températures ambiantes (entre 30 et 45°C). On a constaté aussi que le dépôt d'alumine était diminué dans la matrice au niveau de température de 45°C à 60°C .

L'effet de la concentration de particules de Al_2O_3 sur la dureté est représenté sur (d). Du fait que le taux de dépôt d'alumine augmente avec la diminution de la teneur en Al_2O_3 dans le bain, donc il en résulte que la porosité augmente. C'est pour cette raison, la dureté de la matrice a été réduite à des concentrations élevées de Al_2O_3 . Une meilleure dureté a été obtenue à une concentration de 20 g / l .

Le taux de Co-dépôt des particules d' Al_2O_3 a augmenté dans les niveaux de vitesse d'agitation plus bas (e), ce qui conduit à une diminution de la dureté. Nous avons constaté que les particules étaient déposées à des vitesses d'agitation inférieures 200 tr / min . L'augmentation de la vitesse d'agitation jusqu'à 200 tr / min était suffisante rendre la Co-dépôt des particules d' Al_2O_3 plus efficace.

b. Composite Ni-P- Al_2O_3

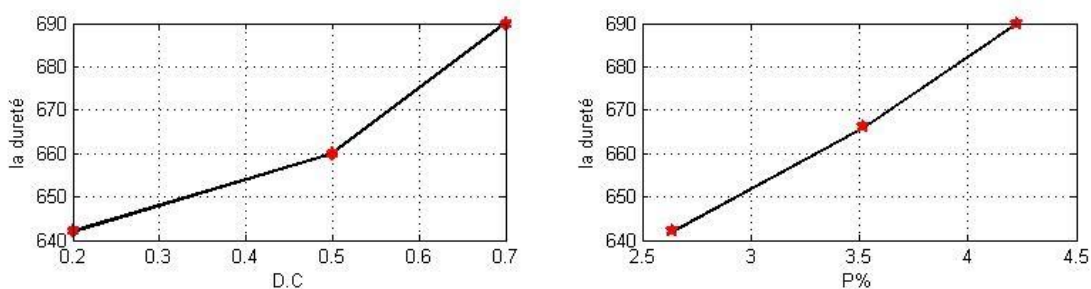


Figure IV.29 Effet des paramètres électrodéposition ($P\%$ et D, C) sur la dureté des revêtements sur le composite $\text{Ni} - \text{P} - \text{Al}_2\text{O}_3$

L'effet du cycle de service sur la dureté des revêtements $\text{Ni} - \text{P} - \text{Al}_2\text{O}_3$ sous une densité de courant de 10 A / dm^2 , avec une concentration d' Al_2O_3 de 10 g / l dans le bain est illustré dans la figure (IV.29). On observe que la dureté des dépôts augmente avec l'augmentation du cycle de service, une dureté maximale de $690,3\text{ HV}$ a été observée lorsque le cycle de service était de $0,7$.

De même la dureté des revêtements augmente avec l'augmentation de la teneur en phosphore dans le dépôt ce qui traduit l'effet positif de l'ajout du phosphore.

IV.4.5 Validation des résultats

Les Figure (IV.30) et (VI.3) Ireprésentent une superposition des deux courbes de variation de la dureté du revêtement : expérimentale et prédite respectivement.

a. Composite Ni-Al₂O₃

Les relations entre les valeurs de simulation et les valeurs expérimentales sont représentés sur la figure (IV.30).

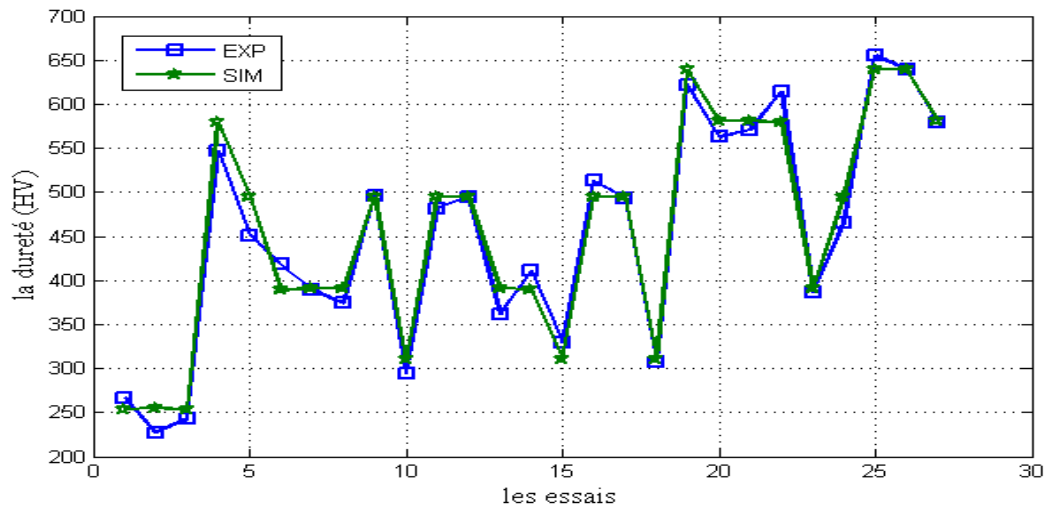
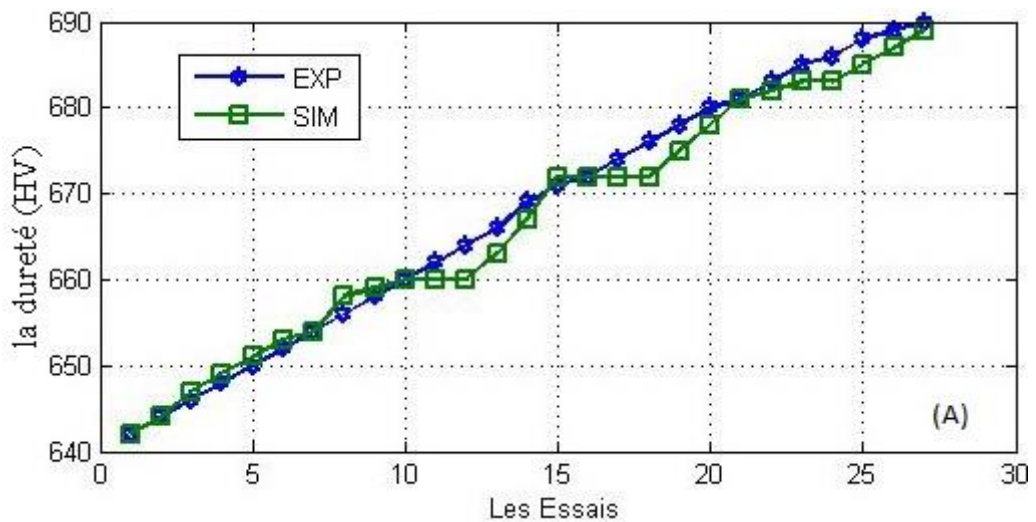


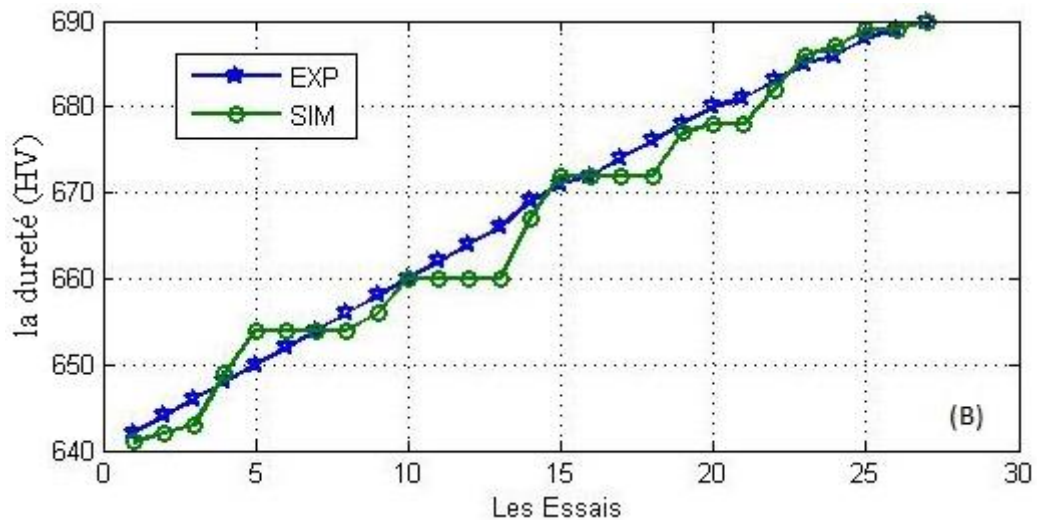
Figure IV.30 les courbes des résultats expérimentaux et de simulation Ni – Al₂O₃

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

b. Composite Ni-P-Al₂O₃



(A)



(B)

Figure IV.31 Les courbes des résultats expérimentaux et de simulation Ni – P – Al₂O₃ (A) Triangulaire et (B) trapézoïdale

Le résultat obtenu à partir la figure (IV.31) confirme que la modélisation par la logique floue peut être utilisée efficacement pour prédire la dureté des revêtements.

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 conditions expérimentales, les résultats de la dureté et les valeurs prédites du modèle flou sont indiquées dans les tableaux IV. 7 et IV. 8.

Le pourcentage moyen d'erreur pour la prédiction du modèle flou a été de 3.88% pour le composite Ni-Al₂O₃ et 0.27% pour le composite Ni-P-Al₂O₃. Le niveau d'erreur indique que les résultats de la température de coupe prédits par le modèle de logique floue étaient très proches des valeurs expérimentales réelles.

Les tableaux IV. 7 et IV. 8 montrent également que la précision du modèle flou était de 96.12% pour le composite Ni-Al₂O₃ et 99.73% pour le composite Ni-P-Al₂O₃. Le pourcentage de précision montre que le modèle proposé peut être utilisé avec succès pour prédire la dureté des revêtements composites Ni-Al₂O₃ et Ni-P-Al₂O₃.

Le niveau d'erreur faible indique que les résultats prédits par le modèle de la logique floue étaient très proches des résultats expérimentales réelle

IV.4.6 Comparaisant entre Ni-Al₂O₃ et Ni-P-Al₂O₃

Le phosphore joue un rôle impératif sur la dureté, de sorte que la dureté du revêtement augmente avec l'augmentation de la teneur en phosphore.

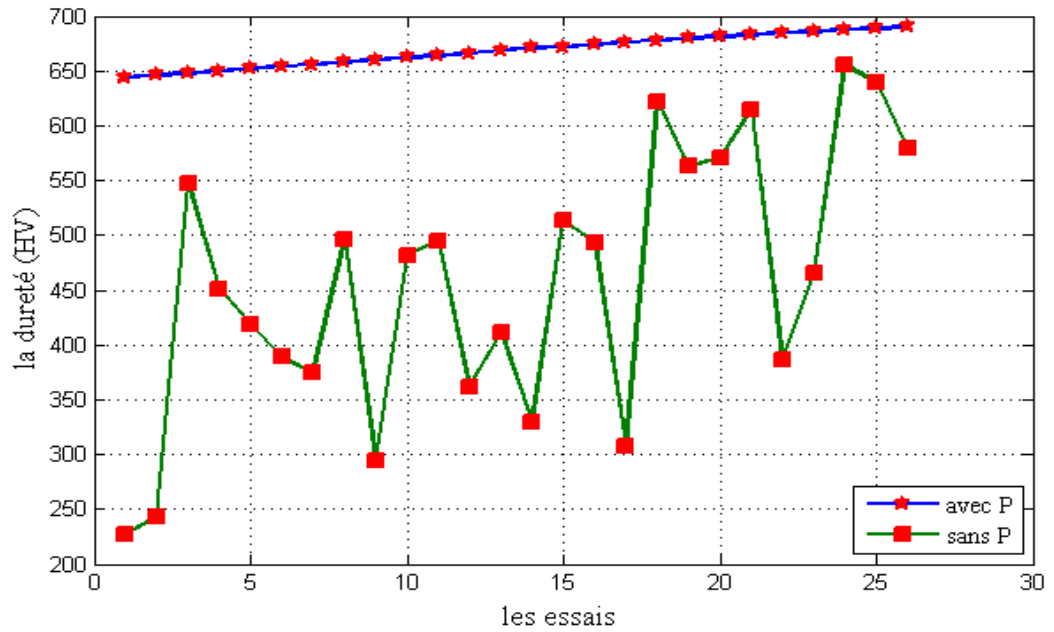


Figure IV. 32 Comparaison de la dureté de $Ni - Al_2O_3$ et $Ni - P - Al_2O_3$.

IV.5 Conclusion

L'étude que nous avons réalisée dans ce chapitre nous a conduit de conclure que :

La densité du courant et la teneur en phosphore constituent les deux paramètres principaux qui conditionnent les qualités du dépôt sur la dureté.

Nous avons réussi à élaborer un modèle flou pour prédire l'influence des paramètres (T, PH, Co, Va...) d'élaboration sur les revêtements $Ni - Al_2O_3$ et $Ni - P - Al_2O_3$

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de notre travail a été de prédire l'influence de paramètres d'élaboration (Température, Densité, pH, vitesse d'agitation, concentration d' Al_2O_3) sur la dureté revêtements composites : Ni- Al_2O_3 , Ni-P- Al_2O_3 . Ainsi que la comparaison entre les deux types de revêtements.

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

- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) composé stable, dure et adhérent, est un oxyde protecteur qui, ajouté aux bains d'électrodéposition de nickel chloruré, a tendance à diminuer la corrosion des dépôts résultants.
- La densité de courant et la température du bain et le teneur de phosphore constituent les paramètres principaux qui conditionnent les qualités du dépôt. Ils sont indissociables l'un de l'autre car ils sont des effets opposés.
- L'effet des autres paramètres (pH, vitesse d'agitation, concentration d' Al_2O_3) n'est pas négligeable.
- Le phosphore joue un rôle impératif sur la dureté, de sorte que la dureté du revêtement augmente avec l'augmentation de la teneur en phosphore.
- Le modèle flou utilisé, pour la prédiction des paramètres des composites Ni- Al_2O_3 Ni-P- Al_2O_3 , ont montré une bonne concordance entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux.
- Les résultats obtenus en utilisant notre modèle flou ont été prouvés par une étude comparative avec des résultats expérimentaux.
- Les valeurs prédites sont en accord avec la dureté réelle avec un pourcentage d'erreur moyen de 0.27% et sont bien associées avec les valeurs expérimentales.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]. **H. Bensaada**, Corrosion et Protection des Métaux, cours 1^{ère} Année Master : Génie des Matériaux, Université de Jijel, 2016
- [2]. **K. Taliouine**, Effets des Paramètres d'Electrodéposition sur les Dépôts de Chrome, Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [3]. La corrosion, lifelong learning program, 2017
- [4]. **I. Anoune**, Résistance à la Corrosion des Revêtements Composites Nickel-Alumine sur Différents Substrats, Mémoire Magistère, Université Hadj Lakhder Batna, 2014.
- [5]. **A. Habchi**, Etude de l'Effet de la Température Sur la Corrosion de l'Acier XC52 en Présence du Sulfarlemet leur Sel Correspondent dans un Milieu H₂SO₄ 20%, Mémoire Master, Université KasdiMerbah Ouargla, 2013.
- [6]. **W. Harzellah**, Préparation et Caractérisation de Dépôts Composites Electrodeposés en Présence d'Inhibiteurs Organiques, Mémoire Magistère, Université Mohamed Khider Biskra, 2006.
- [7]. **A. Mekkaoui**, Élaboration et Caractérisation des Revêtements de Nickel Déposés Par Voie Electrochimique, Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [8]. **C. Christophe**, Intégration de Micro-capteurs Electrochimiques en Technologies Silicium et Polymères pour l'étude du stress oxydant, Thèse Doctorat, Université Toulouse, 2010.
- [9]. **M. Bouaoude**, Tenue à la Corrosion en Milieu Acide d'un Dépôt de ZnSn sur un Acier Inoxydable, Mémoire Magistère, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2014.
- [10]. **M. Missaoui**, Effet du PH sur la Résistance à la Corrosion des Couches de Nickel Electrodeposés, Mémoire Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [11]. **A. Bourbia**, Etude du Durcissement Mécanique des Matériaux Métalliques: Al-Al₂O₃, Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2010.
- [12]. http://chemistry-reference.com/q_elements.asp?Symbol=P&language=fr
- [13]. **T. Bourkar**, Electrodeposition of Nickel Composite Coatings, Mémoire Master, Université Mumbai, 2010.
- [14]. **F. Hafaidia**, Electrodeposition d'Alliages Zn-Ni en Milieu Alcalin et leur Propriété Electro-Catalique, Mémoire Magistère, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2010.
- [15]. **N. Tkouti**, Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau par la Logique Floue, Mémoire Magistère, Université de Biskra, 2004.

-
- [16]. **D. Mokeddem**, Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques, Thèse Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2010.
- [17]. **A. Aouiche**, Contribution à l'Etude des Structures Microruban Cylindriques par la Méthode Neuro-Spectrale, Thèse Doctorat, Université de Batna 2, 2016.
- [18]. **T. C. MINH**, Commande Numérique de Machines Asynchrones par Logique Floue, Thèse Doctorat, Université Laval, 1997.
- [19]. **L. Baghli**, Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques, Thèse Doctorat, Hyper Articles en Ligne, 1999.
- [20]. **S, Sivasankaran et al**, Investigation on Effect of Process Parameters of Electrodeposited Ni-Al₂O₃ Composite Coating Using Orthogonal Array Approach and Mathematical Modeling ,Archives of civil and mechanical engineering 16 p 168-177 , 2016
- [21]. **S. Hung-hua, et al**, Effect of Plating Parameters on the Ni-P-Al₂O₃ Composite Coatings Prepared by Pulse and Direct Current Plating , Surface & Coatings Technology, 235 p 529-535, 2013

Résumé

Cette étude présente une méthode pour l'identification des paramètres en utilisant le système d'inférence flou. Le système d'inférence flou a été utilisé pour déterminer la valeur de la dureté des revêtements comme sortie du système en se basant sur les valeurs des paramètres d'élaboration (Température, Densité, pH, vitesse d'agitation, concentration d' Al_2O_3).

L'objectif était de déterminer l'influence des paramètres d'élaboration sur la dureté des composites : Ni- Al_2O_3 et Ni-P- Al_2O_3 . Le modèle flou élaboré pour la détermination de la dureté formé (règles floues) et testé en utilisant des données expérimentales. L'écart moyen des données de test était de 3,88 % pour le composite Ni- Al_2O_3 et 0,27 % pour le composite Ni-P- Al_2O_3 , ce qui correspond à une précision de 96,12 % et de 99,73 % respectivement. Les résultats des tests ont montré que le modèle flou proposé peut être utilisé avec succès pour la sélection des paramètres d'élaboration des composites Ni- Al_2O_3 et Ni-P- Al_2O_3 .

Sur la base d'une comparaison entre les deux types de revêtement nous avons trouvé que le phosphore joue un rôle impératif sur la dureté des revêtements Nickel-Alumine.

المخلص

هذه الدراسة توضح طريقة لتحديد الخصائص باستخدام النظام الضبابي. نستخدم النظام الضبابي من أجل حساب قيمة الصلادة للطلاء باعتبارها مخرج للنظام استناداً لأدوات الإدخال التجريبية (التيار الكهربائي، الحرارة، PH وسرعة التحريض) الهدف من هذه التجربة هو تحديد تأثير خصائص الإدخال التجريبية على الصلادة للمركبين : Ni- Al_2O_3 و Ni-P- Al_2O_3 . النموذج الضبابي أنجز لتحديد الصلادة (القواعد الضبابية) واختبر باستعمال معطيات تجريبية. متوسط الانحراف في الاختبار هو 3.88% من أجل المركب Ni- Al_2O_3 و 0.27% من أجل Ni-P- Al_2O_3 الذي يوافق دقة 96.12% و 99.30% على التوالي. النتائج تبين أن النموذج الضبابي المقترح يمكن أن يستعمل بنجاح لتحديد الخصائص التجريبية بالنسبة للمركب Ni- Al_2O_3 والمركب Ni-P- Al_2O_3 .

بالمقارنة بين صلادتي الطلائين استنتجنا أن الفوسفور يلعب دوراً هاماً في تغيير صلادة الطلاء للمركبات التي تحوي Ni-

Al_2O_3

Abstract

This study presents a method for the identification of parameters using the fuzzy inference system. The fuzzy inference system was used to determine the hardness value of the coatings as the output of the system based on the parameters of the processing parameters (Temperature, Density, pH, agitation rate, Concentration).

The objective was to determine the influence of elaboration parameters on the hardness of composites: Ni- Al_2O_3 and Ni-P- Al_2O_3 . The fuzzy model developed for the determination of the formed hardness (fuzzy rules) and test educing experimental data. The average deviation of the test data was 3.88% for the Ni- Al_2O_3 composite and 0.27% for the Ni-P- Al_2O_3 composite, which corresponds to an accuracy of 96.12% and 99.73% respectively. The results of the tests have shown that the proposed fuzzy model can be used successfully for the selection of parameters for the development of Ni- Al_2O_3 and Ni-P- Al_2O_3 composites.

On the basis of a comparison between the two types of coatings we found that phosphorus plays an imperative role on the hardness of Nickel-Alumina coatings.