

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et
Productique

Présenté par : Bedejera Soumia

Thème

**Prédiction par la logique floue de la résistance à la
corrosion des revêtements composites Ni-SiC**

Soutenu Le :2019

Devant le jury :

ABDELKRIM Mourad	MCA	Université Kasdi Merbah Ouargla	Président
REZGUI Imane	MCB	Université Kasdi Merbah Ouargla	Encadreur
KHEIREDDINE Abdelaziz	MCB	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examineur

Année Universitaires : 2018/2019

Remerciement

D'abord nous remercions DIEU de nous avoir venu en aide pour que Nous puissions aboutir à la réussite.

Je remercie mon encadreur, Mme REZGUI Imane, pour avoir accepté de m'encadrer et pour m'avoir guide tout au long de ce travail avec beaucoup de patience, ainsi que pour ses conseils judicieux et ses encouragements.

Je tiens remercie à Mr. ABDELKRIM Mourad d'avoir accepté de président le jury de la soutenance.

Je témoigne également ma reconnaissance à Mr. KHEIREDDINE Abdelaziz d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements a tous les enseignants du Département de Génie Mécanique.

Mes remerciement vont aussi à tous ceux qui ont contribué de prés ou de lion à l'accomplissement de ce travail.

A TOUT, Pour tout, Merci.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mon très cher Père

A ma très chère Mère

A mes très chères Sœurs.

A toute ma famille.

A ma chère amie Wafa

A tous mes ami(e) s sans exception.

*A Tous qui donnent une contribution de réalisation
de ce mémoire.*

Je leur dédie ce travail.

Bedejera Soumia

Table des Matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I Recherche bibliographique

I.1	Introduction.....	4
I.2	La corrosion.....	4
I.2.1	Définition de la corrosion.....	4
I.2.2	Classification de la corrosion.....	5
I.2.3	Types de corrosion.....	6
I.2.4	Réactions électrochimiques.....	9
I.2.5	Facteurs de corrosion.....	9
I.2.6	Mesure de la corrosion.....	10
I.3	Moyens de protection contre la corrosion.....	12
I.3.1	Protection par revêtements.....	13
I.3.2	Protection par inhibiteurs.....	15
I.3.3	Protection électrochimique.....	17
I.3.4	Les revêtements composite.....	18
I.4	Objectif des revêtements composites.....	18
I.5	L'électrodéposition.....	19
I.5.1	Définition.....	19
I.6	Mécanismes réactionnels de formation des revêtements composites.....	20
I.6.1	Mécanismes d'une réaction électrochimique.....	20
I.7	Facteurs et paramètres des revêtements composites.....	21
I.7.1	Température.....	21
I.7.2	Agitation de le électrolyse.....	21
I.7.3	pH du bain.....	21
I.7.4	La densité de courant.....	21
I.7.5	Conductibilité de l'électrolyte.....	22
I.7.6	Nature de l'électrolyte.....	22
I.7.7	Concentration de l'électrolyte.....	22
I.7.8	Métal de base.....	22
I.8	Les revêtements Ni-SiC.....	23
I.9	Propriétés des revêtements Ni-SiC.....	23
I.9.1	Dureté.....	24
I.9.2	Résistance à la corrosion.....	24
I.9.3	Résistance à l'usure.....	26
I.9.4	Applications des revêtements composites Ni-SiC.....	27
I.10	Conclusion.....	27

Chapitre II La logique floue

II.1	Introduction.....	29
II.2	La logique floue.....	29

II.2.1	Le principe et définition.....	29
II.2.2	Utilisation de la logique floue.....	30
II.2.3	Logique floue et la logique classique.....	30
II.2.4	Les variables linguistiques.....	31
II.2.5	Les sous ensembles flous.....	32
II.2.6	Fonction d'appartenance.....	33
II.2.7	Les opérateurs en logique floue.....	33
II.2.8	Structure d'un système de commande floue.....	35
II.3	Conclusion.....	38

Chapitre III

Résultats et Discussion

III.1	Introduction.....	40
III.2	Données expérimentales.....	40
III.2.1	Système flou.....	41
III.2.2	Modélisation floue.....	42
III.3	Les règles floues.....	53
III.4	Défuzzification.....	54
III.5	Résultats et discussion.....	55
III.5.1	Etude de la précision et de l'erreur du système flou.....	56
III.5.2	Comparaison entre les résultats obtenus avec les différents types de fonctions d'appartenance.....	56
III.5.3	Représentation schématique des résultants.....	60
III.5.4	Validation des résultats.....	62
III.6	Conclusion.....	64
	Conclusion Générale.....	66
	Bibliographie.....	67

Listes des Figures

Chapitre I

Recherche bibliographique

Figure. I.1	Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement.....	5
Figure. I.2	Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire.....	6
Figure. I.3	Corrosion uniforme.....	7
Figure. I.4	Corrosion par piqûre de l'aluminium.....	7
Figure I.5	Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé.....	8
Figure I.6	Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion.....	8
Figure. I.7	La corrosion sous contrainte.....	8
Figure. I.8	Corrosion du fer dans l'acide sulfurique contenant de l'oxygène dissous.....	9
Figure. I.9	Revêtement cathodique (cas du nickel sur fer).....	13
Figure. I.10	Revêtement anodique (cas du zinc sur fer).....	14
Figure. I.11	Classement des inhibiteurs de corrosion.....	15
Figure. I.12	Diagramme d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte.....	16
Figure. I.13	Schéma de montage d'une cellule d'électrolyse.....	19
Figure. I.14	Représentation schématique des différentes étapes d'une réaction électrochimique.....	20
Figure. I.15	Courbes de polarisation de l'acier st14, revêtement avec nickel pur et revêtements composites.....	25
Figure. I.16	Courbes de polarisation cathodique des revêtements de nickel pur et de Ni-SiC.....	26
Figure. I.17	Taux d'usure du revêtement de nanocomposite Ni-SiC en fonction du pourcentage en poids de nanoparticules de SiC.....	27

Chapitre II

La logique floue

Figure. II.1	Exemple d'une variable linguistique "Température" avec trois termes linguistiques.....	30
Figure. II.2	Classification des températures d'une pièce en deux ensembles.....	31
Figure. II.3	Exemples des fonctions d'appartenance.....	33
Figure. II.4	L'opérateur NON (complément).....	34
Figure. II.5	L'opérateur ET (intersection).....	34
Figure. II.6	L'opérateur OU (union).....	35
Figure. II.7	Structure interne d'un Régulateur de la logique floue.....	36

Chapitre III

Résultats et Discussion

Figure. III.1	Le Système floue utilisé pour prédire la dureté et la codé-position.....	42
Figure. III.2	Système floue pour prédire La masse de SiC.....	42
Figure. III.3	Variables linguistiques pour la concentration de SiC.....	43
Figure. III.4	Variables linguistiques pour la densité du courant.....	43
Figure. III.5	Les valeurs de codé postions en ensembles des essais....	44
Figure. III.6	Les valeurs de la dureté en ensembles des essais.....	44
Figure. III.7	Variables linguistiques pour la codé postion.....	45
Figure. III.8	Variables linguistiques pour la dureté.....	45
Figure. III.9	Variables linguistiques pour la concentration de SiC....	46
Figure. III.10	Variables Linguistiques pour la vitesse d'agitation.....	46
Figure. III.11	Les valeurs de la masse en ensembles des essais.....	47
Figure. III.12	Variables linguistiques pour la masse de SiC.....	47
Figure. III.13	Fonctions d'appartenance (type triangulaire)pour la concentration de SiC.....	48
Figure. III.14	Fonctions d'appartenance (type triangulaire)pour la densité du courant.....	48
Figure. III.15	Fonctions d'appartenance (type triangulaire)pour la codé postions.....	49
Figure. III.16	Fonctions d'appartenance (type triangulaire)pour la dureté.....	49
Figure. III.17	Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale)pour la concentration de SiC.....	50
Figure. III.18	Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale)pour la densité de courant.....	50
Figure. III.19	Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale)pour la codé postion de SiC.....	50
Figure. III.20	Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale)pour la dureté.....	51
Figure. III.21	Fonctions d'appartenance (type pimf)pour la concentration de SiC.....	51
Figure. III.22	Fonctions d'appartenance (type pimf)pour la densité du courant.....	52
Figure. III.23	Fonctions d'appartenance (type pimf)pour la codé postion de SiC.....	52
Figure. III.24	Fonctions d'appartenance (type pimf)pour la dureté.....	52
Figure. III.25	Défuzzification de la sortie en valeurs réels.....	55
Figure. III.26	Défuzzification de la sortie en valeurs réels.....	55
Figure. III.27	Variation de la dureté (trapézoïdale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essais.....	57
Figure. III.28	Variation de le codé postions (trapézoïdale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essais.....	57
Figure. III.29	Variation de la masse de SiC (trapézoïdale, triangulaire et pimf)en fonction du nombre essais.....	58

Figure. III.30	Variation du codé-position de SiC en fonction de densité du courant et de la concentration en SiC.....	61
Figure. III.31	Variation de la dureté en fonction de densité du courant et de la concentration en SiC.....	61
Figure. III.32	Variation de la masse en SiC en fonction de la vitesse d'agitation et de la concentration en SiC.....	62
Figure. III.33	Variation de la masse en SiC en fonction de la vitesse d'agitation et de la concentration en SiC.....	63
Figure. III.34	les courbes des résultats expérimentaux et de simulation de la dureté.....	63
Figure. III.35	Les courbes des résultats expérimentaux et de simulation de masse de SiC.....	64

Liste des Tableaux

Chapitre III

Résultats et discussions

Tableau. III.1	Données expérimentales composite Ni-SiC (La codé postions et la dureté).....	40
Tableau. III.2	Données expérimentales composite Ni-SiC (La masse de SiC).....	41
Tableau. III.3	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou.....	43
Tableau. III.4	Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou composite Ni-SiC	46
Tableau. III.5	Les règles floues.....	53
Tableau. III.6	Les règles floues.....	54
Tableau. III.7	Résultats du système flou.....	59
Tableau. III.8	Résultats du système flou.....	60

Introduction Générale

Introduction Générale

La corrosion est un phénomène connue depuis l'Antiquité, où des études scientifiques confirmées de chercheurs : Delarive, à l'université de Grenoble, Faraday en 1830, Cette corrosion est l'attaque destructive d'un matériau, Elle résulte d'interactions chimique et /ou physique entre le matériau et son environnement et affecte tous les métaux, Il existe plusieurs types d'corrosion (Corrosion uniforme ; par piqûres ; galvanique ; inter granulaire.....).

Le revêtement composite est technique le plus répandu contre la corrosion grâce aux propriétés particulières qui leur sont conférées par l'incorporation de particules solides, est le traitement de surface par revêtement de Ni-SiC. C'est un traitement de conversion électrochimique qui conduit à la formation d'une couche métallique sur le substrat. Cette couche, peut être utilisée afin d'assurer la protection contre la corrosion, d'augmenter la dureté ou d'améliorer les propriétés physiques particulières ou, en fin à usage décoratif.

Dans cette étude, nous utilisons la technique de la logique floue. Cette technique permet de prédire les résultats expérimentaux sans recourir à de nombreux tests expérimentaux.

L'objectif de ce travail est l'étude de la résistance à la corrosion de dépôts composites Ni-SiC sur des substrats en acier, obtenus à partir des bains d'électrodéposition.

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

Nous aborderons, dans un premier chapitre, une étude bibliographique pour définir le phénomène de corrosion, ensuite les différentes méthodes de protection contre ce phénomène. En plus de l'étude le technique de revêtement composite (Ni-SiC).

Le deuxième chapitre, nous parlons de définitions et notions de bases de la théorie de la logique floue et de ses propriétés, qui sont présentées sous forme des généralités.

Dans le troisième chapitre, la problématique est alors ciblée, en se basant sur les connaissances des paramètres d'électrodéposition pour les revêtements composites Ni-SiC.

Chapitre I

Recherche Bibliographique

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous exposerons quelques généralités sur le phénomène de corrosion, et puis quelques notions des techniques de revêtements composites et électrodéposition lors de ce travail et enfin nous avons présenté l'électrodéposition de revêtements composite Ni-SiC.

I.2 La corrosion

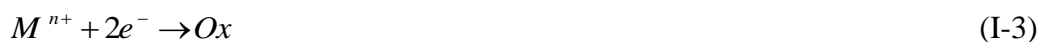
I.2.1 Définition de la corrosion

En 1946, l'American Electrochemical Society avait défini la corrosion la « destruction d'un métal par réaction chimique ou électrochimique avec son environnement ». La destruction des métaux par la corrosion se produit par : (a) l'attaque chimique directe à des températures élevées dans un environnement sec, et (b) par des procédés électrochimiques à des températures plus basses dans un environnement humide mouillé d'eau où. La corrosion se produit parce que les métaux ont tendance de revenir à des formes plus stables dans lesquelles ils ont été trouvés dans la nature initialement, à savoir, des oxydes, des sulfates, des sulfures et des carbonates [1].

Oxydation : C'est une perte d'électron [2] :



Réduction : C'est un gain d'électron [2] :



a. Oxydant (Ox)

Réactif capable de provoquer une oxydation. C'est donc une espèce (atome, ion ou molécule) capable de fixer des e^{-} [2].

En corrosion humide, les deux principaux oxydants rencontrés en pratique sont [2] :

- Les protons solvates.

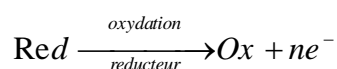
➤ L'oxygène dissous.

b. Réducteurs (Red)

Réactif capable de provoquer une réduction. C'est donc une espèce capable de céder des e^- [2].

c. Réaction d'oxydoréduction (Redox)

Sur la base des définitions précédentes, une réaction entre un agent oxydant et un agent réducteur consiste en un échange d' e^- cédés par le réducteur à l'oxydant[2].



L'oxydant et le réducteur constituent le couple « Ox/Red » :

- ✓ Ox: Oxydant, c'est la forme oxydée du couple Ox/Red.
- ✓ Red: Réducteur, c'est la forme réduite du couple Ox/Red.

I.2.2 Classification de la corrosion

Selon la nature du milieu environnant avec lequel le matériau rentre en interaction, la corrosion peut être classée en trois grandes classes [2] :

a. La corrosion chimique

C'est la réaction entre le métal et une phase gazeuse ou liquide. Si cette corrosion se produit à haute température elle est alors appelée « corrosion sèche » ou corrosion à haute température [2].

Au cours de la corrosion chimique, l'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se fait en une seule action, c'est-à-dire les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques [2].

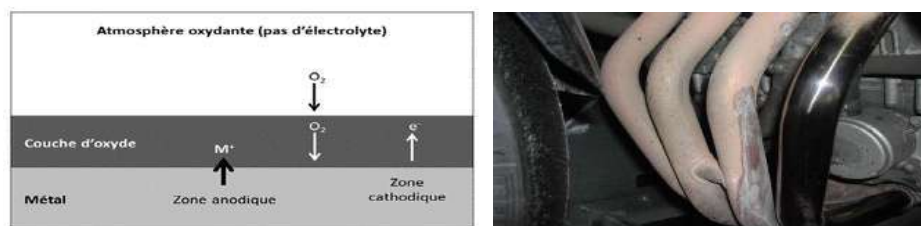


Figure I.1 Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement [2].

b. La corrosion bactérienne

Ce type de corrosion, appelé aussi bio-corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement (ex : production de H_2SO_4 par certains types de bactéries) [2].

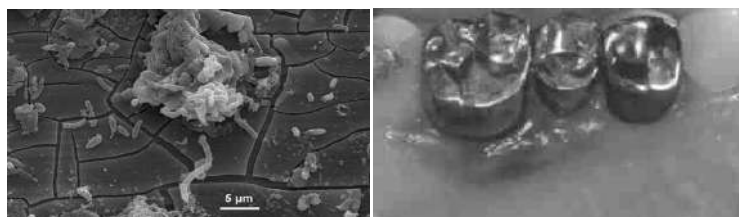


Figure I.2 Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire [2].

c. La corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique, appelée encore corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. Elle réside essentiellement dans l'oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxydes [2].

La corrosion électrochimique fait appelle à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant). Cette corrosion nécessite la présence d'un agent réducteur (H_2O , O_2 , H_2 , etc.), sans celui-ci la corrosion du métal ne peut se produire. La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydoréduction, dont [2] :

- la réaction d'oxydation d'un métal est appelée réaction «anodique».
- la réaction de réduction d'un agent oxydant est appelée réaction «cathodique» [2].

Dans la corrosion électrochimique, la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociables [2].

I.2.3 Types de corrosion

La corrosion peut affecter le métal par une multitude de moyens qui dépendent de sa nature et des conditions environnementales. Il existe une large classification des

diverses formes de corrosion dans lesquelles quelques types principaux ont été identifié [3].

a. La corrosion uniforme

C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. On trouve cette attaque notamment sur les métaux exposés aux milieux acides [4].

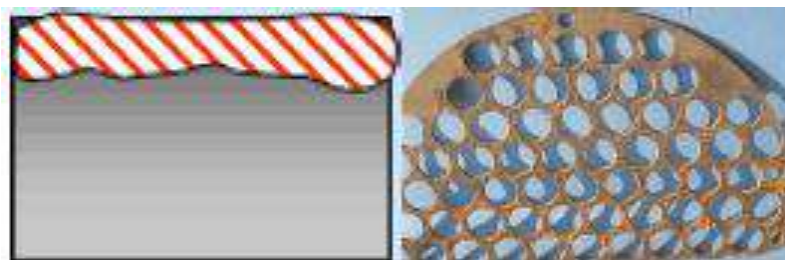


Figure I.3 Corrosion uniforme [5].

b. La corrosion par piqûre

Elle est produite par certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre de diamètre [4].

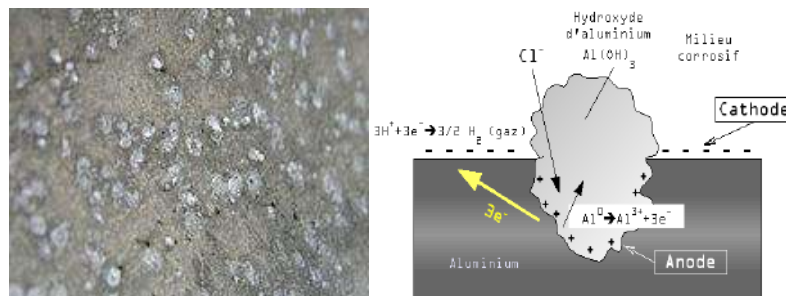


Figure I.4 Corrosion par piqûre de l'aluminium [2].

c. La corrosion galvanique

Appelée aussi corrosion bimétallique, est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux. La dégradation du métal le moins résistant s'intensifie [4].

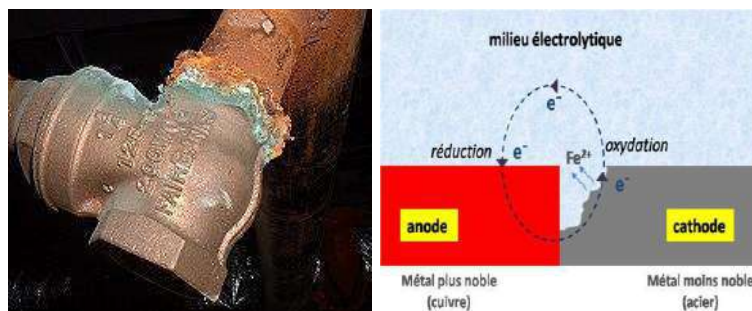


Figure I.5 Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé [2].

d. La 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 [1].

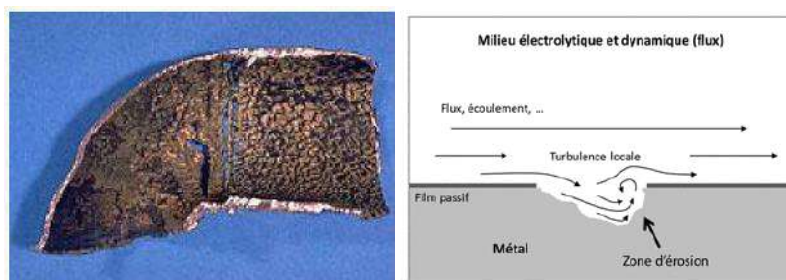


Figure I.6 Aspect et mécanisme de la corrosion-érosion. [2].

e. La corrosion sous contrainte

C'est une fissuration du métal, qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique [4].

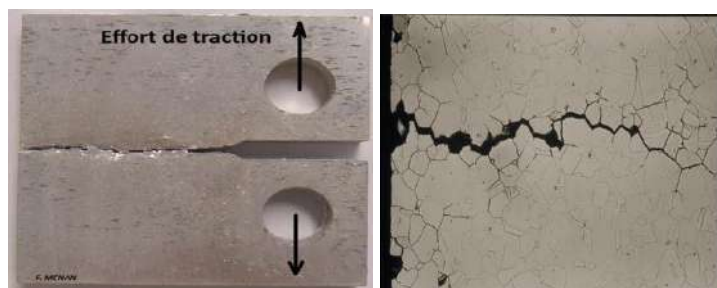


Figure I.7 La corrosion sous contrainte [2].

I.2.4 Réactions électrochimiques

Lorsqu' on plonge un métal (le fer par exemple) dans un acide contenant de l'oxygène dissous, il se produit une réaction entre le fer et les ions H^+ de la solution acide. La réaction globale décrivant un tel phénomène s'écrit alors [4]:



La réaction (I-5) peut être décomposée en deux demi-réactions dont l'une est une réaction anodique (oxydation du fer (I-6)) et l'autre une réaction cathodique (réduction de deux protons H^+ , par deux électrons laissés dans le métal par l'oxydation métallique, pour former une molécule d'hydrogène) (I-7) [4].



La figure (I.8) illustre le processus de dissolution du fer en milieu acide sulfurique, en présence d'oxygène dissous [4].

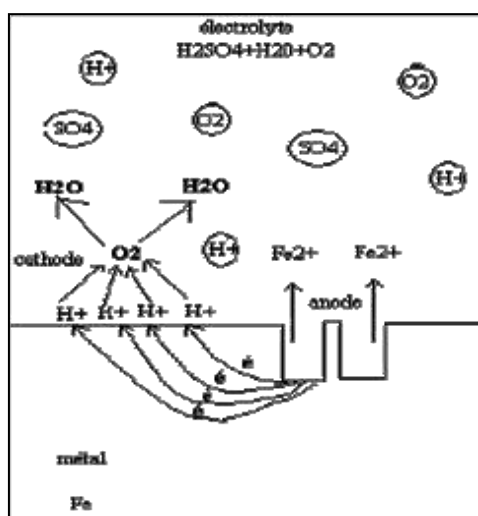


Figure I.8 Corrosion du fer dans l'acide sulfurique contenant de l'oxygène dissous [4].

I.2.5 Facteurs de corrosion

Le phénomène de corrosion dépend d'un nombre de facteurs généralement en relation les uns avec les autres. Ces facteurs peuvent être d'origine interne ou externe, à savoir [2] :

- Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque: T, P, pH, teneur en O_2 , teneur en impuretés, etc.
- Facteurs métallurgiques : composition chimique du matériau (alliage métallique), traitements thermiques, etc.
- Facteurs définissant les conditions d'emploi (du service): état de surface, forme des pièces, sollicitation, etc.
- Facteurs dépendant du temps: vieillissement, mode de diffusion d'oxygène ou d'autres gaz (CO_2), modification des revêtements protecteur (peintures) [2].

I.2.6 Mesure de la corrosion

Pour toutes les réactions électrochimiques, la cinétique d'une réaction de corrosion peut être contrôlée, voire limitée par la vitesse d'une des étapes réactionnelles [6].

Corrosion contrôlée par le transfert de charge (électrons) à l'interface métal/solution. C'est le cas par exemple l'électrode du fer se corrodant dans un milieu acide.

Corrosion limitée par le transfert de matière (l'oxydant). C'est le cas de l'acier se corrodant dans un milieu aqueux neutre et aéré [6].

Pour déterminer la vitesse de corrosion en milieu liquide, Il existe deux types de méthode expérimentale [6] :

a. Méthode par immersion

Ce type d'essai regroupe différentes méthodes utilisées pour mesurer la masse corrodée, l'analyse de la solution ; mesure de volume d'oxygène consommé ou le volume d'hydrogène produit [6].

Méthode pondérale (perte de poids) :

L'échantillon placé sur un support non métallique, pesé au préalable (p_1), puis plongé dans une solution corrosive maintenue à température constante. Après une certaine période d'exposition bien définie, l'échantillon est retiré puis nettoyé afin d'éliminer les produits de corrosion. Une fois l'échantillon est bien nettoyé et pesé

(p_2), on procède à la mesure de la perte du poids (m) de l'échantillon qui est égale à [6]:

$$m = p_1 - p_2 \quad (\text{I-8})$$

Le taux de corrosion (vitesse de corrosion) se définit comme une perte de poids par unité de surface et de temps. Ce taux s'exprime par la relation suivante [6] :

$$v_{corr} = 534 \times \frac{m}{D t A} \quad (\text{I-9})$$

Avec :

v_{corr} : la vitesse de corrosion en $[cm^2/Y]$.

m : les pertes de masse en $[mg]$.

A : la surface de l'électrode en $[cm^2]$.

D : la densité de l'acier en $[g/cm^3]$.

t : le temps d'exposition en heure [6].

b. Méthode analytique

La méthode analytique est basée sur la détermination de la concentration du métal dans le milieu corrosif selon un processus analytique, cette concentration est déterminée soit par un dosage volumétrique ou ionométrique [6].

Dosage volumétrique :

La méthode de dosage volumétrique est basée sur la détermination de la masse de métal dissoute dans le milieu corrosif par dosage avec une solution donnée [6].

Méthode ionométrique:

De même que la méthode de dosage volumétrique, la concentration du métal qui passe dans le milieu corrosif est déterminée selon la méthode ionométrique par l'analyse d'un échantillon prélevé du milieu corrosif par ionométrique [6].

c. Méthode électrochimique

Les méthodes précédentes, par fois dite "méthodes classiques" ne donnent aucune indication sur les mécanismes réactionnels et s'avèrent extrêmement long dans des milieux peu corrosifs. Contrairement, les méthodes électrochimiques n'ont pas ces inconvénients. Dans le cas des réactions qui sont contrôlées par des réactions de transfert de charges, on distingue deux méthodes expérimentales [6] :

Extrapolation des droits de Tafel :

Cette méthode consiste à utiliser les parties anodiques et cathodiques de la courbe de Tafel dans le but d'obtenir la valeur de potentiel de corrosion et la valeur correspondante de la densité de courant de corrosion [6].

L'équation de Butler-Volmer pour un système ne comporte qu'une seule réaction anodique et cathodique est comme suit [6] :

$$i = i_{corr} \exp(\eta / \beta_a) - i_{corr} \exp(-\frac{\eta}{\beta_c}) \quad (\text{I-10})$$

L'extrapolation de la droite de Tafel vers le potentiel, fournit alors la valeur de la densité de courant de corrosion i_{corr} . Puis par la loi de Faraday on détermine la vitesse de corrosion de l'échantillon au repos dans la solution corrosive [6].

Résistance électrique de polarisation :

Cette technique de résistance électrique de polarisation évite certaines difficultés liées à la méthode d'extrapolation des droites de Tafel.

La méthode de la résistance électrique de polarisation est utilisée dans le cas d'une surtension η relativement faible, il est admissible de remplacer les exponentielles de la relation (I-10) par leurs développements limités au premier ordre ($e^x = 1 + x$ et $e^{-x} = 1 - x$) [6].

I.3 Moyens de protection contre la corrosion

La lutte contre la corrosion doit être une préoccupation constante, depuis la conception des équipements jusqu'à leur entretien quotidien. Si les moyens à mettre en oeuvre sont variés et dépendent en grande partie des situations d'utilisation particulières, le but recherché est le même : enrayer la dégradation des équipements

pour augmenter la durée de leur vie, en empêchant que se produisent les réactions électrochimiques qui entraînent une dissolution et une attaque du métal ; autrement dit, réduire ou même annuler la circulation des électrons de l'anode vers la cathode [6].

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 [6] :

I.3.1 Protection par revêtements

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 [1].

Il existe deux types de revêtements métalliques :

Revêtements nobles ou cathodiques

Le métal à protéger est moins noble que le revêtement. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile qui se forme peut conduire à la perforation rapide du métal de base, celui-ci corrode localement et joue un rôle d'anode. Les revêtements plus nobles que le substrat ne doivent donc contenir aucun défaut (figure I.9) [1].

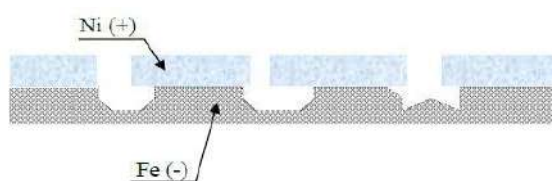


Figure 1.9 Revêtement cathodique (cas du nickel sur fer) [1]

Revêtements anodiques ou sacrificiels

Le substrat est plus noble que le revêtement, c'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc). Le phénomène s'inverse, le dépôt joue le rôle de l'anode et se détériore, alors que le substrat cathode reste protégé. Dans ce cas, la durée de vie du revêtement est proportionnelle à son épaisseur ce qui implique très souvent l'augmentation de l'épaisseur du revêtement (figure I.10) [1].



Figure 1.10 Revêtement anodique (cas du zinc sur fer) [1].

b. Revêtements inorganique

Parmi les revêtements inorganiques ; on distingue deux types :

- Les couches de conversion.
- Les couches étrangères au substrat [1].

Les couches de conversion sont obtenues par une réaction du métal avec un milieu choisi [1].

Elles contiennent donc toujours des ions provenant du substrat. Les couches étrangères au substrat sont, en revanche, fabriquées par des procédés de déposition qui n'impliquent pas une réaction du substrat, tels les procédés PVD et CVD ou l'émaillage. La composition des couches est alors indépendante de celle de substrat [1].

c. Revêtements organique

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu [1].

On classe les revêtements organiques pour la protection des métaux contre la corrosion en trois familles [1] :

- Les revêtements en bitume.
- Les revêtements polymériques.
- Les peintures et vernis [1].

I.3.2 Protection par inhibiteurs

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 [2].

a. Classement des inhibiteurs

Les inhibiteurs peuvent être classés de plusieurs façons [2] :

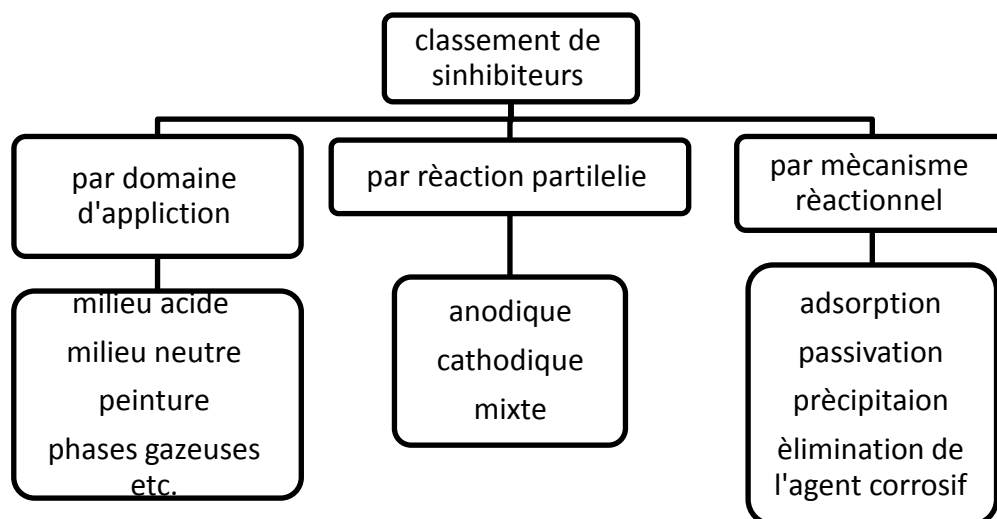


Figure I.11 Classement des inhibiteurs de corrosion [2].

Par domaine d'application

Dans la classification relative au domaine d'application, on peut distinguer : les Inhibiteurs de corrosion utilisés en milieux aqueux, organiques ou gazeux. Ceux utilisés en milieux aqueux sont choisis en fonction du pH du milieu : en milieu acide, ils sont utilisés afin d'éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage ou de détartrage et en milieu neutre/alcalin, ils sont souvent utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement [2].

Par réaction électrochimique partielle

D'après leur influence sur la vitesse des réactions électrochimiques partielles, on différencie trois types d'inhibiteur [2] :

Les inhibiteurs anodiques : ont une action sur la diminution du courant sur la partie anodique de la surface du métal. Si ce blocage n'est que partiel, il peut entraîner localement une augmentation de la densité de courant sur ces surfaces. Il peut conduire à un processus de corrosion localisé, plus intense qu'en l'absence d'inhibiteur, d'où l'importance de la teneur en élément actif au droit de l'acier [2].

Les inhibiteurs cathodiques : induisent une augmentation de la surtension cathodique, et réduisent donc le courant de corrosion. Si ces inhibiteurs ne stoppent jamais complètement la réaction de corrosion, ils ne présentent pas par contre le danger de corrosion localisée. Ces inhibiteurs précipitent souvent des sels ou hydroxydes, du fait de l'accumulation d'ions OH^- sur les cathodes[2].

Les inhibiteurs mixtes : ont à la fois les propriétés des inhibiteurs anodiques et cathodiques [2].

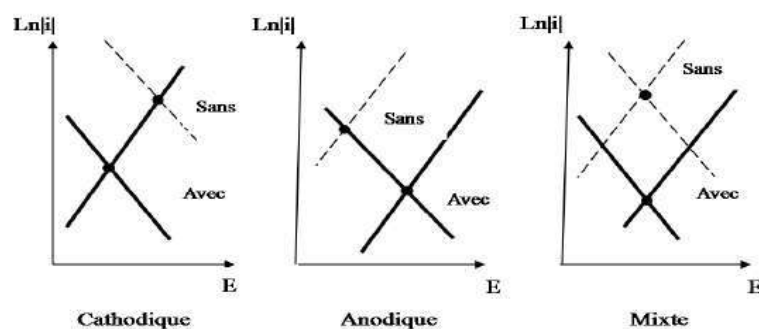


Figure I.12 Diagramme d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte [2].

Un inhibiteur anodique diminue la densité de courant partiel anodique et déplace le potentiel de corrosion dans le sens positif. Un inhibiteur cathodique diminue la densité de courant cathodique et déplace le potentiel de corrosion dans le sens négatif. Un inhibiteur mixte diminue la vitesse des deux réactions mais il influence peu sur le potentiel de corrosion [2].

Par mécanisme réactionnel

D'après le mécanisme réactionnel, on distingue l'inhibition :

- Par adsorption, par passivation.
- Par précipitation d'un film.
- Par élimination de l'agent corrosif [2].

La corrosion peut ralentir suite à l'adsorption d'un inhibiteur à la surface du métal. Le degré d'inhibition dépend alors de l'équilibre entre espèces dissoutes et adsorbées, exprimé par une isotherme d'adsorption. Ce mécanisme est particulièrement important en milieu acide. Certains inhibiteurs oxydants provoquent une passivation spontanée du métal diminuant ainsi la vitesse de corrosion [2].

D'autres inhibiteurs provoquent la formation de films superficiels par précipitation de sels minéraux ou de complexes peu solubles. Ces films réduisent l'accessibilité de la surface vis-à-vis de l'oxygène et, en plus, ils bloquent partiellement la dissolution anodique. L'inhibiteur par élimination de l'agent corrosif n'est que dans des systèmes fermés. Elle se pratique notamment dans les circuits d'eau chaude fermés des centrales thermiques [2].

I.3.3 Protection électrochimique

Elle peut être cathodique ou anodique, selon la nature du métal et les conditions de corrosion.

La protection cathodique consiste à placer le métal dans son domaine d'immunité.

La protection anodique est réservée aux métaux passivables que l'on porte alors dans leur domaine de passivité [1].

a. Passivité

Les métaux et alliages susceptibles de se passiver ont maintenant un très grand nombre d'applications aussi bien dans l'industrie que pour les usages domestiques. Il est donc raisonnable de considérer que la passivation constitue une méthode de protection contre la corrosion [1].

b. Protection cathodique

La protection cathodique consiste à imposer au métal un potentiel suffisamment bas pour que la vitesse de corrosion devienne négligeable. En pratique, cette méthode sert surtout à protéger les structures lourdes en acier, se définit comme une méthode de protection où le métal est déplacé dans sa zone d'immunité [1].

c. Protection anodique

La protection anodique s'applique aux métaux passivables, dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif $E_{corr} < E_p$. Une polarisation anodique permet dans ce cas de déplacer le potentiel dans le domaine passif. La densité de courant nécessaire pour maintenir le métal à l'état passif équivaut à la densité de courant passif i_{pp} qui est normalement très faible. Le maintien d'une protection anodique ne nécessite donc que peu de courant, même en absence de revêtement organique [1].

I.3.4 Les revêtements composites

Un revêtement composite est un revêtement multi-phase avec une distribution de phase et une géométrie bien contrôlées pour optimiser les propriétés de la phase de la matrice et de la (ou des) phase (s) co-déposée (s) de renforcement. Les revêtements composites ont été utilisés pour obtenir une combinaison de propriétés spécifiques de résistance à la corrosion et à l'usure, d'inhibition de la corrosion et de conductivité électrique, de contrôle tribologique et d'autolubrification. Parfois, deux propriétés apparemment opposées sont spécifiées, telles qu'une résistance élevée à la traction et une ductilité élevée. Les applications les plus courantes comprennent le contrôle de la corrosion de diverses structures comme l'acier, les ponts, les plates-formes en mer, les pipelines souterrains et les équipements d'entraînement mécanique [7].

I.4 Objectif des revêtements composites

- Réduction des pressions de contact.
- Amélioration de la lubrification.
- Abaissement du coefficient de frottement.
- Tenue à l'usure par adhésion.
- Homogénéisation des couches superficielles.
- Valorisation des contraintes résiduelles de compression.
- Augmentation de la dureté superficielle pour la tenue à l'usure par abrasion-érosion.
- Résistance à l'oxydation.
- Piégeage des particules dues à la rugosité [8].

I.5 L'électrodéposition

I.5.1 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 (I.13), 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 [9].

Le générateur permet de faire circuler un courant entre les deux électrodes dont le potentiel diffère de leur potentiel d'équilibre [9].

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 [9].

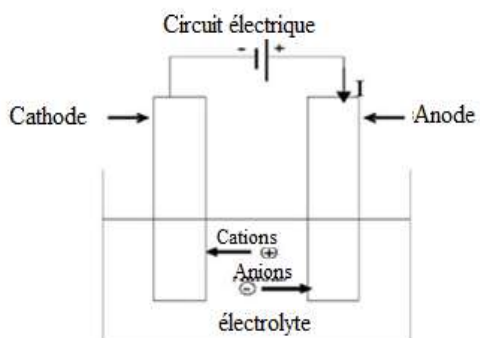


Figure I.13 Schéma de montage d'une cellule d'électrolyse [9].

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 [9].

I.6 Mécanismes réactionnels de formation des revêtements composites

I.6.1 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 [10].

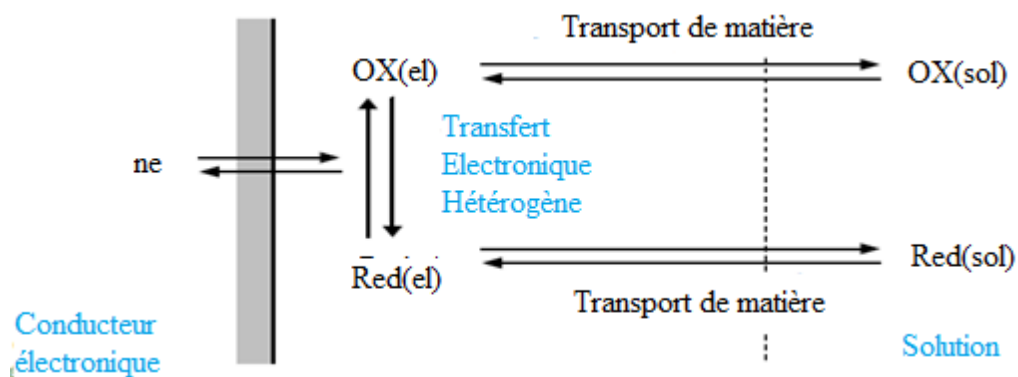


Figure I.14 Représentation schématique des différentes étapes d'une réaction électrochimique [11].

a. Transfert de masse

Lors de la formation du dépôt métallique, les ions présents dans la solution se déplacent : c'est le transfert de masse. La mobilité ionique responsable du passage du courant est constituée elle-même de plusieurs phénomènes qui coexistent [9] :

La migration : les ions se déplacent sous l'effet du champ électrique engendré par le gradient de potentiel existant entre les électrodes.

La diffusion : les ions se déplacent également en raison du gradient de concentration entre l'interface électrode-électrolyte et le sein de la solution. Ce gradient résulte de la consommation de l'espèce ionique métallique, dite espèce électro activé, à la cathode.

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 [10]:

- 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).

I.7 Facteurs et paramètres des revêtements composites

I.7.1 Température

Deux effets opposés peuvent être prévus. Si la température du bain augmente, la vitesse de diffusion des ions et la conductibilité du bain croît aussi ; cela accélère le processus de micro cristallisation. Cependant, dans le même temps, les surtensions diminuent et cela favorise la croissance des grains. En effet, la température augmente la mobilité latérale des atomes métalliques dans la couche de croissance et les atomes peuvent atteindre plus facilement les centres actifs de croissance, ils favorisent une croissance de petits cristaux [8].

I.7.2 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 [8].

I.7.3 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 [8].

I.7.4 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 [8].

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 [8].

I.7.5 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 [8].

I.7.6 Nature de l'électrolyse

L'utilisation de sels complexes donne des dépôts très cohérents et qui adhèrent bien au métal [8].

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 [8].

I.7.7 Concentration de l'électrolyte

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

En effet, si la concentration augmente, le nombre des ions devient plus grand, la vitesse de leur décharge croît et cela favorise le dépôt des grains fins. Par exemple, il est possible d'obtenir des dépôts compacts d'étain en utilisant des solutions très concentrées de chlorure stanneux, bien que ce métal donne en général des dépôts à gros grains. Néanmoins, lorsque la concentration dépasse une limite déterminée, les germes ne peuvent grossir et le dépôt devient pulvérulent [8].

I.7.8 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 [8].

I.8 Les revêtements Ni-SiC

Les revêtements composites Ni-SiC sont largement utilisés pour la protection des pièces de frottement en raison de leur résistance élevée à l'usure et du faible coût de la poudre de céramique. Les revêtements composites Ni-SiC synthétisés par électrodéposition par impulsions permettant des vitesses de diffusion sur-potentielles élevées et faibles en surface entraînant la formation de nouveaux noyaux. Les revêtements composites présentent une dureté quatre fois supérieure à celle du nickel recuit et deux fois supérieure à celle de la matrice de nickel à granulométrie normale. Vaezi et al évalué la résistance à l'usure et à la corrosion de revêtements composites Ni-SiC fabriqués selon la méthode d'électrodéposition. La micro dureté, l'usure ainsi que la résistance à la corrosion des revêtements composites ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en SiC dans le bain de placage. L'augmentation de la micro dureté et de la résistance à l'usure est principalement due aux particules de SiC incorporées, qui limitent la croissance des grains ainsi que la déformation plastique et favorisent le raffinage et le renforcement dispersif des grains. Ces effets sont devenus plus forts avec l'augmentation de la teneur en SiC dans l'électrolyte. Les revêtements composites à base de nickel ont montré une large région passive et une densité de courant passive inférieure aux revêtements à base de nickel pur. Les particules de SiC renforcées agissent comme une barrière physique à l'initiation et au développement de la corrosion des défauts, ce qui améliore la résistance à la corrosion des revêtements composites [12].

I.9 Propriétés des revêtements Ni-SiC

Les propriétés mécaniques des matériaux nanocristallins dépendent principalement de la microstructure du matériau, ce qui permet une théorie de la dislocation corrélée avec la résistance et la ductilité de ces matériaux. Les revêtements composites de nickel sont constitués de matrices de nickel contenant des particules de deuxième phase telles que Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC, Cr_2O_3 , WC, diamant, PTFE, graphite ou même des microcapsules contenant des liquides pour améliorer les propriétés mécaniques, tribologiques et les propriétés de résistance à la corrosion des nanocomposites. Ces particules de seconde phase agissent comme une barrière physique au mouvement de dislocation et au glissement des joints de grains résultant

en une amélioration significative des propriétés mécaniques des revêtements composites [7].

I.9.1 Dureté

La dureté du matériau est définie comme la résistance d'un matériau à la pénétration, en particulier la déformation permanente, l'indentation ou la rayure. Généralement, la dureté est liée à la limite d'élasticité due à la contrainte géométrique résultant de la déformation [7].

L'addition de particules céramiques pour synthétiser des revêtements composites agit comme une barrière au mouvement de dislocation et au glissement des joints de grains, augmentant ainsi la dureté des revêtements composites. L'augmentation de la dureté des revêtements composites est due à l'effet combiné du raffinement des grains et à la dispersion uniforme des nanoparticules. Par conséquent, l'effet des particules renforcées dans les revêtements composites sur la dureté dépend principalement de la teneur en volume ainsi que de la taille et de la distribution de ces particules dans la matrice métallique. La dureté des revêtements composites est principalement influencée par deux aspects [7] :

La dureté de la matrice métallique qui est déterminée par la microstructure des revêtements,

La teneur en volume des particules renforcées dans les revêtements composites [7].

I.9.2 Résistance à la corrosion

Les revêtements en composite de nickel ont une meilleure résistance à la corrosion que les revêtements en nickel pur, parce que les particules de deuxième phase renforcées perturbent la croissance régulière des cristaux de nickel et favorisent un nouveau site de nucléation. Cela rend la structure des revêtements composites plus finement cristalline et donc une résistance à la corrosion améliorée des revêtements composites [7].

L'addition de ces particules dans des revêtements composites diminue la densité de courant de corrosion et déplace le potentiel de corrosion des revêtements composites vers une direction plus noble, c'est-à-dire vers une valeur positive [7].

Amadeh et al ont réalisé des expériences électrochimiques pour analyser le comportement à la corrosion des revêtements composites (Ni-SiC) [7].

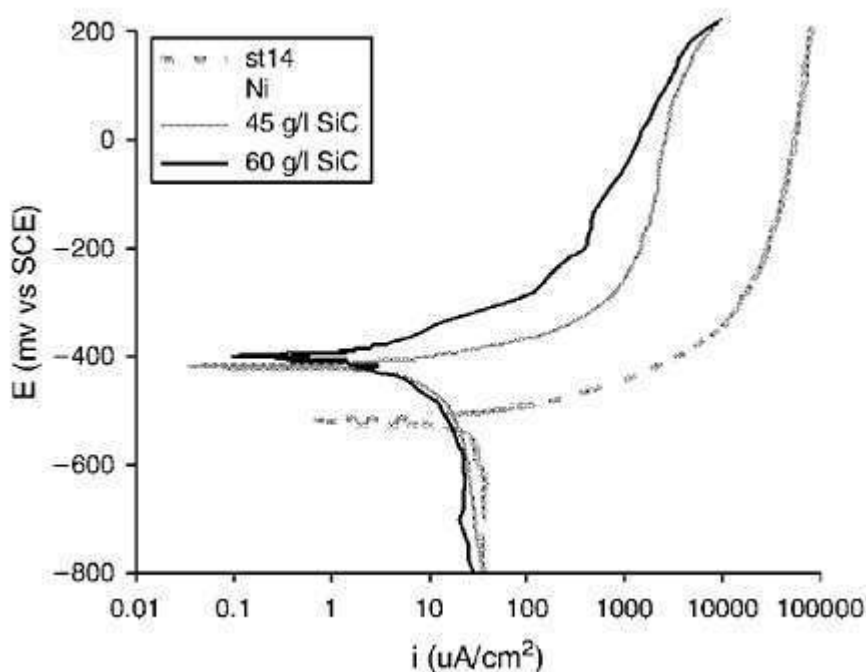


Figure I.15 Courbes de polarisation de l'acier st14, revêtement avec nickel pur et revêtements composites [7].

Ils ont trouvé que la résistance à la corrosion des revêtements composites s'est considérablement améliorée par rapport aux revêtements en nickel pur et au substrat en acier inoxydable [7].

Ils ont conclu que l'addition de particules de SiC agissent comme des obstacles à l'initiation et au développement de la corrosion des défauts, et remplissent également les fissures, les interstices et les trous micrométriques de la matrice de nickel, résultant en une amélioration significative de la résistance à la corrosion des revêtements composites, comme il est montré dans la figure (I.16) [7].

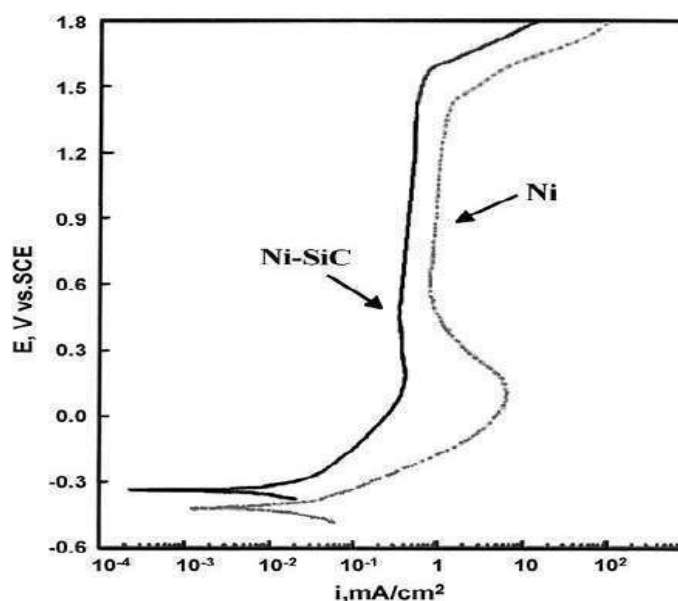


Figure I.16 Courbes de polarisation cathodique des revêtements de nickel pur et de Ni-SiC [7].

I.9.3 Résistance à l'usure

Les revêtements composites de nickel renforcés montrent une meilleure résistance à l'usure par rapport aux revêtements de nickel pur. L'amélioration de la résistance à l'usure des revêtements composites dépend principalement des particules de deuxième phase renforcées dans la matrice de nickel, qui constituent une barrière physique à la croissance des grains de nickel et à la déformation plastique de la matrice de nickel [7].

Vaezi et al ont comparés le comportement tribologique de revêtements composites (Ni-SiC) avec les revêtements de nickel pur. La figure I.17 montre que le revêtement composite a montré moins de taux d'usure que les revêtements de nickel pur. La diminution du taux d'usure des revêtements composites est due à la combinaison de l'affinage des grains et de l'effet de renforcement de la dispersion. Ces effets deviennent plus forts avec l'augmentation de la teneur en SiC, ainsi la résistance à l'usure des revêtements composites augmente avec l'augmentation de la teneur en SiC dans les revêtements.

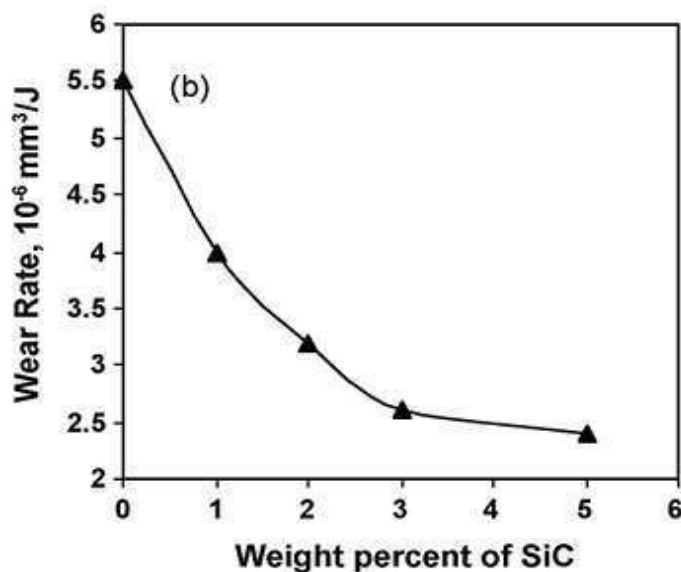


Figure I.17 Taux d'usure du revêtement de nanocomposite Ni-SiC en fonction du pourcentage en poids de nanoparticules de SiC [7].

I.9.4 Applications des revêtements composites Ni-SiC

Les revêtements composites Ni-SiC sont largement utilisés pour la protection des pièces de friction en raison de leur excellente résistance à l'usure et de leur faible coût. En outre, ces revêtements trouvent des applications dans les moules à moteur à combustion et à moulage en raison de leur propriété anti-usure [12].

I.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le phénomène de corrosion et quelques formes de corrosion et les facteurs influant sur la corrosion possible pour un métal ou un alliage. Pour lutter ce phénomène nous avons présenté diverses méthodes de protection Nous choisissons la méthode la plus adéquate pour protection par le revêtement composite Ni-SiC.

Chapitre II

La Logique Floue

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter la technique de la logique floue, et en donnant Le principe, utilisation de la logique floue et la déférence entre la logique floue et la logique classique. Ensuite, on va parler sur les variables linguistiques et les sous-ensembles flous et fonction d'appartenance d'un logique floue. Enfin, nous parlerons sur les opérateurs en logique floue et Structure d'un système de commande floue.

La logique floue fut développée par Lofti A. Zadeh en 1965 à partir de sa théorie des sous-ensembles flous. Les sous-ensembles flous sont une manière mathématique de représenter l'imprécision de la langue naturelle, ils peuvent être considérés comme une généralisation de la théorie des ensembles classiques [Zadeh, 1965 ; Kaufmann, 1973 ; C-T.Lin et Lee, 1996; Jang et al., 1997; Ross, 2005; Tong-Tong, 1995] . La logique floue est aussi appelée "logique linguistique" car ses valeurs de vérité sont des mots du langage courant : "plutôt vrai, presque faux, loin, si loin, près de, grand, petit...". La logique floue a pour objectif l'étude de la représentation des connaissances imprécises, des raisonnements approchés et elle cherche à modéliser les notions vagues du langage naturel pour pallier l'inadéquation de la théorie des ensembles classiques dans ce domaine [13].

II.1.1 Le principe

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par Zadeh en 1965. A côté d'un formalisme mathématique fort développé, nous préférons aborder la présentation de manière intuitive [14].

Les notions de température moyenne ou de courant faible sont relativement difficiles à spécifier de manière précise. En logique floue, Le concept de variable linguistique, comme son nom le suggère, joue un rôle très important. C'est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases au lieu de nombres. Par exemple, "Température" est une variable linguistique et l'ensemble des valeurs qu'elle peut prendre est appelé l'ensemble de termes (nuances), soient par exemple : Basse, Moyenne, Elevée. D'autres termes peuvent être construits à l'aide de modificateurs linguistiques tels que (très, plus ou moins, un peu...etc.) [14].

Chaque valeur linguistique est caractérisée par sa fonction d'appartenance $\mu_{\text{faible}}(x)$ qui associe à chaque valeur numérique x de "Température", un degré qui reflète la vérité du sens faible[14].

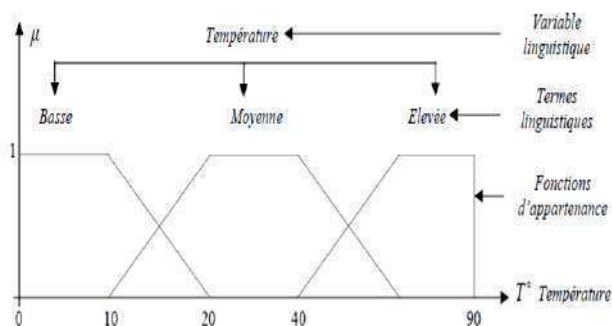


Figure 11.1 Exemple d'une variable linguistique "Température" avec trois termes linguistiques [14].

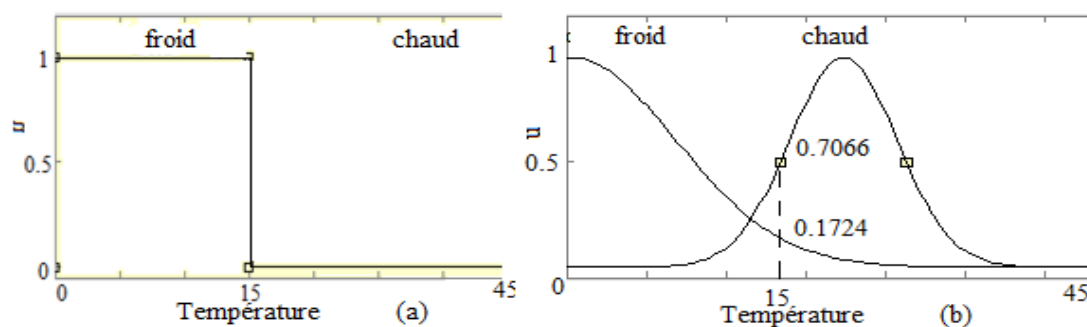
II.1.2 Utilisation de la logique floue

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].

II.1.3 Logique floue et la logique classique

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 (II.2) a montré 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].



(a) Deux ensembles selon la logique classique (b) Deux ensembles selon la logique floue

Figure 11.2 Classification des températures d'une pièce en deux ensembles [17].

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].

II.1.4 Les variables linguistiques

L'ensemble de référence d'un mot de langage naturel s'appelle l'univers du discours. L'univers du discours d'un mot est un ensemble de termes qui évoquent le même concept mais à degrés différents [18].

Une variable linguistique représente un état dans le système à régler ou une variable d'un réglage dans un contrôleur flou. Sa valeur est définie dans des termes linguistiques qui peuvent être des mots ou des phrases d'un langage naturel ou artificiel. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que [18] :

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

Où :

- x est le nom de la variable.
- $T(x)$ est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x .

- U est l'univers du discours associé avec la valeur de base.
- G est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x.
- M est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.

II.1.5 Les sous-ensembles flous

Dans la théorie des ensembles classiques, il n'y a que deux situations acceptables pour un élément, appartenir ou ne pas appartenir à un sous-ensemble. Le mérite de Zadeh a été de tenter de sortir de cette logique booléenne en introduisant la notion d'appartenance pondérée [19] :

Permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble, c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus moins fortement à ce sous-ensemble [19].

Soit X un ensemble de référence et soit x un élément quelconque de X. Un sous-ensemble flou A de X est défini comme l'ensemble des couples [19] :

$$A = \{ (x, \mu_A(x)), x \in X \} \quad (\text{II-1})$$

Avec :

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

Ainsi, un sous-ensemble flou A de X est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui associe, à chaque point x de X un réel dans l'intervalle [0,1], $\mu_A(x)$ représente le degré d'appartenance de x à A. On observe les trois cas possibles suivants [19] :

$$\begin{cases} \mu_A(x) = 0 \\ 0 < \mu_A(x) < 1 \\ \mu_A(x) = 1 \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

Où, $\mu_A(x) = 0$ si x n'appartient pas à A; $0 < \mu_A(x) < 1$ si x appartient partiellement à A et, $\mu_A(x) = 1$ si x appartient entièrement à A. La fonction

d'appartenance $\mu_A(x)$ inclut ou exclut donc à ses extrémités tout élément x au sous-ensemble A . Entre les valeurs extrêmes, le degré d'appartenance varie à proportion de la proximité à l'ensemble [19].

II.1.6 Fonction d'appartenance

a. Fonction triangulaire

L'allure de cette fonction est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$ [20] :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{II-3})$$

b. Fonction trapézoïdale

Elle est définie par quatre paramètres $\{a, b, c, d\}$ [21]:

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (\text{II-4})$$

c. Fonction gaussienne

Elle est définie par deux paramètres $\{\sigma, m\}$ [22]:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{II-5})$$

Notons que m est le centre, σ est la variance.

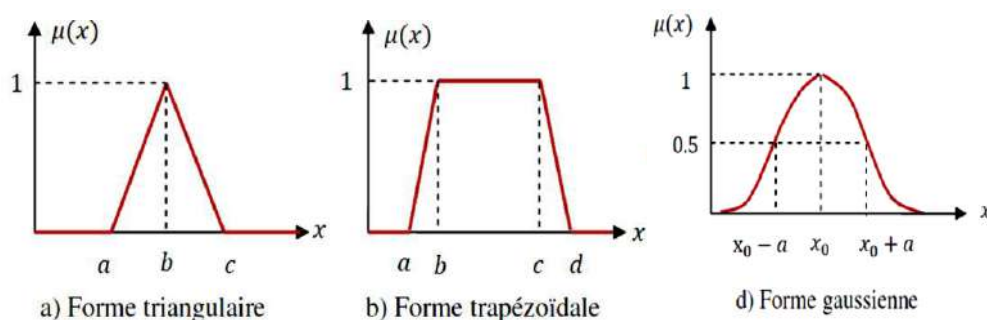


Figure II.3 Exemples des fonctions d'appartenance [23].

II.1.7 Les opérateurs en logique floue

Il s'agit de généralisation des opérateurs de : négation intersection et union de la théorie de ensembles classique [24].

a. L'opérateur NON (complément)

Il est défini mathématiquement par [24] :

$$A = \{X / X \notin A\} \quad (\text{II-6})$$

Et il est représenté par la fonction

$$\text{non}(\mu_A(x)) = \mu_{A(x)}^1 - \mu_{A(x)} \quad (\text{II-7})$$

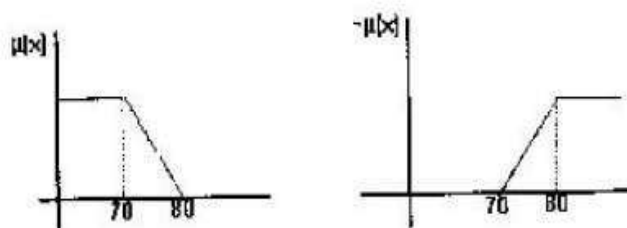


Figure II .4 L'opérateur NON(complément) [24].

b. L'opérateur ET (intersection)

Il est défini mathématiquement par [24] :

$$A \cap B = \{X / X \in A \wedge X \in B\} \quad (\text{II-8})$$

Et il est représenté par la fonction :

$$\mu_{A \cap B}(X) = \mu_A(X) \cap \mu_B(X) = \min(\mu_A(X), \mu_B(X)) \quad (\text{II-9})$$

La figure (II.5) montre graphiquement l'opérateur ET sur deux fonctions d'appartenance.

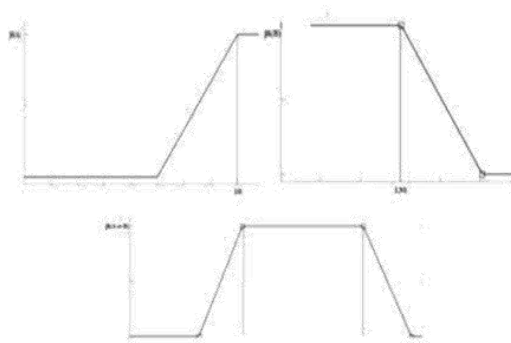


Figure II .5 L'opérateur ET (intersection) [24].

c. L'opérateur OU (union)

IL est défini mathématiquement par [24] :

$$A \cup B = \{X / X \in A \vee X \in B\} \quad (\text{II-10})$$

$$\mu_{A \cup B}(X) = \mu_A(X) \cup \mu_B(X) = \max(\mu_A(X), \mu_B(X)) \quad (\text{II-11})$$

La figure (II.6) montre graphiquement l'opérateur OU (union) sur deux fonctions d'appartenance.

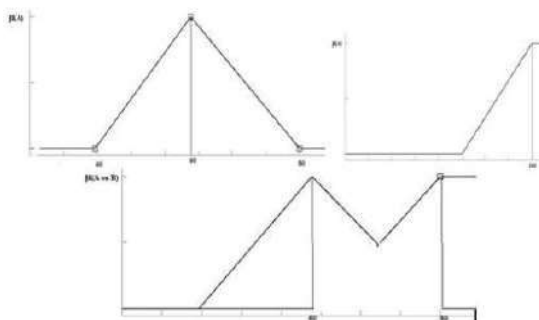


Figure II .6 L'opérateur OU (union) [24].

II.1.8 Structure d'un système de commande floue

Contrairement aux techniques de réglage classique, le réglage par la logique floue n'utilise pas des formules ou des relations mathématiques bien déterminées ou précises. Mais, il manipule des inférences avec plusieurs règles floues à base des opérateurs flous ET, OU, ALORS, ...etc, appliquées à des variables linguistiques [25].

On peut distinguer trois parties principales constituant la structure d'un régulateur floue [26] :

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

La figure (II.7) représente, à titre d'illustration la structure d'un régulateur flou à deux entrées et une sortie :ou X_1 et X_2 représentent les variables d'entrée, et X_r , celle de sortie ou la commande [26].

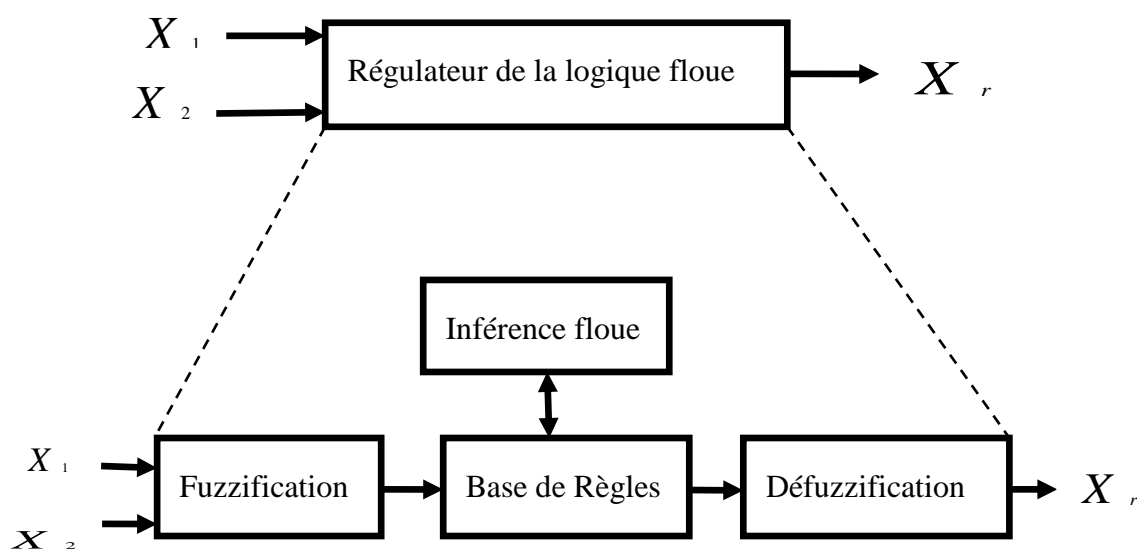


Figure II .7 Structure interne d'un Régulateur de la logique floue [26].

a. Interface de fuzzification

La Fuzzification transforme une valeur numérique de l'entrée en une partie floue définie sur un espace de représentation lié à l'entrée. Du choix de cet espace de représentation (numérique ou linguistique) dépend de la nature de la partie floue E résultante de la Fuzzification. Cette dernière peut être un sous-ensemble flou numérique (élément de $F(x)$) ou un sous-ensemble [19].

b. Mécanisme d'inférence floue

Cette étape consiste à relier les variables physiques d'entrée du régulateur (grandeurs mesurées ou estimées), qui sont transformées en variables linguistiques pendant l'étape de fuzzification, la variable de sortie du contrôleur sous sa forme linguistique, par des règles mentales traduisant une action ou une décision linguistique sur la commande à la sortie du régulateur, face à toute situation se présentant à l'entrée de ce régulateur. 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 [19].

c. Défuzzification

A la fin de l'inférence. L'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou

commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la defuzzification.

Il existe plusieurs méthodes de defuzzification : centre de gravité de la surface, bissecteur de la surface, moyen des maximas, plus petit des maximas en valeur absolue, plus grand des maximas en valeur absolue. la plus souvent rencontrée étant la méthode de calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou [19].

Défuzzification par centre de gravité

La defuzzification par centre de gravité consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance selon :

$$Y_{cg} = \frac{\int Y \cdot \mu_{Bres}(y) dy}{\int y \cdot \mu_{Bres}(y) dy} \quad (\text{II-12})$$

En pratique, on estime le centre de gravité en calculant la moyenne d'un certain nombre de points échantillonnés sur la fonction [19] :

$$y_{cg} = \frac{\sum y_i \cdot \mu_{Bres}(y_i)}{\sum \mu_{Bres}(y_i)} \quad (\text{II-13})$$

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

Défuzzification par valeur maximum

Cette méthode ne s'utilise que dans le cas discret. On choisit comme sortie y_m l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{Bres}(y)$. Lorsque $\mu_{Bres}(y)$ est échantillonnée, on prend la moyenne des abscisses du maximum [19] :

$$y_i = \frac{\sum_{y_i \in M} y_i}{|M|} \quad (\text{II-14})$$

M est l'ensemble des points pour lesquels la fonction d'appartenance est maximale [22] :

$$M = \left\{ y \in [-c, c] / \mu_{B_{res}}(y) = H(B_{res}) \right\} \quad (\text{II-15})$$

II.2 Conclusion

Dans ce chapitre on a vu des notions fondamentales et expliquer les détails des étapes de la logique floue. Par ailleurs. On a expliqué les méthodes les plus répandus pour la réalisation d'un système basé sur la logique floue.

Chapitre III

Résultat et Discussion

III.1 Introduction

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain. Dans ce chapitre nous proposons d'utiliser un model flou afin d'étudier l'effet des paramètres d'électrodéposition (Concentration de SiC, densité du courant, vitesse d'agitation) sur micro dureté et la masse de dépôt (résistance à la corrosion).

III.2 Données expérimentales

Afin d'étudier l'effet des paramètres d'électrodéposition sur la résistance à la corrosion et la dureté nous proposons d'utilisée une méthode de simulation basée sur la théorie du logique floue (Mamdani) sous MATLAB, en se basant sur les données expérimentales regroupés dans les tableaux (III.1 et III.2) obtenus depuis les références [27] et [28].

Tableau III.1 Données expérimentales composite Ni-SiC (La codé postions et micro dureté) [27].

Essai	C (g/l)	I (A/dm ²)	Co (%)	H (HV)
1	5	2	0.8	310
2	5	5	1.14	440
3	5	8	1.1	380
4	10	2	1.7	350
5	10	5	3.98	480
6	10	8	2.4	400
7	20	2	2.62	420
8	20	5	5.8	610
9	20	8	3.38	500
10	50	2	2.62	320
11	50	5	5.4	520
12	50	8	3.82	460

Tableau III .2 Données expérimentales composite Ni-SiC

(La masse de SiC) [28].

Essai	C (g/l)	Va (tr/min)	M (%)
1	2	50	3.5
2	2	80	4
3	2	120	1.2
4	2	200	0.1
5	5	50	8
6	5	80	8.5
7	5	120	6
8	5	200	4
9	10	50	4.5
10	10	80	5.1
11	10	120	2.5
12	10	200	1.2
13	15	50	4
14	15	80	5.8
15	15	120	2
16	15	200	0.9
17	20	50	3.8
18	20	80	4.5
19	20	120	1.8
20	20	200	0.8

III.2.1 Système flou

Nous avons choisi, deux systèmes d'inférence flous de type Mamdani pour le revêtement composite Ni-SiC.

- **Pour micro dureté**

Nous utilisons un système flou avec deux entrées : la concentration (C), et la densité de courant (I), et deux variables de sortie : la codé postions (Co) et micro dureté(H) figure (III.1).

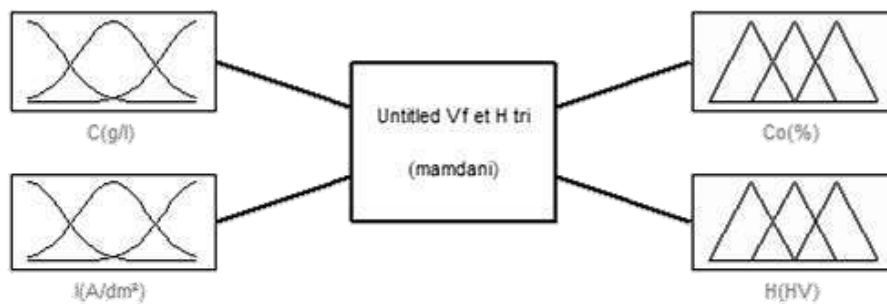


Figure III.1 Le Système flou utilisé pour prédire micro dureté et la codé-position.

- **Pour la masse de SiC**

Dans la figure (III.2) ci-dessous, représenté un système flou avec deux paramètres d'entrées : la concentration (C), la vitesse d'agitation (Va), et une variable de sortie : la masse (M).

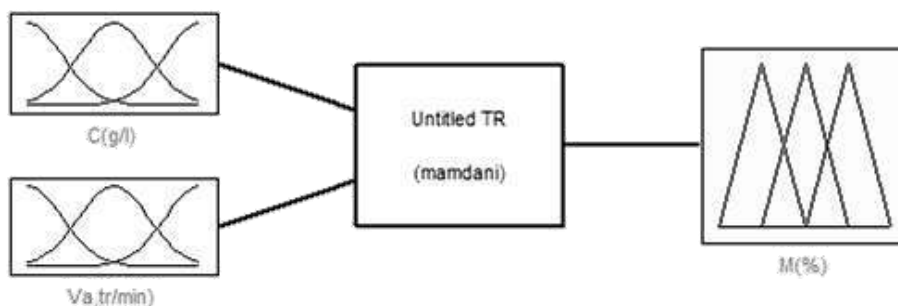


Figure III. 2 Système flou pour prédire La masse de SiC.

III.2.2 Modélisation floue

a. Les variables floues

Pour micro dureté

Dans la construction de notre premier modèle, nous avons choisi comme paramètre d'entrée la concentration des particules de SiC, la densité du courant, et comme variable de sortie nous avons choisi micro dureté, la codé-position de SiC.

Tableau III.3 Valeurs minimales et maximales des variables d'entrées et de sortie pour le système flou.

	Valeur MIN	Valeur MAX
Les paramètres d'entrée		
La concentration (C)(g/ l)	5	50
La densité de courant (I) (A/dm ²)	2	8
Les paramètres de sortie		
La codé- position (Co) (%)	0.8	5.8
micro dureté (H) (HV)	310	610

L'ensemble des variables utilisées dans notre étude sont découpées en catégories appelées variables linguistiques. Chaque variable linguistique correspond à un intervalle de donnée numérique. Les variables linguistiques pour la première variable (la concentration de SiC) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III. 3).

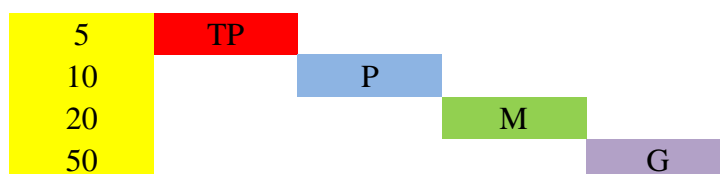


Figure III.3: Variables linguistiques pour la concentration de SiC.

Les variables linguistiques pour la deuxième variable (La densité du courant) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.4).



Figure III.4 Variables linguistiques pour la densité du courant.

Pour définir les variables linguistiques associées du paramètre de sortie. Nous utilisons le nuage de points et nous présentons dans les deux figure (III.5, III.6) la distribution des valeurs de la dureté et le codé postions obtenus lors des essais dans l'univers de discours. Cette représentation nous permis de déterminer les intervalles

flous vis-à-vis à la concertation des valeurs de chaque sortie dans chaque intervalle.

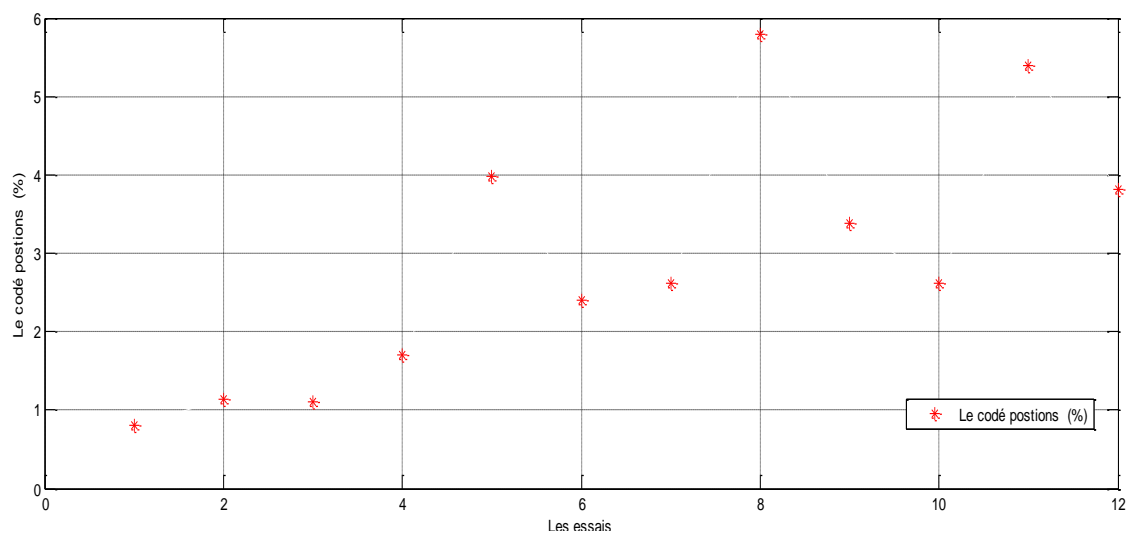


Figure III.5 Les valeurs de codé postions en ensembles des essais.

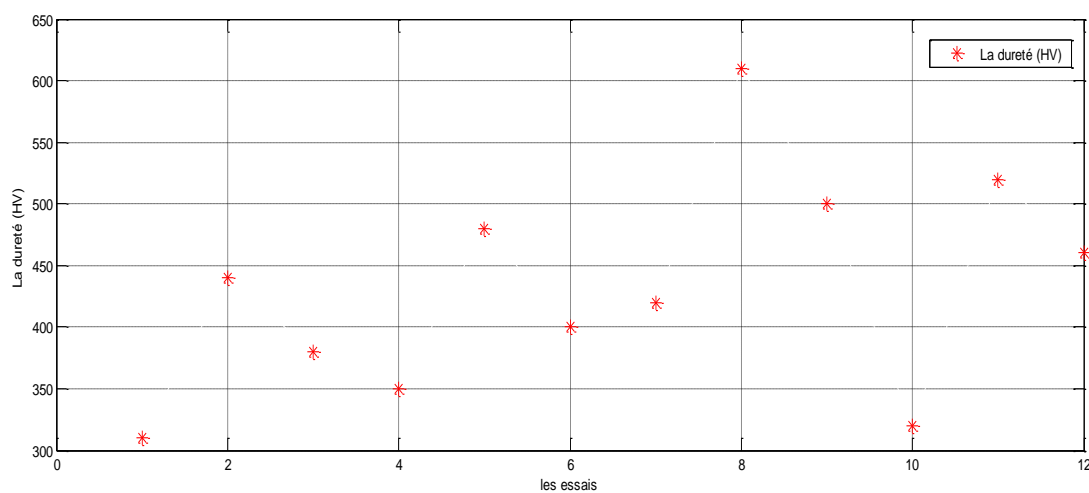


Figure III.6 Les valeurs de micro dureté en ensembles des essais.

La figure (III. 7) représente les variables linguistiques pour la première sortie (la codé- positon).

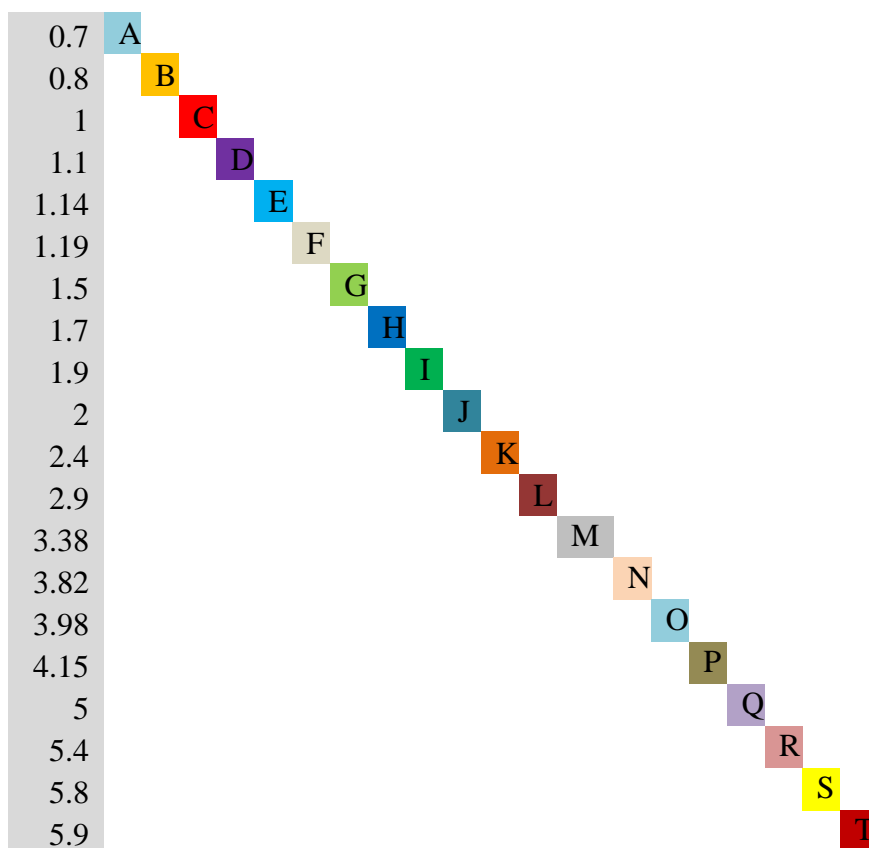


Figure III.7 Variables linguistiques pour le codé-position.

La figure (III. 8) représente les variables linguistiques pour la deuxième sortie (micro dreté).

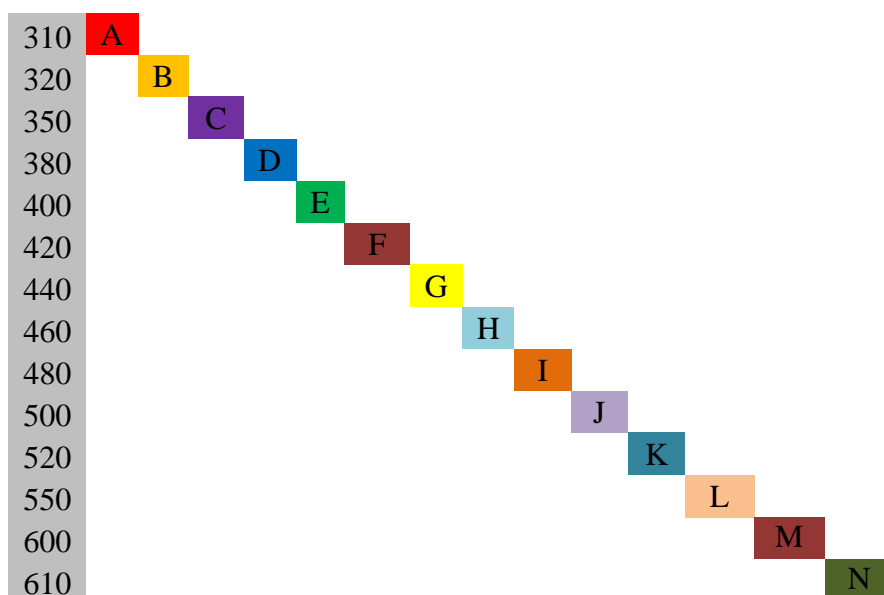


Figure III.8 Variables linguistiques pour micro dreté.

Pour la masse de SiC

Dans la construction du deuxième modèle, figure (III.2) nous avons choisi comme paramètre d'entrée : la concentration de SiC et la vitesse d'agitation et comme variable de sortie nous avons choisir la masse de SiC.

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

	Valeur MIN	Valeur MAX
Les paramètres d'entrée		
La concentration (C)(g/ l)	2	20
La vitesse d'agitation(Va)(tr/min)	50	200
Les paramètres de sortie		
La masse (M) (%)	0.1	8.5

Les variables linguistiques de la première variable (La concentration de SiC) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.9).

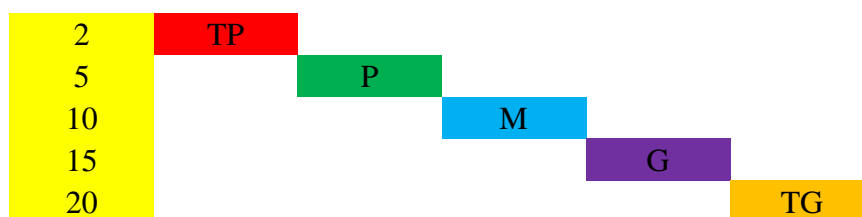


Figure III.9 Variables linguistiques pour la concentration de SiC.

Les variables linguistiques de la deuxième variable (La vitesse d'agitation) sont choisies comme il est indiqué dans la figure (III.10).

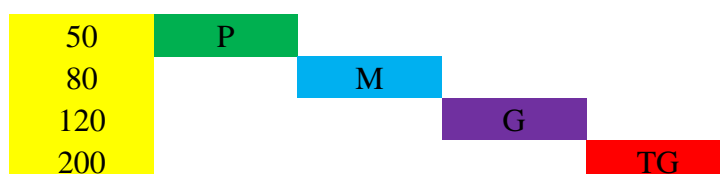


Figure III.10 Variables Linguistiques pour la vitesse d'agitation

Pour définir les variables linguistiques associées du paramètre de sortie. Nous utilisons le nuage de points et nous présentons dans la figure (III.11) la distribution des valeurs de la masse obtenue lors des essais dans l'univers de discours. Cette représentation nous permis de déterminer les intervalles flous vis-à-vis à la concertation des valeurs de chaque sortie dans chaque intervalle.

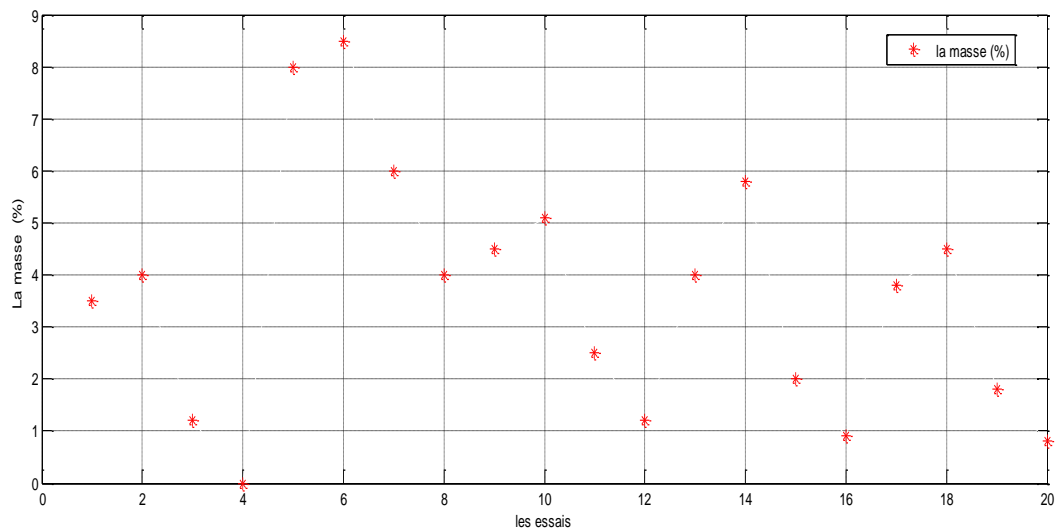


Figure III.11 Les valeurs de la masse en ensembles des essais.

La figure (III.12) représente les variables linguistiques pour la sortie (La masse de SiC).

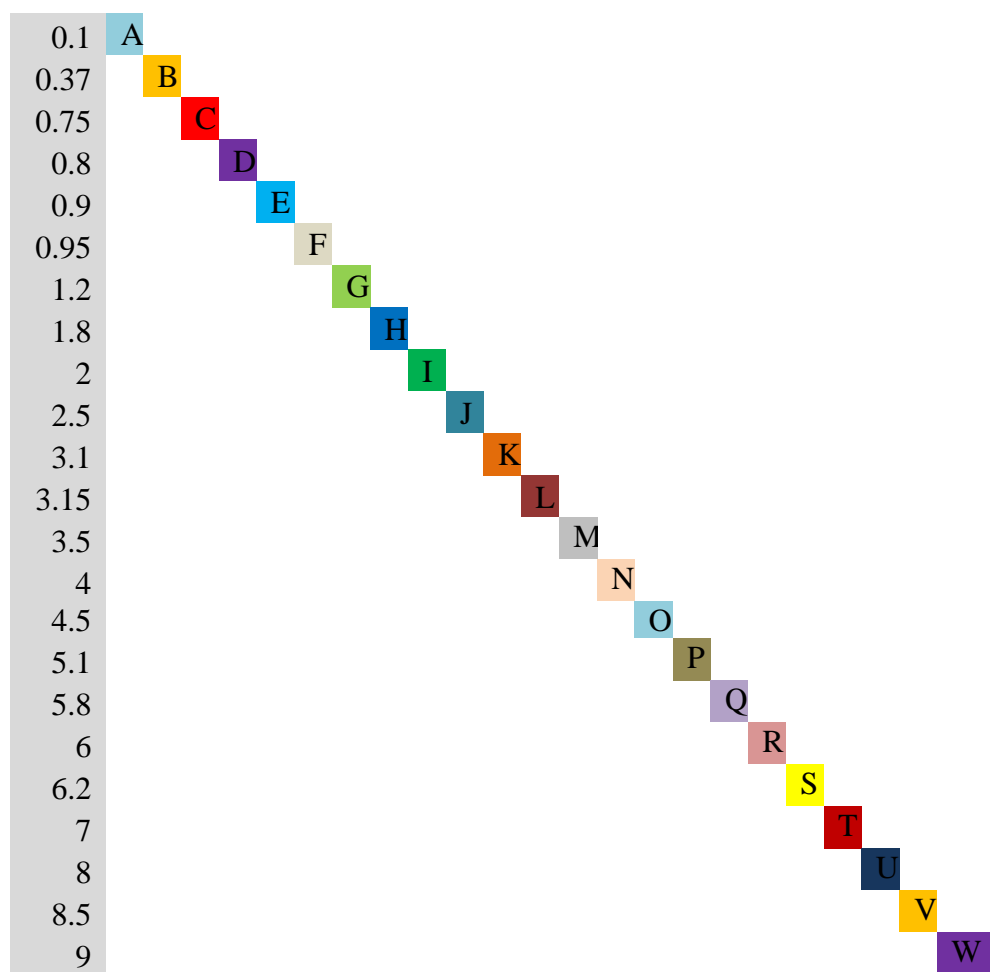


Figure III.12 Variables linguistiques pour la masse de SiC.

b. Les sous-ensembles flous

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

Un ensemble flou est défini à sa fonctions d'appartenance se présentent sous différentes formes. Dans la présente étude, les fonctions d'appartenance triangulaire, trapézoïdale et pimf ont été utilisées pour les paramètres d'entrée et le paramètre de sortie.

Utilisation des fonctions d'appartenance triangulaires

Les deux figures (III.13, III.14) représente les fonctions d'appartenance de type triangulaire pour les paramètres d'entrée (La concentration de SiC, La densité de courant).

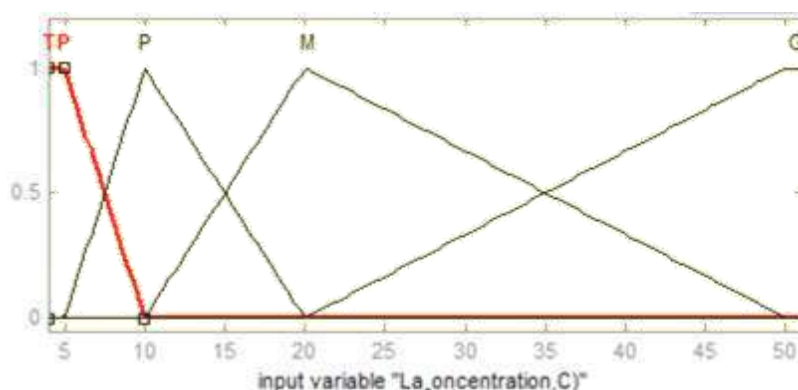


Figure III.13 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la concentration de SiC.

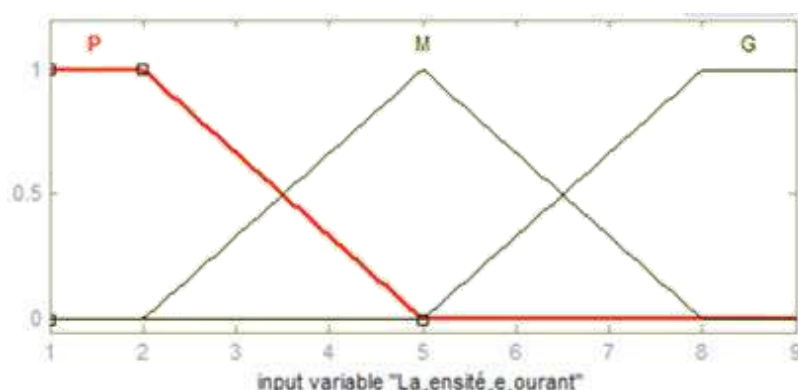


Figure III.14 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la densité du courant.

Les deux figures (III.15, III.16) représente les fonctions d'appartenance de type triangulaire pour les paramètres de sortie (la codé- position de Sic et la dureté).

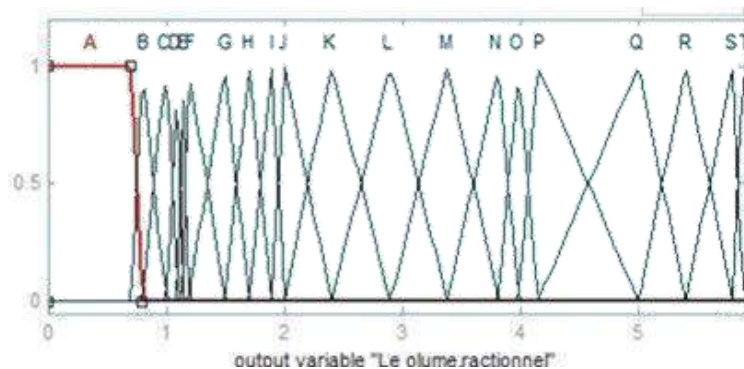


Figure III.15 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la codé postions.

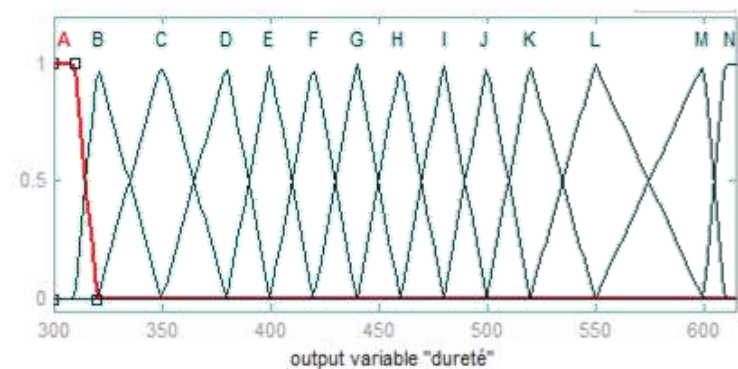


Figure III.16 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la dureté.

Utilisation des fonctions d'appartenance trapézoïdales

Les deux figures (III.17, III.18) représente les fonctions d'appartenance de type trapézoïdale pour les paramètres d'entrée (La concentration de SiC, La densité du courant).

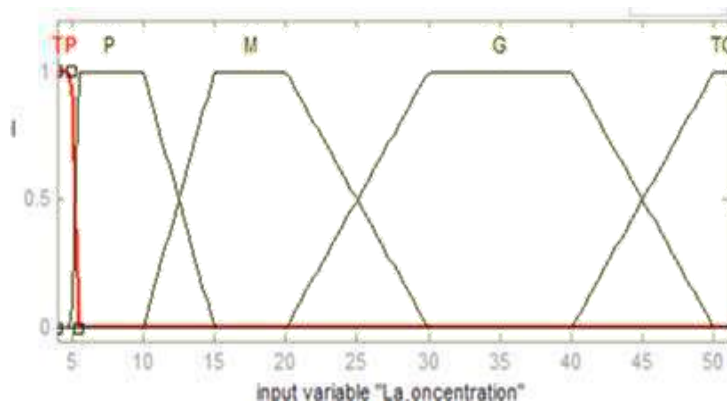


Figure III.17 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la concentration de SiC.

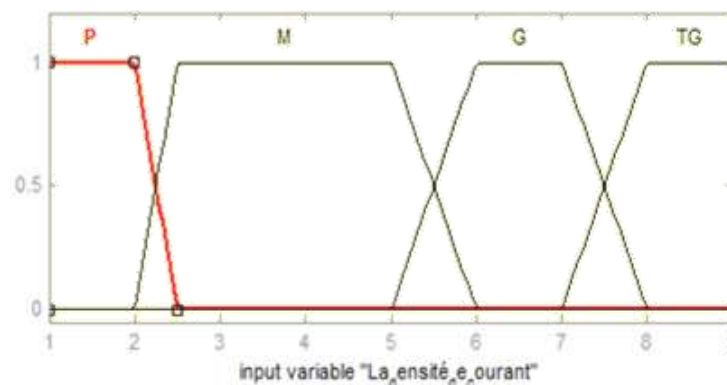


Figure III.18 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la densité de courant.

Les deux figures (III.19, III.20) représente les fonctions d'appartenance de type trapézoïdale pour les paramètres de sortie (La codé postion de SiC, La dureté).

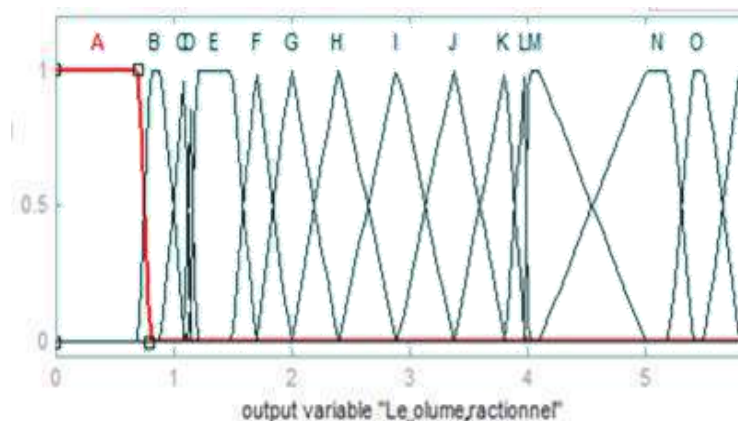


Figure III.19 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la codé postion de SiC.

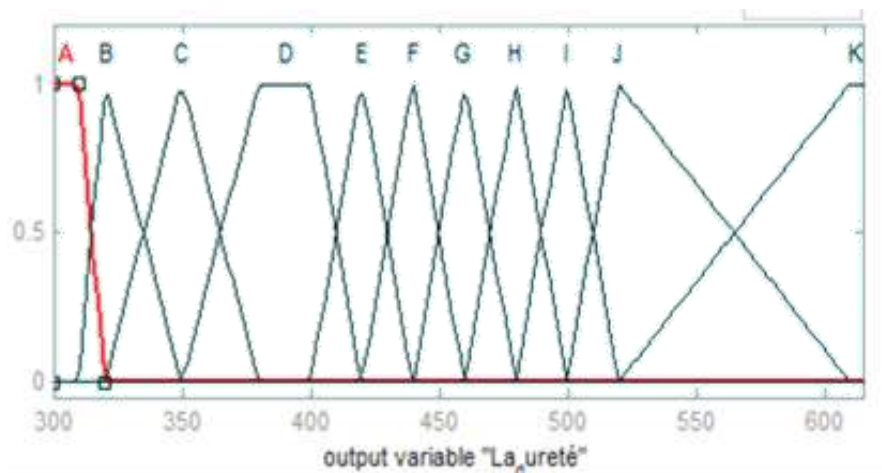


Figure III.20 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la dureté.

Utilisation des fonctions d'appartenance pimf

Les deux figures (III.21, III.22) représente les fonctions d'appartenance de type pimf pour les paramètres d'entrée (La concentration de SiC, La densité du courant).

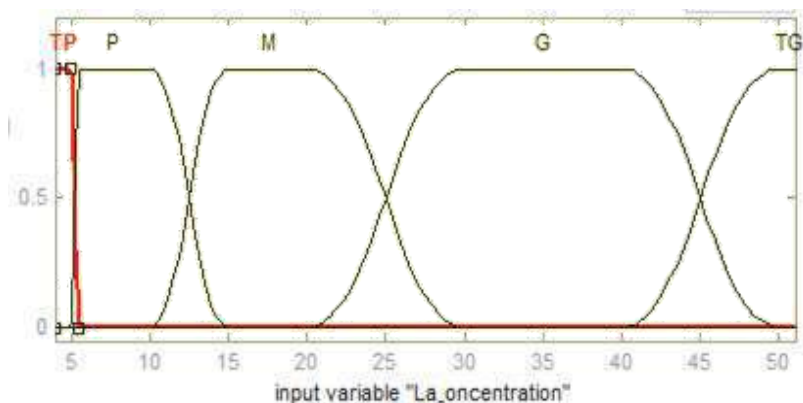


Figure III.21 Fonctions d'appartenance (type pimf) pour la concentration de SiC.

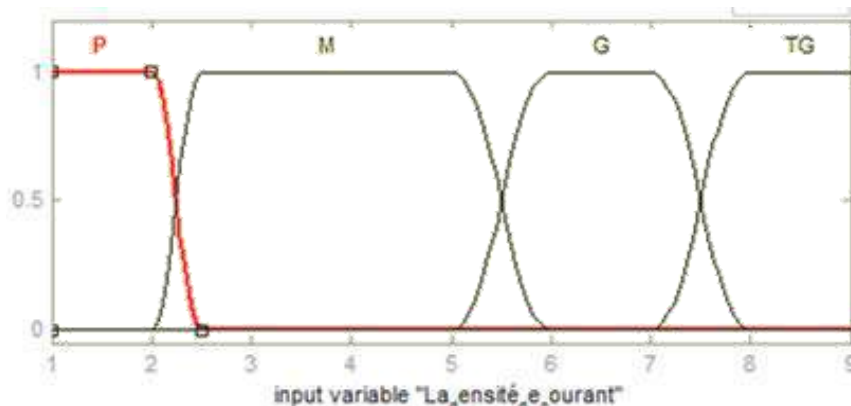


Figure III.22 Fonctions d'appartenance (type pimf) pour la densité du courant.

Les deux figures (III.23, III.24) représente les fonctions d'appartenance de type pimf pour les paramètres de sortie (La codé postion de SiC, La dureté).

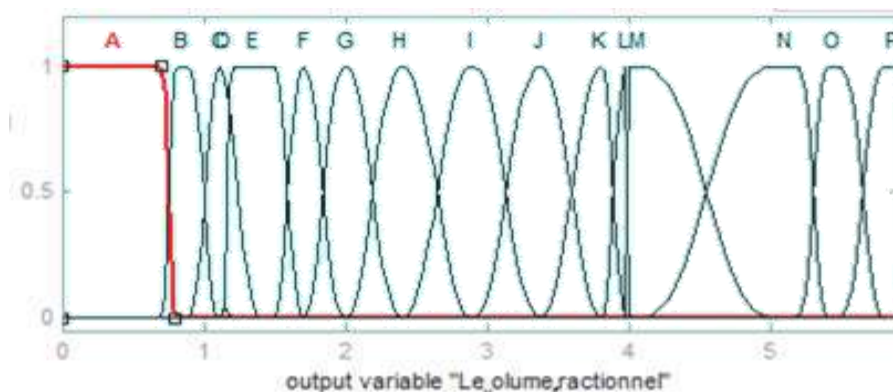


Figure III.23 Fonctions d'appartenance (type pimf) pour la codé postion de SiC.

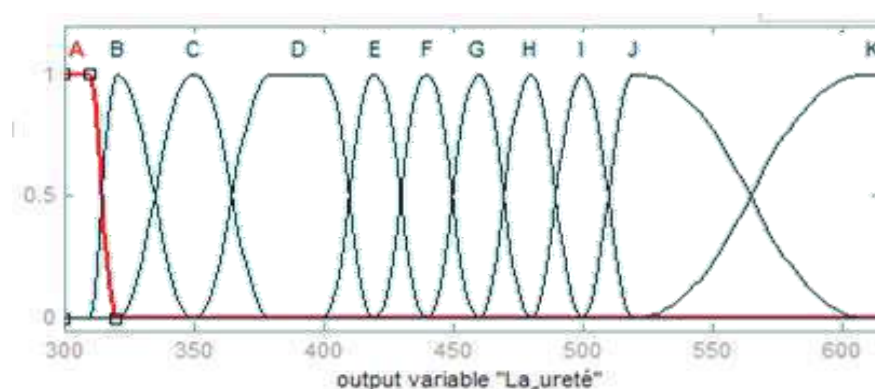


Figure III.24 Fonctions d'appartenance (type pimf) pour la dureté.

III.3 Les règles floues

- **Pour micro durezza et le codé postions**

Douze (12) règles floues ont été établies en fonction des conditions expérimentales indiquées dans le tableau (III.1). En adhérant au processus de composition maximum-minimum, la logique floue de ces règles a produit une sortie floue.

Chaque règle prend la forme suivante :

SiC est (variable linguistique) **et** I est (variable linguistique) **Alors** Co est (variable linguistique) est H (variable linguistique).

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

Tableau III.5 Les règles floues.

Essai	C (g/l)	I (A/dm²)	Co (%)	H (HV)
1	TP	P	B	A
2	TP	M	E	G
3	TP	G	D	D
4	P	P	H	C
5	P	M	O	I
6	P	G	K	E
7	M	P	K	F
8	M	M	S	L
9	M	G	M	J
10	G	P	K	B
11	G	M	R	K
12	G	G	N	H

- **Pour la masse de SiC**

Vingt (20) règles floues ont été établies en fonction des conditions expérimentales indiquées dans le tableau (III.2). En adhérant au processus de composition maximum-minimum, la logique floue de ces règles a produit une sortie floue.

Chaque règle prend la forme suivante :

SiC est (variable linguistique) **et** Va est (variable linguistique) **Alors** M est (variable linguistique).

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

Tableau III.6 Les règles floues.

Essai	C (g/l)	Va (tr/min)	M (%)
1	TP	P	M
2	TP	M	N
3	TP	G	G
4	TP	TG	A
5	P	P	U
6	P	M	V
7	P	G	R
8	P	TG	N
9	M	P	O
10	M	M	P
11	M	G	J
12	M	TG	G
13	G	P	N
14	G	M	Q
15	G	G	I
16	G	TG	E
17	TG	P	N
18	TG	M	O
19	TG	G	H
20	TG	TG	D

III.4 Défuzzification

Dans cette étape ont utilisé la méthode d'inférence « Mamdani », pour la conversion des résultats floues obtenues en un résultat réel. Et Pour obtenir la valeur

réelle que nous recherchons, on applique la méthode de Centre de Gravité figure : (III.25 et III.26).

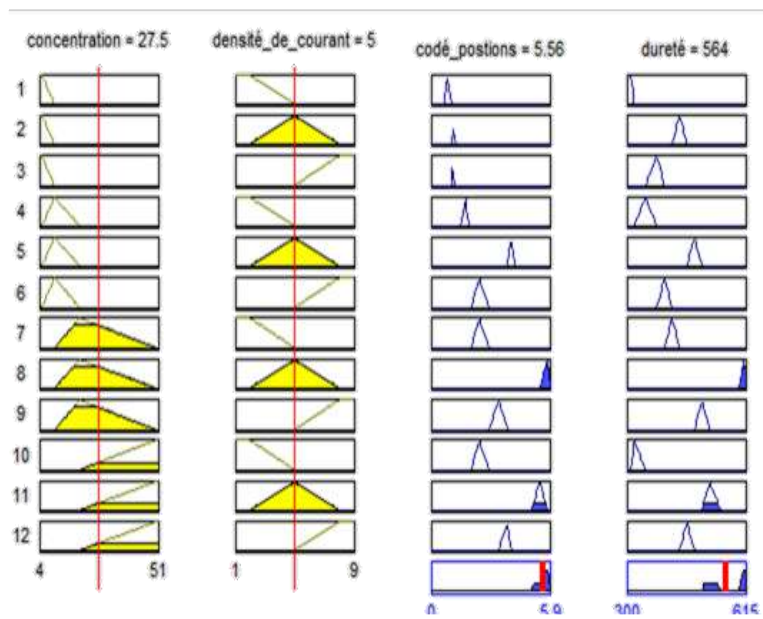


Figure III.25 Défuzzification de la sortie en valeurs réels.

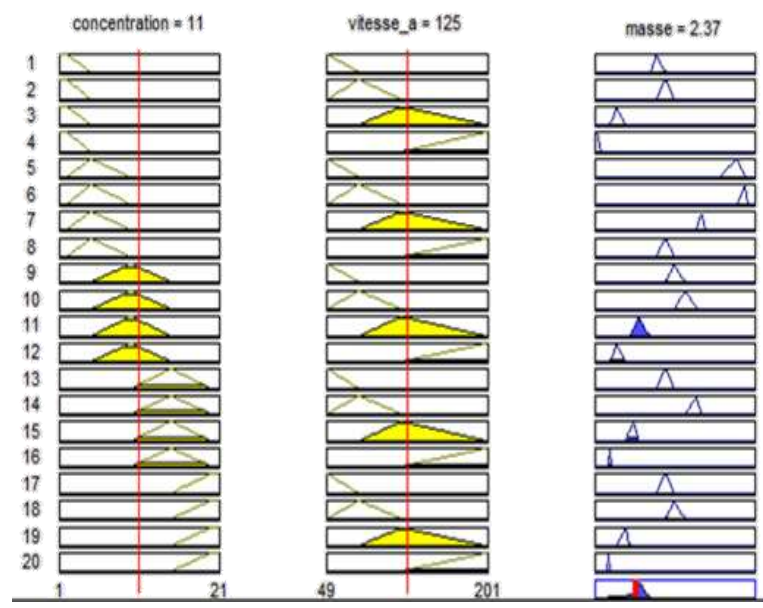


Figure III.26 Défuzzification de la sortie en valeurs réels.

III.5 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 les valeurs linguistiques issues de régulateur flou en valeurs numériques.

III.5.1 Etude de la précision et de l'erreur du système flou

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

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

e_i : Les erreurs

V_p : La valeur prédite.

V_{Ex} : La valeur expérimentale.

Pour calculer la précision en trouvant l'approchement de la valeur prédite à la valeur mesurée, on utilise la formule suivante :

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

A : La précision.

N : Le nombre total de jeux de données testés.

V_p : La valeur prédite.

V_{Ex} : La valeur expérimentale.

III.5.2 Comparaison entre les résultats obtenus avec les différents types de fonctions d'appartenance

Les figures ci-dessous montrent une comparaison entre les résultats obtenus en utilisant des trois types de fonctions d'appartenance : triangulaire, trapézoïdale et pimf. Nous à permet de choisir le type de fonctions la plus approprié pour notre problème.

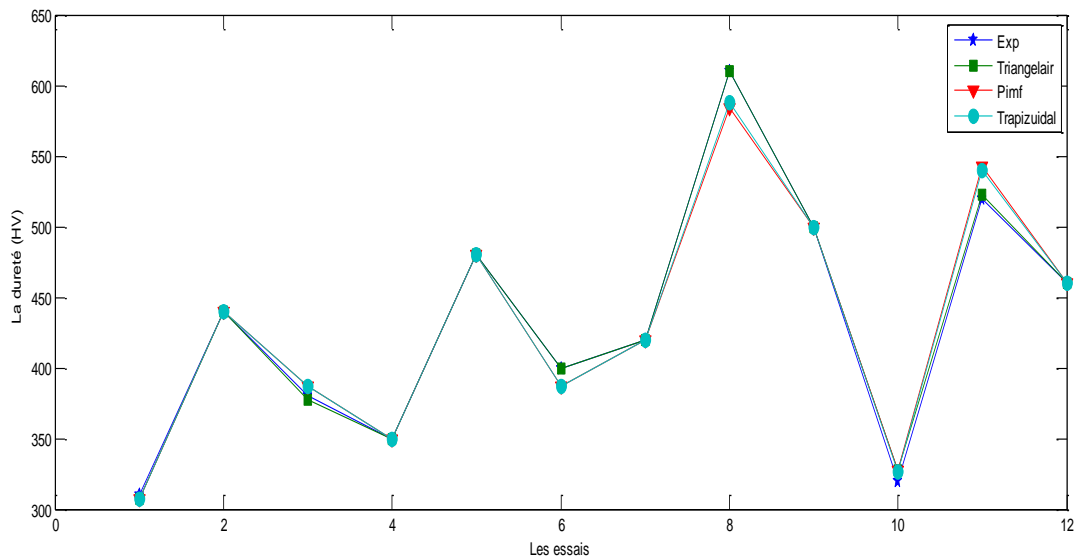


Figure III.27 Variation de micro dureté (trapézoidale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essais.

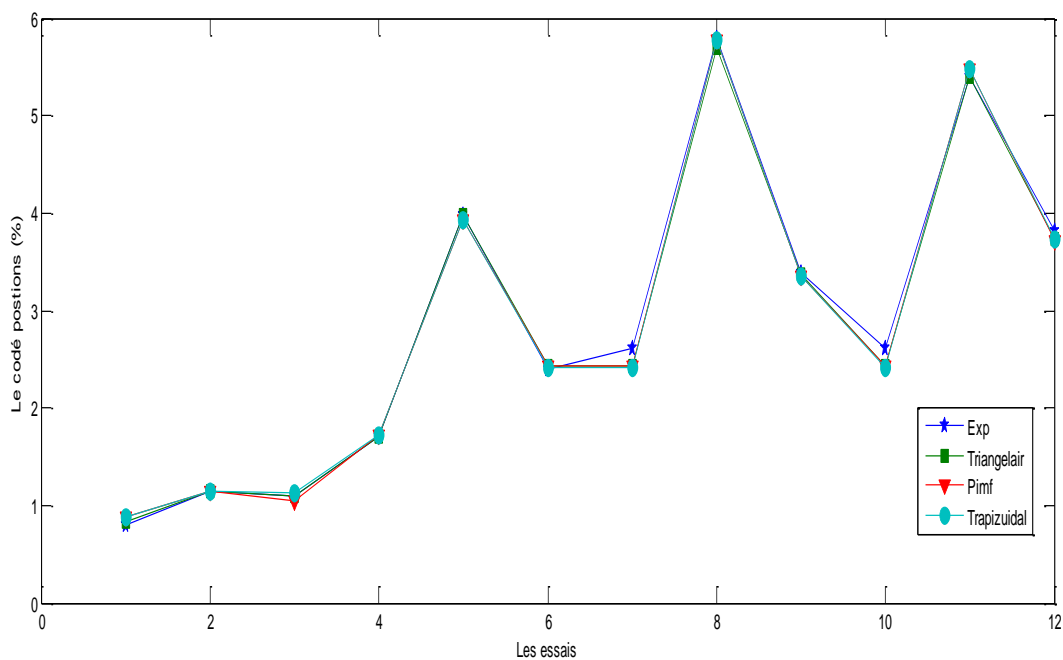


Figure III.28 Variation de le codé postions (trapézoidale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre essais.

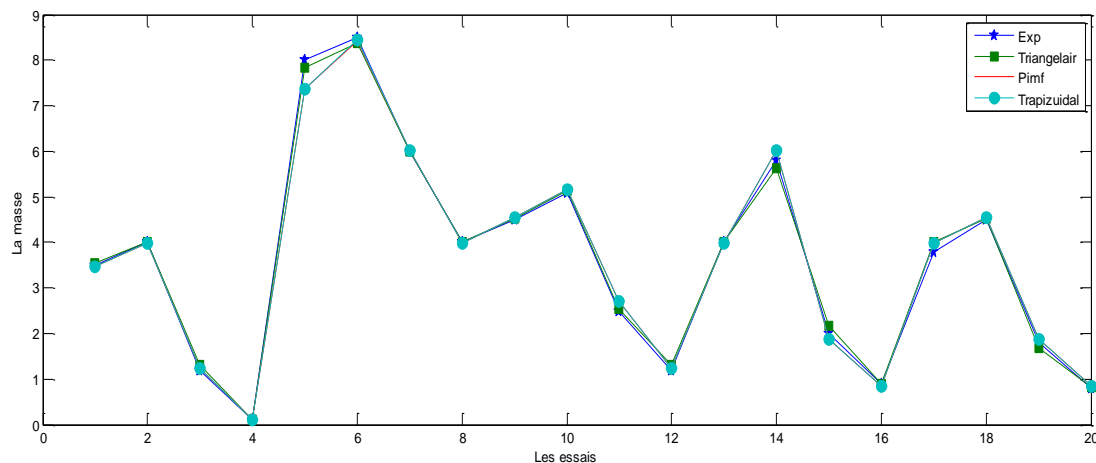


Figure III.29 Variation de la masse de SiC (trapézoïdale, triangulaire et pimf) en fonction du nombre d'essais.

Nous avons remarqué dans les figures (III.27, III.28, III.29) précédentes ne nous pouvons pas de choisir entre les trois types de fonctions d'appartenance, Ils sont presque les mêmes.

Pour définir les résultats les plus approchés aux résultats expérimentaux. Nous proposons d'utiliser l'écart-type est donnée par la relation suivante :

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

σ : L'écart-type.

N : Le nombre total de jeux de données testés.

V_p : La valeur prédite.

V_{Ex} : La valeur expérimentale.

- **Pour micro dureté**

Pour : $N=12$ on a :

En utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires l'écart - type est de l'ordre de 2.516611.

En utilisant des fonctions d'appartenance trapézoïdale l'écart - type est de l'ordre de 11.10931.

En utilisant des fonctions d'appartenance pimf l'écart - type est de l'ordre de 9.776673.

- **Pour Le codé postions**

Pour : N= 12 on a :

En utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires l'écart - type est de l'ordre de 0.087792.

En utilisant des fonctions d'appartenance trapézoïdale l'écart - type est de l'ordre de 0.092395.

En utilisant des fonctions d'appartenance pimf l'écart - type est de l'ordre de 0.093575.

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

Dans la suite du travail, les résultats présentés sont obtenus en utilisant les fonctions d'appartenance de type triangulaires.

Tableau III.7 Résultats du système flou.

Essai	micro dureté (HV)				La codé-position de SiC(%)			
	H _{ex}	H _p	Erreur %	Précision %	Co _{ex}	Co _p	Erreur %	Précision %
1	310	307	0.967742	99.03226	0.8	0.833	4.125	95.875
2	440	440	0	100	1.14	1.14	0	100
3	380	377	0.789474	99.21053	1.1	1.09	0.909091	99.09091
4	350	350	0	100	1.7	1.7	0	100
5	480	480	0	100	3.98	3.98	0	100
6	400	400	0	100	2.4	2.43	1.25	98.75
7	420	420	0	100	2.62	2.43	7.251908	92.74809
8	610	610	0	100	5.8	5.7	1.724138	98.27586
9	500	500	0	100	3.38	3.37	0.295858	99.70414
10	320	327	2.1875	97.8125	2.62	2.43	7.251908	92.74809
11	520	523	0.576923	99.42308	5.4	5.4	0	100
12	460	460	0	100	3.82	3.73	2.356021	97.64398
La précision=99.6232%					La précision= 97.90301%			

- **Pour la masse de SiC**

Pour : N= 20 on a :

En utilisant des fonctions d'appartenance triangulaires l'écart - type est de l'ordre de 0.096876.

En utilisant des fonctions d'appartenance trapézoïdale l'écart - type est de l'ordre de 0.171915.

En utilisant des fonctions d'appartenance pimf l'écart - type est de l'ordre de 0.168167.

Tableau III.8 Résultats du système flou.

Essai	Mex(%)	M p(%)	Erreur%	Précision%
1	3.5	3.55	1.428571	98.57143
2	4	4	0	100
3	1.2	1.31	9.166667	90.83333
4	0.1	0.106	6	94
5	8	7.83	2.125	97.875
6	8.5	8.37	1.529412	98.47059
7	6	6	0	100
8	4	4	0	100
9	4.5	4.53	0.666667	99.33333
10	5.1	5.13	0.588235	99.41176
11	2.5	2.53	1.2	98.8
12	1.2	1.31	9.166667	90.83333
13	4	4	0	100
14	5.8	5.63	2.931034	97.06897
15	2	2.16	8	92
16	0.9	0.892	0.888889	99.11111
17	3.8	4	5.263158	94.73684
18	4.5	4.53	0.666667	99.33333
19	1.8	1.67	7.222222	92.77778
20	0.8	0.81	1.25	98.75
La précision= 97.09534%				

III.5.3 Représentation schématique des résultants

Les fonctions obtenues par simulation par logique floue sont représentées dans les figures de : (III.30, III.32).

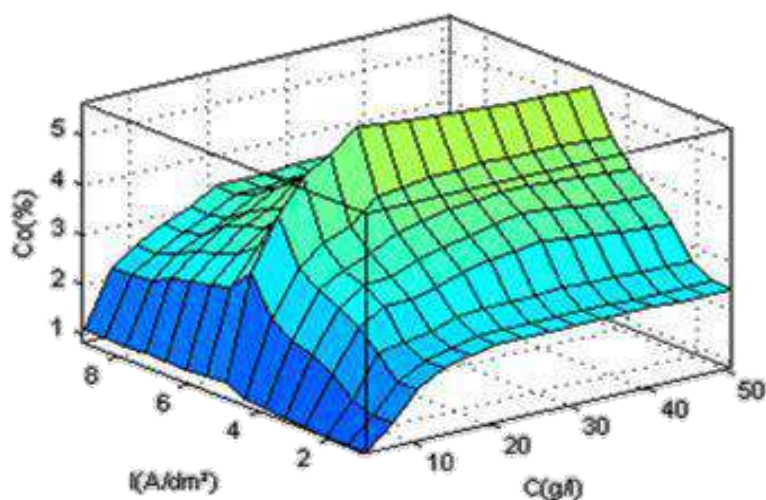


Figure III.30 Variation du codé-position de SiC en fonction de densité du courant et de la concentration en SiC.

La figure (III.30) représente la variation du codé-position de SiC en fonction de densité du courant et de la concentration en SiC, on remarque que les valeurs maximales du codé-position de SiC sont obtenus pour une densité du courant $5\text{A}/\text{dm}^2$ et des concentrations en SiC supérieures à 20 g/l .

Les meilleures propriétés anticorrosives des revêtements composites Ni-SiC sont obtenus à une densité du courant de $5\text{A}/\text{dm}^2$ et des concentrations élevées (supérieure à 20g/l).

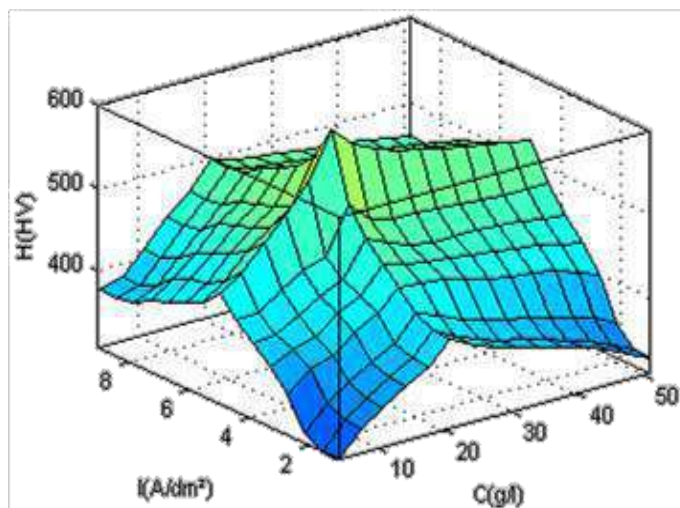


Figure III.31 Variation de la dureté en fonction de densité du courant et de la concentration en SiC.

La figure (III.31) représente la variation de la dureté en fonction de densité du courant et de la concentration en SiC, on remarque que les valeurs maximales de la dureté sont obtenues pour une concentration en SiC de 20g/l et une densité du courant de 5A/dm².

Les valeurs moyennes de la concentration en SiC et de la densité du courant sont considérées comme des valeurs optimales pour l'élaboration des revêtements composites Ni-SiC avec des duretés plus élevées.

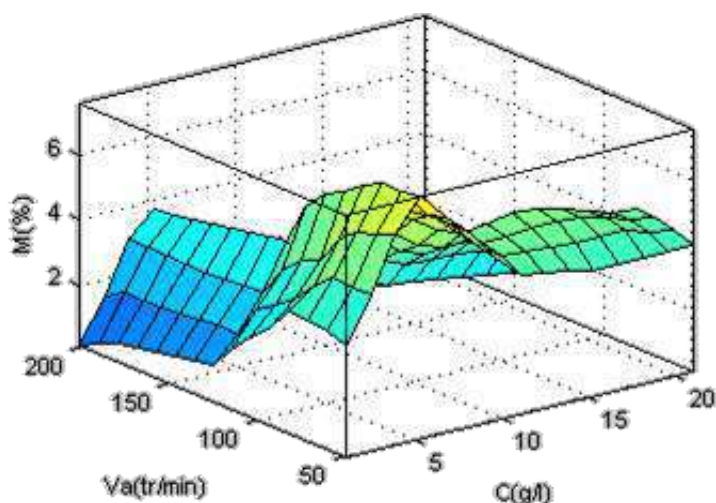


Figure III.32 Variation de la masse en SiC en fonction de la vitesse d'agitation et de la concentration en SiC.

La figure (III.32) représente la variation de la masse en SiC en fonction de la vitesse d'agitation et de la concentration en SiC, on remarque que les valeurs maximales de la masse en SiC sont obtenues pour une concentration en SiC de 5g/l et une vitesse d'agitation de 80 tr/min.

La combinaison des valeurs minimales de la concentration en SiC et de la vitesse d'agitation conduit à l'élaboration de revêtements, de résistance à la corrosion élevée.

III.5.4 Validation des résultats

Les figures (III.33, III.34, III.35) représentent une superposition des deux courbes de variation de la codé -position de SiC, micro dureté et la masse en SiC : expérimentale et prédite respectivement.

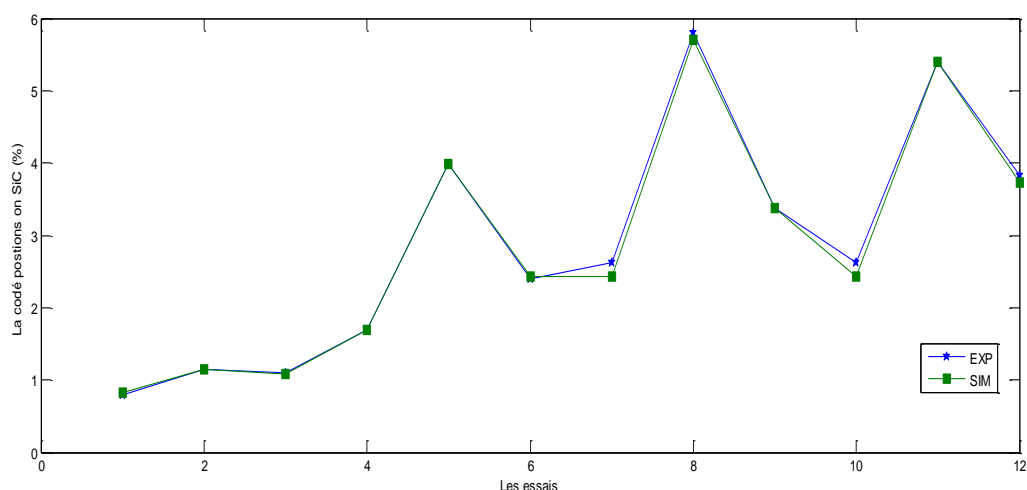


Figure III.33 Les courbes des résultats expérimentaux et de simulation de la codé-position de SiC.

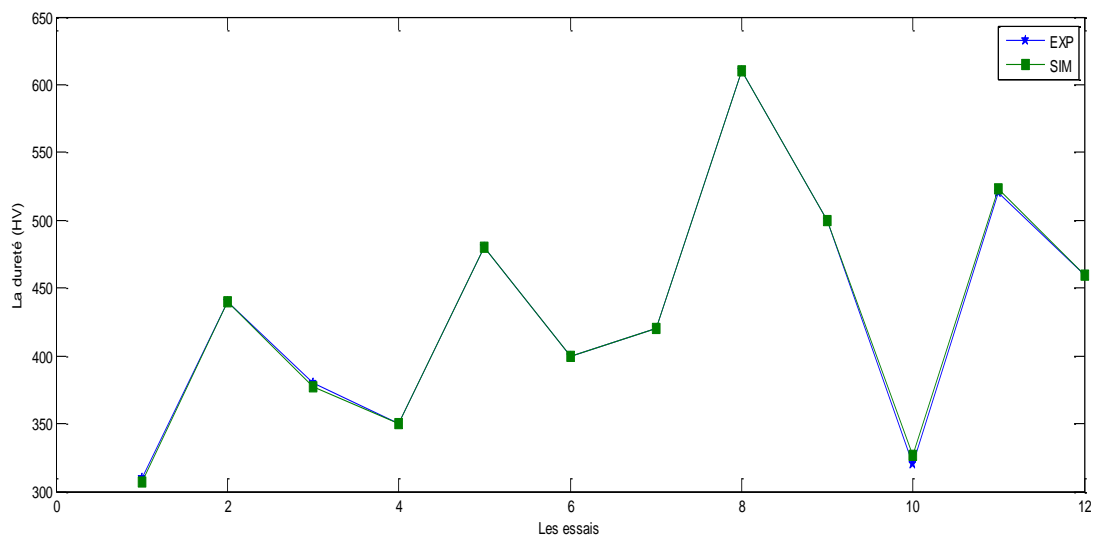


Figure III.34 les courbes des résultats expérimentaux et de simulation de micro dureté.

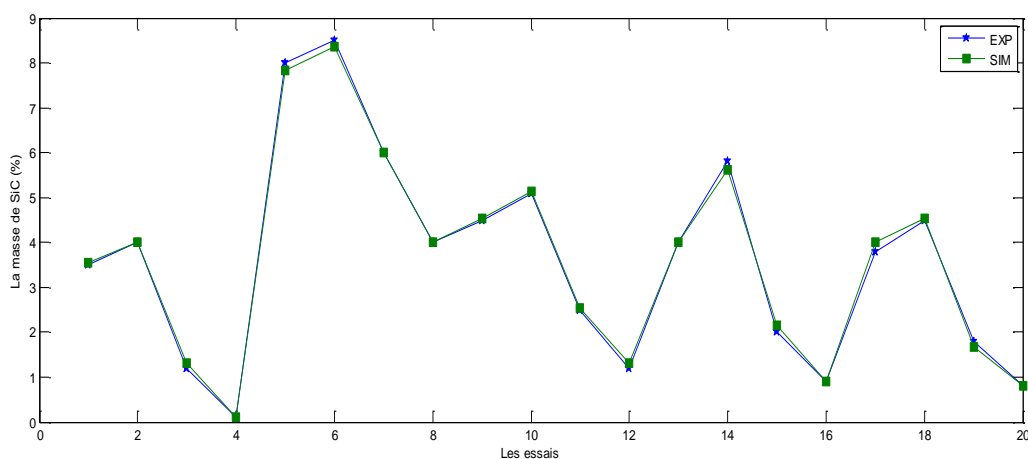


Figure III.35 Les courbes des résultats expérimentaux et de simulation de masse de SiC.

Les figures ci-dessus (III.33, III.34, III.35) indiquent une corrélation très étroite entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites floues.

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 et les valeurs prédites du modèle flou sont indiquées dans les tableaux III.7 et III.8.

Les tableaux III.7 et III.8 montrent également que la précision du modèle flou était de 99.6232% pour la dureté, de 97.90301% pour la codé-position de SiC et de

97.09534% pour la masse de SiC. Le pourcentage de précision montre que le modèle proposé peut être utilisé avec succès pour prédire la dureté, la codé-position de SiC et la masse de SiC des revêtements composites Ni-SiC.

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

III.6 Conclusion

L'étude que nous avons réalisée dans ce chapitre nous a conduit de conclure que : la concentration en SiC, la vitesse d'agitation et la densité du courant constituent les paramètres principaux qui conditionnent les qualités du dépôts sur micro dureté et la résistance à la corrosion.

Conclusion générale

Conclusion Générale

La prédiction de la résistance à la corrosion et la dureté du revêtement composites Ni-SiC a été étudiée à des paramètres d'électrodépositions, les paramètres de cette étude comprennent ; la concentration en SiC, la densité du courant, la vitesse d'agitation.

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

- Le carbure de silicium est un composé chimique de formule SiC. C'est une céramique réfractaire ultra-dure semi-conductrice synthétique qui, ajouté aux bains d'électrodéposition de nickel chloruré, a tendance à diminuer la corrosion des dépôts résultants.
- La concentration en SiC, la vitesse d'agitation et la densité du courant constituent les paramètres principaux qui conditionnent les qualités du dépôt Ni-SiC. Ils sont indissociables l'un de l'autre.
- Le modèle flou utilisé, pour la prédiction de la résistance à la corrosion des revêtements composites Ni-SiC, ont montré une bonne concordance entre les résultats de simulations et les résultats expérimentaux.

Bibliographic

Bibliographic

- [1]. **V. George Chilingar, R. Mourhatch, G. Al-Qahtani**, “The Fundamentals of Corrosion and Scaling for Petroleum and Environmental Engineers”, Houston, Texas, (2008).
- [2]. **H. Bensaada**, Corrosion et Protection des Métaux, cours 1ère Année Master : Génie des Matériaux, Université de Jijel, 2016.
- [3]. **S. Saadoune**, Synthèse et Caractérisation D'inhibiteurs bi- Fonctionnels : Application à la Corrosion des Aciers de Construction, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2010.
- [4]. **D. Landolt**, Traité des Matériaux, Corrosion et Chimie de Surfaces des Métaux, 1ère Edition, CH-1015 Lausanne 1993.
- [5]. **D. William, Jr. Callister**, Science et Génie des Matériaux, Modulo Editeur, 2001, pp 505-520.
- [6]. **I. Kir**, Étude de L'influence du Traitement Thermique sur la Dissolution Anodique d'un Acier au Carbone en Milieu Aqueux, Mémoire de Master, Université d'el oued, 2014.
- [7]. **I. Rezgui**, Détermination de Paramètre Optimums des Dépôts Composites Ni-Al₂O₃ pour une Amélioration de la Résistance à la Corrosion, Thèse Doctorat, Université Hadj Lakhder Batna, 2010.
- [8]. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux>.
- [9]. **A. Mekkaoui**, Élaboration et Caractérisation des Revêtements de Nickel Déposés Par Voie Electrochimique, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [10]. **M. Bouaoud**, Tenue à la Corrosion en Milieu Acide d'un Dépôt de Zn Sn sur Acier Inoxydable, Mémoire de Magistère, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2014.
- [11]. **C. Céline**, Intégration de Microcapteurs Electrochimiques en Technologies "Silicium et Polymères" pour l'étude du Stress Oxydant. Application à la Biochimie Cutanée, Thèse Doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [12]. **T. Borkar**, Electrodeposition of Nickel Composite Coatings, Bachelor of Engineering in Mechanical Engineering Mumbai University, 2007.

-
- [13]. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/8301/4/CHAPITRE2.pdf>
- [14]. **M. Ider**, Etude des Systèmes Flous type-2: Application à la Commande des Systèmes non Linéaires, Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2006.
- [15]. <http://thesis.univ-biskra.dz/1151/5/3emechapitre.pdf>.
- [16]. **M. Diab**, Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base D'Algorithmes Génétiques, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [17]. **M. Arbaoui, A.Tebib**, Surveillance de la Température de Coupe Pendant le Tournage de l'Acier AISI 1060 en Utilisant la Logique Floue, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [18]. **M.Sayah**, Prédiction du Contournement d'une Chaîne D'isolateur MT 175 CTV-Sonelgaz Polluée Artificiellement par la Logique Floue, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [19]. **Y. Hachem, M. Guendouz**, Prédiction de la Rugosité des Surfaces Usinées lors du Fraisage de l'Acier AISI 1060 en Utilisant la Logique Floue, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2018.
- [20]. **A. Bounemour**, Commande Adaptative Floue Des Systèmes Non Linéaires, Mémoire de Magister, Université Constantine1, 2014.
- [21]. **N. Kherbouche, D.Tamendjari**, Contrôle D'une Génératrice Asynchrone Par La logique Floue, Mémoire de Master, Université A. Mira-Bejaia, 2015.
- [22]. **Y. Benfatma, M. Manaa**, Commande d'un Simulateur d'hélicoptère (TRMS) par une Approche hybride (Neuro-Floue), Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [23]. **A. Mesai, N. Kais**, Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation – Apport des Techniques de l'intelligence artificielle, Mémoire de Master, Université Djillali liabes De Sidi- Bel -Abbes, 2017.
- [24]. **F.Harrouche**, Application De La Logique Floue Aux Machines Tournantes, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif.
- [25]. **Z. Zouaoui**, Commande des Convertisseurs Statiques DC/DC Par la logique floue Mémoire de Magister, Université De Batna, 2007.
- [26]. **N. Khengaoui, N. Khengaoui**, Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.

- [27]. **Ö.Serkan, et al**, Electrodeposited Ni/SiC nanocomposite coatings and evaluation of wear and corrosion properties, *Surface & Coatings Technology* 232 p 734–741, 2013.
- [28]. **M.R. Vaezi, et al**, Electrodeposition of Ni–SiC nano-Composite Coatings and Evaluation of Wear and Corrosion Resistance and Electroplating Characteristics, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 315p 176–182, 2008.

Résumé

Le revêtement composite Ni-SiC électrodéposé est le revêtement d'ingénierie le plus largement utilisé. Le revêtement Ni-SiC est doté d'une résistance à la corrosion plus élevées par rapport au nickel ordinaire.

Dans cette étude, nous avons utilisé la technique de la logique floue pour prédire la résistance à la corrosion et la dureté de dépôts composites Ni-SiC, obtenus à partir des bains d'électrodéposition. Les paramètres d'élaboration des revêtements pris en compte pour cette étude de la résistance à la corrosion de ces revêtements sont : la concentration en SiC, la densité du courant et la vitesse d'agitation. Les valeurs prédites, avec ce modèle flou, sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec un pourcentage d'erreur moyen de 0,3768 % pour le calcul la dureté et de 2,09699 % pour le calcul la codé-position de SiC.

Mots clés : logique floue, corrosion, revêtement composite, Ni-SiC.

Summary

The electrodeposited Ni-SiC composite coating is the most widely used engineering coating. Ni-SiC coating has a higher corrosion resistance than ordinary nickel.

In this study, we used the fuzzy logic technique to predict the corrosion resistance and hardness of Ni-SiC composite deposits obtained from electroplating baths. The coating development parameters taken into account for this study of the corrosion resistance of these coatings are: The SiC concentration, the current density and the stirring speed. The predicted values, with this fuzzy model, are in good agreement with the experimental values, with an average error percentage of 0.3768% for hardness calculation and 2.09699% for SiC code-position calculation.

Key words: fuzzy logic, corrosion, composite coating, Ni-SiC.

ملخص

الطلاء المركب Ni-SiC بالكهرباء هو طلاء هندسي الأكثر استخدام و يتميز بمقاومة عالية للتآكل مقارنة بالنيكل العادي . في هذه الدراسة ، استخدمنا تقنية المنطق الضبابي للتنبؤ بمقاومة التآكل وصلابة رواسب مركب Ni-SiC التي تم الحصول عليها من حمامات الطلاء الكهربائي. المعطيات اللازمة لتطوير الطلاء تم أخذها بعين الاعتبار في هذه الدراسة لمقاومة التآكل لهذه الطلاءات هي: تركيز SiC ، الكثافة الحالية وسرعة التحريك. إن القيم المتوقعة لهذا النموذج الضبابي ، تتفق جيداً مع القيم التجريبية ، مع معدل متوسط خطأ قيمته 0.3768% من أجل حساب الصلابة و 2.09699% من أجل حساب توضع SiC.

الكلمات المفتاحية: المنطق الضبابي ، التآكل ، الطلاء المركب، Ni-SiC.