

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Chimie Industrielle



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الكيمياء الصناعية

Mémoire présentée en vue de l'obtention
du diplôme de Master en : Génie des Procédés

Option : Génie Chimique

Titre :

*CO-DEPOSITION DES DEPOTS COMPOSITES Ni / Mo EN PRESENCE
D'UN ADDITIF ORGANIQUE.*

Présenté par :

HENNI ABDERRAHIM

Devant le jury composé de :

Président : Mr. LAIADI DJEMOUI

Examineur : M^{eme} DHIAFI MALIKA

Encadreur : Dr. BENTEMMAM EL HACHEMI.

Promotion Juin 2015

REMERCIEMENTS

Premièrement, je remercie **ALLAH** le tout puissant de m'avoir la volonté et le courage pour réaliser mon mémoire.

La grand merci à mon encadreur **Dr. ELHACHEMI BENTEMMAM** pour d'abord proposé ce thème, pour le suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire, et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils et remarques.

Je tiens à remercier vivement toutes les personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire et spécifiquement Monsieur **EL HACHEMI GUETTEF** et à tous ceux qui nous ont aidé, de près ou de loin, à accomplir ce travail.

Je remercie **Mr. DJEMOI LAIADHI** pour l'attention qu'il a manifesté à ce travail et de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Je souhaite également remercier **M^{eme} DIAFI MALIKA** d'avoir accepté d'être les examinateurs de ce modeste travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du **Filière de CHIMIE INDUSTRIELLE** qui ont attribué à ma formation.

Enfin je tiens à exprimer mes reconnaissance à tous mes amis et collègues, pour le soutien moral et matériel

Liste des Figures

Chapitre I : Notion sur la corrosion et les moyens de protection

Fig I. 1 : Corrosion uniforme et corrosion localisée.

Fig I.2: Corrosion galvanique.

Fig I.3: Corrosion par piqûres.

Fig I.4: Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint.

Fig I.5 : Corrosion intergranulaire.

Fig I.6: Types de corrosion sélective.

Fig I.7 .Corrosion érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau.

Fig I.8: Corrosion sous contrainte.

Chapitre II : Traitement de surface et les dépôts électrolytiques

Fig II.1 Principe d'électrolyse.

Fig II.2 Interphase métal – solution.

Fig II.3 Procédé de codéposition électrolytique Ni-Mo.

Chapitre III : Matériaux et Méthodes expérimentales

Fig III.1 Schéma de polisseuse utilisé dans le polissage mécanique.

Fig III.2 Schéma de montage de dégraissage électrolytique.

Fig III.3 Schéma de montage de décapage chimique.

Fig III.4 Schéma de montage d'électrodéposition.

Fig III.5. Microscope électronique à balayage (MEB).

Fig III.7. Montage potentiostatique pour mesures électrochimiques .

Chapitre VI : Résultats et discussion

Fig IV.1. MEB observation des dépôts Ni-Mo en fonction de la densité appliquée (a) 10 A/dm², (b) 15 A/dm², (c) 20 A/dm², (d) 25 A/dm², (e) 30 A/dm².

Fig IV.2. EDS analyses des dépôts Ni-Mo en fonction de la densité appliquée (a) 10 A/dm², (b) 15 A/dm², (c) 20 A/dm², (d) 25 A/dm², (e) 30 A/dm².

Fig IV.3. Influence de la densité du courant appliqué sur la composition des dépôts Ni-Mo.

Fig IV.4. Diffractogramme de rayon X des dépôts composite Ni pure + additif.

Fig IV.5. Diffractogramme de rayon X des dépôts composites Ni-Mo en fonction de la densité du courant appliquée.

Fig IV.6. Diffractogramme de rayon X des dépôts composites (Ni-Mo + additif) en fonction de la densité du courant appliquée.

Fig IV.7. Le taux de corrosion des dépôts électrolytiques Ni-Mo + gomme arabique en fonction de la densité du courant.

Fig IV.8. Courbes de polarisation potentiodynamique des dépôts Ni-Mo en fonction de la densité du courant appliquée dans le milieu 0,6 M NaCl.

Fig IV.9. Courbes de polarisation potentiodynamique des dépôts Ni-Mo + additif en fonction de la densité du courant appliquée dans le milieu 0,6 M NaCl.

Liste de tableaux

Chapitre II : Traitement de surface et les dépôts électrolytiques

Tableau(II.1) Principales caractéristiques physiques et mécaniques du nickel.

Chapitre III : Matériaux et Méthodes expérimentales

Tableau(III.1) Les compositions du bain de nickelage pur.

Tableau(III.2) Les compositions chimiques de bains de nickelage au sulfate

Chapitre VI : Résultats et discussion

Tableau(IV.1) Taux de corrosion des dépôts électrolytiques Ni/Mo par la méthode de la masse perdue.

Tableau(IV.2) Taux de corrosion des dépôts électrolytiques Ni/Mo+ additif par la méthode de la masse perdue.

Tableau(IV.3) Résultats de la polarisation des dépôts électrolytiques Ni-Mo en fonction de la densité du courant appliquée.

Tableau(IV.4) Résultats de la polarisation des dépôts électrolytiques Ni-Mo + additif en fonction de la densité du courant appliquée.

Sommaire

Liste des Figures

Liste de tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Notion sur la corrosion et les moyens de protection

I.1. Introduction	3
I.2. Définition	3
I.3. Processus de corrosion	3
I.3.1 Processus chimique	4
I.3.2 Processus biochimique	4
I.3.3 Processus électrochimique	4
I.4. Différents types de corrosion	5
I.4.1. Corrosion uniforme et corrosion localisée	5
I. 4.2. Corrosion galvanique	5
I. 4.3. Corrosion par piqûres	6
I.4.4. Corrosion caverneuse	7
I. 4.5. Corrosion inter granulaire	7
I.4.6. Corrosion sélective	8
I.4.7. Corrosion érosion	8
I.4.8. Corrosion sous contrainte	8
I.5.Moyens de protection	9
I.5.1 Modification du milieu	9
I.5.1.1 Inhibiteurs de corrosion	9
a) Inhibiteurs anodiques	10
b) Inhibiteurs cathodiques	10
c) Inhibiteurs mixtes	10
d)Domaine d'application	10
I.5.2 Traitement de surface	11
I.5.2.1 Protection électrochimique (active)	11
a) Protection cathodique	11
a).1.Protection cathodique par anode sacrificielle	11
a).2.Protection cathodique par courant imposé	12
b) Protection électrochimique par passivation	12
c)Mécanisme de protection	13
d) Protection anodique	13
e) Protection cathodique passivant	14
I.5.2.2 Protection passive	14
a) Revêtements protecteurs	14
a).1.Revêtements non métalliques	14
a).1.1.Revêtement organiques	14
a).1.1.Classement des revêtements organiques	15

a).1.1.1. Revêtements en bitume	15
a).1.1.2. Revêtements polymériques	15
a).1.1.3. Les peintures et les vernis	15
a)1.2. Mécanisme de protection des métaux	16
a).1.2. Revêtements inorganiques non métalliques	16
a)L'anodisation	16
b) La phosphatation	17
c) La chromatisation	17
d) Emaillage	17
e)La céramique réfractaire	18
a).2.Revêtements chimiques	18
a).2.1. L'oxydation	18
a).2.2. La phosphatation	18
a).3.Revêtements métalliques	18
a).3.1.Classification des revêtements métalliques	19
a).3.2.Procédés d'application des revêtements métalliques	20
a).3.2.1– Immersion dans un bain fondu	20
a).3.2.2. Métallisation par pistolet	21
a).3.2.3. Métallisation sous vide	21
a).3.2.4. Dépôt en phase gazeuse	21
a).3.2.5. Dépôts par réduction chimique	21
a).3.2.6. Dépôt par déplacement	22
a).3.2.7. Dépôt auto catalytique	22
a).3.2.8. Dépôts chimiques	22
a).3.2.9 Dépôts électrolytiques	23

Chapitre II : Traitement de surface et les dépôts électrolytiques

II.1. TRAITEMENT DE SURFACE	24
II.1.1. Introduction	24
II.1.2. Dégraissage	24
II.1.2.1.Dégraissage chimique	24
II.1.2.2. Dégraissage électrolytique	24
II.1.2.3. Paramètres de dégraissage électrolytique	25
II.1.2.3.1. Agitation	25
II.1.2.3.2. Temps de traitement	26
II.1.2.3.3. Concentration du dégraissant	26
II.1.2.3.4. Températures de traitement	26
II.1.2.4. Dégraissage U. V- Ozone	26
II.1.3.Décapage:	26
II.1.3.1. Décapage mécanique	26
II.1.3.2. Décapage chimique	27
II.1.3.3. Décapage électrochimique	27
II.1.4.Polissage	27

II.1.4.1. Le polissage mécanique	27
II.1.4.2. Le polissage chimique	27
II.1.4.3. Le polissage électrochimique	27
II.1.5. Dégazage	28
I.1.6. Lavage, rinçage, séchage	28
II.2. DEPOTS ÉLECTROLYTIQUE	29
II.2.1. Introduction	29
II.2.2. Mécanisme de formation des dépôts électrolytiques	30
II.2.2.1. Transport de Masse	31
II.2.2.1.1. Migration	31
II.2.2.1.2. Convection	31
II.2.2.1.3. Diffusion	31
II.2.2.2. Transfert de charge et intégration au réseau cristallin	32
II.2.2.2.1. Anciennes théories	32
II.2.2.2.2. Théories actuelles	32
II.2.3. Facteurs d'un dépôt électrolytique	33
II.2.3.1. Nature de l'électrolyte	33
II.2.3.2. Agitation de l'électrolyte	33
II.2.3.3. Conductibilité de l'électrolyte	33
II.2.3.4. Le pH du bain	34
II.2.3.5. Température	34
II.2.3.6. Densité de courant	34
II.2.3.7. Concentration	34
II.2.3.8. Métal de base	35
II.2.4. Nickelage électrolytique	35
II.2.4.1. Caractéristiques physico - chimiques du nickel	35
II.2.4.1.1. Propriétés physiques	35
II.2.4.1.2. Propriétés électrochimiques	36
II.2.4.2. Electrolytes de nickelage	37
II.2.4.2.1. Réactions aux électrodes lors du nickelage	37
II.2.5. Propriétés et structure des dépôts	37
II.2.6. Caractéristiques du métal déposé électriquement	38
II.2.7. Théories de Co-déposition	38
II.2.8. Dépôts composites métal –particules	40
II.2.9. Dépôt composites en présence d'additifs	40

Chapitre III : Matériaux et Méthodes expérimentales

III. 1. Introduction	41
III.2. Matériaux	41
III 2.1. Substrat utilisé	41
III..2.2 Plaque de nickel	41
III.3 Préparation de la surface	41

III.3.1. Polissage mécanique	41
III.3.2. Dégraissage électrolytique	42
III.3.3. Décapage chimique	43
III.3.4. Rinçage	43
III.4. Bain de Nickel pur	43
III.5. Bain électrolytique	44
III.6. Electrodéposition de nickel	45
III.7. Caractérisation des dépôts	45
III.7.1. Mesure de l'adhérence de la couche	46
III.7.2. Mesure de l'épaisseur	46
III.7.3. Etude de la tenue à la corrosion	46
III.7.3.1. Méthode de la masse perdue	46
III.7.4. Microscopie électronique à balayage (MEB)	47
III. 7.5. Diffraction des rayons X	48
III.7.6. Méthode de polarisation potentiodynamique	49

Chapitre VI : Résultats et discussion

IV.1 L'adhérence	50
IV.2 Caractérisation de la surface	50
IV.2.1 MEB observation	50
IV.2.2. Analyse par EDS	51
IV.2.3 Diagramme de Rayon X	52
IV.3. Etude de la corrosion	54
A/ Méthode de la masse perdue	54
B/ Méthode de la polarisation potentiodynamique	56

Conclusion

Références

INTRODUCTION GENERALE

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

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

Le cuivre est l'un des matériaux les plus caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, mais qui malheureusement vu sa grande réactivité avec le milieu extérieur se détériore rapidement par attaque corrosive du milieu s'il n'est pas protégé. Son utilisation est surtout dictée par des raisons économiques

Les dépôts nickel / particules solides sont utilisés par différents constructeurs comme revêtements anti-usure ou comme dépôt résistant à l'oxydation à hautes températures.

Le principe de la Co-déposition électrolytique repose sur la possibilité d'incorporer dans des dépôts électrolytiques des particules solides qui sont maintenues en suspension dans le bain électrolytique. Un certain nombre de paramètres sont toutefois imposés au choix de ces particules. Les particules solides les plus utilisées sont : des oxydes, des carbures et des polymères. Les revêtements électrodéposés de Ni-Mo ont de part leur faible coût et la relative simplicité du procédé, de multiples applications industrielles.

Notre étude consiste à étudier l'effet d'additif organique sur l'électrodéposition d'un dépôt composite Ni- Mo sur des substrats de cuivre préalablement traité.

La caractérisation des dépôts obtenus a été étudié : l'adhérence par choc thermique, la tenue à la corrosion (technique de la masse perdue), l'épaisseur, la morphologie par microscope électronique à balayage (MEB) et le rayon X

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres ; le premier chapitre discute les notions sur la corrosion et les moyens de protection.

Traitement de surface et les dépôts électrolytiques sont résumés dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre présente les différentes Matériaux et Méthodes expérimentales utilisées dans ce travail.

Les résultats obtenus ainsi que leur interprétation sont exposés au quatrième chapitre.

Les points importants et les perspectives de cette étude sont soulignés en conclusion.

Chapitre I:

***NOTION SUR LA CORROSION
ET MOYENS DE PROTECTION***

I.1. Introduction:

Corrosion, du latin *corrodere*, signifie ronger, attaquer. La corrosion, au sens large, peut s'exprimer comme la détérioration d'un matériau par le milieu dans lequel il se trouve.

Observé depuis toujours, ce phénomène n'est étudié scientifiquement que depuis 1830. Les progrès de la technique, qui ont amené l'utilisation sans cesse croissante des matériaux, ont entraîné aussi une augmentation grandissante des pertes par corrosion et ont conduit à en chercher les causes et à en trouver les solutions.

Il existe des exemples de corrosion bénéfique, comme celle des matériaux biodégradables utilisés dans la fabrication des emballages. La corrosion sert alors à l'environnement lorsque ces emballages sont laissés dans la nature par insouciance.

On peut considérer la corrosion comme le retour à la forme naturelle d'oxydes, de sulfures ou de carbonates des différents métaux.

La corrosion ne s'étudie pas isolément, car elle fait intervenir plusieurs principes rattachés à la chimie, à l'électrochimie, à la métallurgie, à la physique et à la thermodynamique.

Chacune de ces sciences apporte une définition à un aspect de la corrosion, une explication à ce phénomène, mais aucune ne circonscrit entièrement la corrosion. En effet, ces disciplines ne décrivent qu'une facette de ce phénomène. Elles sont donc toutes nécessaires pour comprendre totalement celui-ci. Ainsi la corrosion est l'affaire de chacune, quelle que soit sa formation [1].

I.2. Définition:

La corrosion est définie comme étant l'attaque des matériaux par des moyens non mécaniques, elle se définit aussi comme étant la dégradation du matériau ou de ses propriétés par interaction chimique avec son environnement. Une autre définition considère que ce phénomène n'est autre que le retour des métaux à leurs états de minerais.

Selon le milieu, la corrosion est dite sèche quand elle apparaît dans les environnements gazeux, elle est dite humide, lorsqu'elle a lieu dans les électrolytes liquides [1,2].

I.3. Processus de corrosion:

Les phénomènes de la corrosion sont régis par des réactions hétérogènes ayant lieu à la surface de séparation métal-milieu ambiant. D'après leurs caractères physico chimiques, les

processus de corrosion peuvent être chimiques, biochimiques ou électrochimique [3].

I.3.1 Processus chimique:

Un tel processus se fait principalement sans échange d'électrons. Mais le plus souvent, les réactions chimiques font intervenir des échanges d'électrons. De ce fait, il est très difficile de distinguer une corrosion chimique d'une corrosion électrochimique.

Cependant, les spécialistes considèrent certains cas de corrosion tels que l'attaque d'un métal par des solutions aqueuses est aussi considérée comme corrosion chimique [4].

I.3.2 Processus biochimique:

Il est généralement spécifique les matériaux entrés tels que les canalisations. Il se résume dans l'attaque de telles structures par certains types de bactéries. Ces dernières utilisent quelques éléments chimiques se trouvant dans le matériau pour leurs transformations métaboliques où secrètent des produits chimiques, de nature agressive et qui attaquent les zones du voisinage [5]

I.3.3 Processus électrochimique:

La corrosion d'un matériau métallique entraîne le passage partiel ou total de celui-ci sous forme d'ions. Deux réactions distinctes interviennent alors sur le métal qui constitue ainsi l'électrode avec des sites anodiques et des sites cathodiques [6].

Les équilibres électrochimiques à l'interface métal/solution où se produisent les transferts d'électrons sont :

La réaction anodique ou réaction d'oxydation :



Et la réaction cathodique ou réaction de réduction :



Ces réactions d'oxydoréduction engendrent un courant anodique d'intensité I_a correspondant à l'oxydation du métal et un courant cathodique, d'intensité I_c correspondant à

la réduction de l'espèce en solution.

A l'équilibre, ces deux intensités de courant sont égales en valeur absolue ($I_a = I_c$), il s'agit de la corrosion naturelle [3].

I.4. Différents types de corrosion:

L'aspect du métal et le mode d'action du milieu déterminant les types et les formes de corrosion. On peut alors distinguer les types de corrosion suivants :

I.4.1. Corrosion uniforme et corrosion localisée:

La figure I.1 représente une réaction relativement uniforme sur toute la surface du métal. On ne distingue pas, les lieux cathodiques et des lieux anodiques. Toute la surface du métal est simultanément cathode et anode, ce type, est appelé corrosion uniforme.

La corrosion localisée est une corrosion qui se déroule dans un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme car on distingue clairement les endroits anodiques et cathodiques.

Pratiquement, la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité de la surface du matériau ou de l'environnement. Elle pose souvent plus de problèmes à l'ingénieur que la corrosion uniforme [1].



Fig I.1 : Corrosion uniforme et corrosion localisée [1].

I. 4.2. Corrosion galvanique:

La présence de deux matériaux métalliques au contact d'un même électrolyte a pour effet de déséquilibrer les potentiels propres de chaque élément dans cet électrolyte, c'est le même principe du couplage galvanique que l'on retrouve dans les nombreuses applications

industrielles (accouplements acier-laiton, assemblage soudés de différentes natures...etc.). La figure (I.2) montre un schéma expliquant la corrosion galvanique [7].



Fig I.2: Corrosion galvanique [1].

I. 4.3. Corrosion par piqûres:

La corrosion par piqûres peut se produire en tout point de la surface d'un acier inoxydable exposée à un milieu chloruré. Elle se caractérise par une dissolution très localisée et très rapide de zones de petites dimensions dépassant rarement 1 à 2 mm. La piqûre peut se produire à température ambiante, mais les risques sont très nettement accrus par une augmentation de température. Ils sont aussi accrus par une augmentation de la teneur en ions Cl^- , par un mauvais état de surface (rayure, amorce d'arc lors du soudage...etc.). La présence d'oxygène accroît également les risques de piqûres. La figure (I.3) suivante représente schéma expliquant la corrosion par piqûres [8].



Fig I.3: Corrosion par piqûres [6].

I.4.4. Corrosion caverneuse:

La corrosion caverneuse est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. On observe une attaque sélective du métal dans les fentes et autres endroits peu accessibles à l'oxygène [1].



Fig.I.4: Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint [7].

I. 4.5. Corrosion inter granulaire:

C'est une attaque sélective aux joints de grains. Souvent, il s'agit de phases qui ont précipité lors d'un traitement thermique [1].

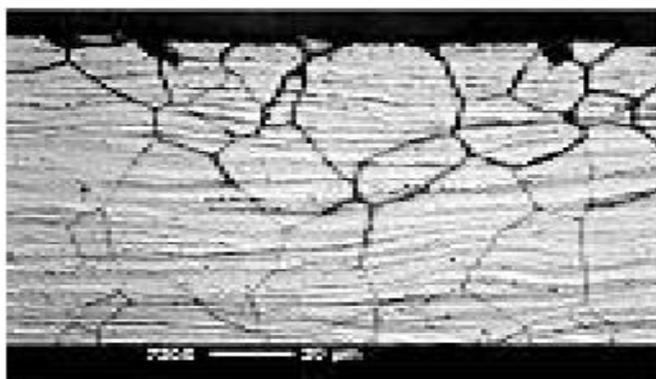


Fig I.5 : Corrosion intergranulaire.

I.4.6. Corrosion sélective:

C'est l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse [1].

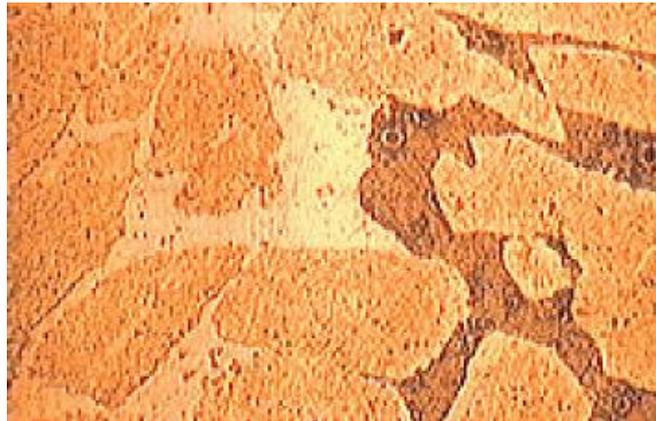


Fig I.6: Types de corrosion sélective [7].

I.4.7. Corrosion érosion:

La corrosion érosion est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide d'un fluide [1].



Fig I.7 .Corrosion érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau [7].

I.4.8. Corrosion sous contrainte:

Par définition, la corrosion sous contrainte est une fissuration du métal, que résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique [1].

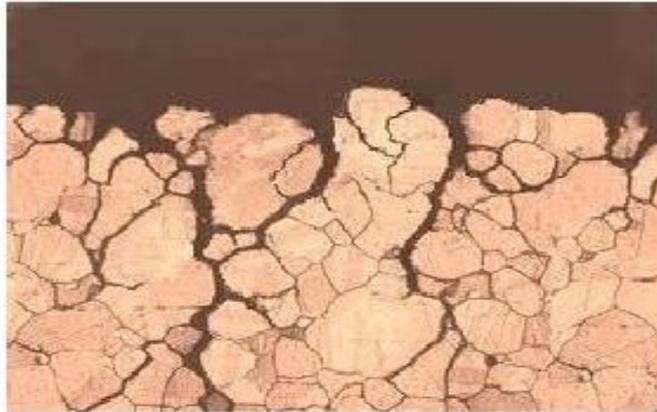


Fig I.8: Corrosion sous contrainte.

I.5. Moyens de protection:

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 en agissant sur l'un ou l'autre des deux partenaires.

I.5.1 Modification du milieu:

En ce qui concerne l'environnement, la plupart du temps impossible de modifier sa nature, seule l'addition en faible quantité d'une substance appelée inhibiteur de corrosion peut être fait [9].

I.5.1.1 Inhibiteurs de corrosion:

Ces sont des Substances chimiques qui, introduites en très petites quantités dans l'électrolyte, diminuent considérablement la vitesse de la réaction de corrosion [9]. Ils sont dits :

- Anodiques quand ils forment sur les anodes des composées insolubles protecteurs,
- Cathodiques quand ils forment sur les cathodes des hydroxydes insolubles,
- Ils peuvent être de caractère mixte.

a) Inhibiteurs anodiques:

Ils ne modifient pas l'apparence du métal, mais un film mince s'y installe. Ils comportent des agents oxydants tels que les chromates et les nitrites, ou d'autres sels comme : les hydroxydes, les silicates, les borates, les phosphates, les carbonates et les benzoates. Ces types d'inhibiteurs nécessitent de l'oxygène.

Lorsque leur teneur en oxygène est insuffisante, les inhibiteurs anodiques peuvent augmenter la corrosion [3].

b) Inhibiteurs cathodiques

Ils réduisent la réaction cathodique en empêchant l'oxygène d'atteindre la surface à protéger. Les sels de magnésium, de zinc et de nickel font partie de ces inhibiteurs. Ces sels diminuent les taux de corrosion de l'acier et du fer.

Les inhibiteurs cathodiques forment un film visible sur le métal mais n'arrêtent pas complètement l'attaque, ils sont donc moins efficaces que les inhibiteurs anodiques [3].

c) Inhibiteurs mixtes

Les inhibiteurs mixtes agissent en même temps sur les surfaces anodiques et cathodiques, ils diminuent la vitesse des deux réactions partielles, mais modifient peu le potentiel de corrosion [1].

d) Domaine d'application

Souvent, on classe les inhibiteurs selon leur domaine d'application.

En milieu aqueux, les inhibiteurs pour milieu acide sont employés, entre autres, pour éviter une attaque chimique de l'acier lors du décapage. Dans l'industrie pétrolière on les ajoute aux fluides de forage. Les inhibiteurs pour milieu neutre servent surtout à protéger les circuits d'eau de refroidissement.

Les inhibiteurs pour phase gazeuse sont généralement employés pour une protection temporaire de différents objets emballés pendant le transport et le stockage : Instruments de précision, composants électroniques, machines, etc [1].

I.5.2 Traitement de surface:

Si on choisit le métal comme paramètre sur lequel on doit agir pour minimiser le processus de corrosion, plusieurs choix se présentent :

I.5.2.1 Protection électrochimique (active):

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) Protection cathodique

La protection cathodique se définit comme une méthode de protection où les surfaces anodiques sont rendues cathodiques et où le métal est déplacé dans sa zone d'immunité [9]. Deux méthodes sont utilisées pour rendre un ouvrage cathodique par rapport à une anode extérieure :

- L'anode sacrificielle appelée encore anode réactive,
- Le soutirage de courant ou dispositif à courant imposé.

a).1. Protection cathodique par anode sacrificielle

On couple électrochimiquement le métal à protéger de potentiel d'équilibre E_1 , à un métal plus facilement oxydable de potentiel d'équilibre E_2 de sorte que $E_1 > E_2$.

Le système par anode sacrificielle utilise en fait les propriétés électrochimiques intrinsèques des métaux. Il fonctionne en utilisant une anode connectée à la structure.

L'anode est faite d'un métal moins noble que celui de la structure à protéger. Ceci se traduit par le fait que le métal le moins noble se consomme en déchargeant du courant assurant ainsi la protection cathodique de la structure [1].

a).2. Protection cathodique par courant imposé

Le système à courant imposé fonctionne en utilisant des anodes constituées d'alliages de métaux nobles, assurant ainsi une longévité du système, et d'un redresseur de courant alimenté par une source de courant alternatif. Par l'intermédiaire de ce dernier, un voltage est appliqué à la structure à protéger, ce qui génère une différence de potentiel entre l'anode et la structure à protéger. On ajuste la tension générée de telle sorte que l'intensité de l'énergie de protection soit supérieure à celle de la corrosion.

Techniquement cela se traduit par la polarisation de la structure. La structure à protéger se trouve portée à un potentiel électrochimique qui inverse le processus de corrosion.

Dans ces conditions, l'oxydation anodique du métal ne peut se produire et le métal se voit ainsi protéger contre la corrosion.

La tension est fixée à une valeur telle que le potentiel du métal à protéger correspond au domaine d'immunité du métal [1].

L'application de la protection cathodique comme moyen de lutte contre la corrosion est utilisée pour des structures dont les surfaces à protéger baignent dans un milieu conducteur, comme le sol, le béton, l'eau ou toutes autres substances conductrices [1].

b) Protection électrochimique par passivation:

La passivation est une suspension des réactions pour certaines conditions du milieu.

Les métaux passifs possèdent en surface une couche mince d'oxyde, le film passif, qui sépare le milieu de l'électrolyte contrairement aux métaux actifs, qui conservent un contact direct avec la solution. La plupart des métaux et des alliages résistant bien à la corrosion sont à l'état passif : acier inoxydables, alliages spéciaux à base de nickel et de chrome, aluminium, etc [10].

La passivation d'un métal n'a lieu que si son potentiel dépasse la potentiel de passivation : $E > E_p$

On peut atteindre cette condition de deux façons :

- Par polarisation anodique (passivation imposée) ;
- Par réaction d'un oxydant (passivation spontanée).

Dans un milieu peu oxydant, le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif, $E_{\text{corr}} < E_p$. Pour passiver le métal, il faut lui imposer un potentiel anodique $E > E_p$, en le branchant comme anode dans une cellule électrochimique.

Ce mode de passivation est appelé passivation imposée ou passivation anodique. Dans ce cas, le métal perd généralement sa passivité dès qu'on déclenche le circuit électrique

Dans un milieu oxydant (b) l'oxydant provoque une passivation spontanée, ou passivation chimique du métal, dès qu'on l'immerge dans l'électrolyte. Le potentiel de corrosion se situe alors dans le domaine passif : $E_p < E_{\text{corr}} < E_b$ [1].

c) Mécanisme de protection

Le domaine de passivité stable (domaine passif) s'étend du potentiel de passivation E_p au potentiel de transpassivation (potentiel de piqûre) E_b . La vitesse de dissolution des métaux dans ce domaine de potentiel, pourvu que le milieu ne soit pas trop agressif, est très faible, voire nulle. Pour protéger un métal passivable contre la corrosion il suffit donc de lui imposer un potentiel tel que : $E_p < E < E_b$.

Selon la valeur du potentiel de corrosion E_{corr} , il faut appliquer une polarisation anodique ou cathodique pour satisfaire ces critères [1].

d) Protection anodique

La protection anodique s'applique aux métaux passivables, dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif $E_{\text{corr}} < E_p$. Une polarisation anodique permet dans ce cas de déplacer le potentiel dans le domaine passif. La densité de courant passif i_p , est normalement très faible. Le maintien d'une protection anodique ne nécessite donc que peu de courant, même en l'absence de revêtement organique. En revanche, pour atteindre l'état passif, il faut appliquer une densité de courant nettement plus élevée, car elle doit être supérieure à la densité de courant de passivation i_p [1].

e) Protection cathodique passivant

On peut protéger les métaux passivables dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine transpassif (corrosion par piqûres), par une polarisation cathodique qui déplace leur potentiel vers le domaine de passivité stable : on parle alors de protection cathodique passivant [1].

I.5.2.2 Protection passive:

La structure à protéger est isolée de l'agressivité du milieu corrosif par un revêtement isolant.

a) Revêtements protecteurs

Ces revêtements isolent le matériau de l'électrolyte. Ils peuvent être métalliques, organique et chimiques. [1, 9].

a).1. Revêtements non métalliques

Ils peuvent être organiques ou inorganiques :

a).1.1. Revêtement organiques

Les revêtements organiques sont appliqués sur des matériaux métalliques en vue de certains buts précis. Il s'agit le plus souvent de protéger les matériaux contre la corrosion, mais parfois aussi de leur donner un aspect et une couleur convenable.

D'autres qualités des revêtements peuvent être demandées, comme par exemple le fait d'être conducteur électrique.

Il convient de remarquer que les produits organiques sont stables à des températures inférieures à 150°C et qu'ils ne protègent pas contre la corrosion sèche qui se produit à chaud

Il s'agit essentiellement de corrosion électrochimique.

Par ailleurs, en ce qui concerne la qualité de la protection qu'apporte un revêtement organique, il adhère sur les matériaux métalliques et principalement à cause de la rugosité de

ces derniers. Aussi, ils sont étanches (absence de porosité) non seulement juste après l'application de ces revêtements, mais à terme [1].

a).1.1. Classement des revêtements organiques:

On classe les revêtements organiques pour la protection des métaux contre la corrosion en trois familles .

a).1.1.1. Revêtements en bitume

On utilise ce type de revêtements pour protéger des structures enterrées en acier ou en fonte. Le bitume contient différents hydrocarbures appartenant aux résidus de la distillation du pétrole. L'épaisseur des revêtements en bitume peut atteindre 5 mm. Leur plasticité réduit considérablement les risques d'endommagement mécaniques.

a).1.1.2. Revêtements polymériques

Il existe une grande variété de revêtements polymériques pour la protection des métaux contre la corrosion :

- Les thermoplastes (polyéthylène, polypropylène, PVC, PTFE, etc.)
- Les caoutchoucs (naturels ou synthétiques) ;
- Les thermodurcissables (polyuréthanes, époxydes, polyesters, etc.).

a).1.1.3. Les peintures et les vernis

Ils se distinguent des revêtements polymériques par des couches plus minces et par une mise en œuvre qui, le plus souvent implique l'utilisation d'un véhicule : l'eau ou un solvant organique. Pourtant, il existe des exceptions à cette règle, ainsi, l'application en couches minces de certaines peintures et vernis séchés au four ne nécessite pas de véhicule.

Le rôle des peintures est d'isoler une surface pour la protéger dans un milieu corrosif, sans oublier l'aspect décoratif. Les métaux peints comportent en général plusieurs couches.

L'importance économique des peintures et vernis dépasse de loin celle des autres méthodes de protection contre la corrosion. En effet, la plupart des objets en acier et de nombreux objets d'autres matériaux sont protégés par des peintures et vernis [1].

a)1.2. Mécanisme de protection des métaux

Les peintures protègent un substrat métallique par différents mécanismes :

- Effet barrière ;
- Inhibition des réactions électrochimiques ;
- Suppression des piles de corrosion ;
- Effet électrochimique.

L'importance relative des différents mécanismes dépend de la nature chimique et de l'épaisseur du revêtement, et aussi de la présence ou non de défauts de contamination de surface.

a)1.2. Revêtements inorganiques non métalliques

Parmi les revêtements inorganiques non métalliques, on distingue deux types :

- Les couches de conversion ;
- Les couches étrangères au substrat.
- Les couches de conversion.

Elles sont obtenues par une réaction du métal avec un milieu choisi. Elles contiennent donc toujours des ions provenant du substrat.

On différencie les couches de conversion selon leur procédé de fabrication, à savoir :

L'anodisation : pratiquée surtout sur l'aluminium, consiste à renforcer le film d'oxyde naturel par une oxydation anodique. L'anodisation de l'aluminium sert à des fins décoratives (coloration) et augmente la résistance à la corrosion atmosphérique [11].

Pour réaliser l'anodisation de l'aluminium, on l'immerge dans une solution appropriée, par exemple l'acide sulfurique, et on applique une tension de 15 à 25 V durant 30 à 60 minutes.

La phosphatation : s'applique surtout aux aciers au carbone. Ce procédé renforce l'adhésion des peintures.

On fabrique les couches de phosphate par immersion de l'objet dans une solution acide, qui contient des ions de phosphate, provoquant une corrosion de l'acier.

Des produits de réaction précipitent à la surface, formant ainsi une couche de phosphate.

La chromatisation : s'applique principalement au zinc et à l'aluminium, souvent après un traitement préalable de phosphatation ou d'anodisation, dont elle renforce l'effet. Toutefois, la toxicité des chromates envers l'environnement naturel constitue un inconvénient majeur.

Pour réaliser une chromatisation, on immerge l'objet dans une solution qui contient des ions chromates ou bichromates.

Les couches de chromatisation forment une barrière entre le métal et l'environnement. De plus, les chromates piégés dans le film protègent le substrat par un effet chimique : ils maintiennent des conditions oxydantes et facilitent la passivation du métal dans les pores et les défauts du film.

– Les couches étrangères au substrat. Ce type de couches inclut les revêtements inorganiques non métalliques suivants :

Emallage : les revêtements d'émail, de verre ou de porcelaine sont tous des dépôts de verre à coefficient de dilatation approprié, fondus sur les métaux.

Les dépôts d'émail sont surtout utilisés sur l'acier, mais certains dépôts sont également réalisables sur le cuivre, le laiton et l'aluminium.

En plus de son intérêt décoratif, l'émaillage protège les métaux de base contre la corrosion dans de nombreux milieux. Bien que la présence de pores dans le dépôt soit tolérée lorsque la protection cathodique complète la protection par émaillage, le dépôt doit être parfait et sans aucun défaut pour d'autres applications.

Les dégâts mécaniques ou la rupture par choc thermique constituent les inconvénients principaux des dépôts de verre [3].

Les dépôts peuvent s'appliquer par coulée centrifuge (comme pour l'entretien des canalisations), à la truelle ou par projection. L'épaisseur normale est de 0,5 à 2,5 cm, les dépôts plus épais étant généralement renforcés par du grillage.

Ces dépôts sont utilisés pour protéger les canalisations d'eau en fonte ou en acier contre l'eau ou le sol ou les deux à la fois avec un rendement excellent.

Les inconvénients des dépôts de ciment résident dans le fait qu'ils sont sensibles aux chocs mécaniques ou thermiques [3].

La céramique réfractaire : il existe de nombreux revêtements en céramique réfractaire oxydes, carbures, nitrures, borures, carbone amorphe, diamant, etc. Ils protègent principalement contre l'usure ou contre la corrosion à haute température [1].

a).2. Revêtements chimiques

L'oxydation et la phosphatation électrochimiques et chimiques forment ce type de revêtements.

a).2.1. L'oxydation : c'est l'application d'un film d'oxyde comme protection, (cas de l'anodisation de l'aluminium).

a).2.2. La phosphatation : C'est l'application d'un film protecteur de phosphate améliorant l'adhérence des peintures. Ce film bleu foncé à reflets verts est poreux et fragile. Il se détruit en eau basique et acide [9].

a).3. Revêtements métalliques

Ils sont couramment employés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique.

On les applique aussi sur d'autres substrats comme le cuivre et le laiton, à l'instar des revêtements de chrome sur les robinets d'eau ou les revêtements d'or sur les contacts électriques des circuits imprimés. Les revêtements métalliques, outre leur effet anticorrosion,

remplissent souvent une fonction décorative. On les utilise aussi comme protection contre l'usure [3].

a).3.1. Classification des revêtements métalliques :

Tous les revêtements métalliques préparés sont poreux à un certain degré. En outre, les revêtements ont tendance à être détruits au cours du transport ou de l'utilisation. L'action galvanique à la base d'un pore ou d'une rayure devient donc un facteur important pour déterminer la valeur du revêtement. Selon la nature du couple substrat-revêtement, les revêtements métalliques se divisent en deux groupes [3]:

– Les revêtements nobles : dits aussi cathodiques, comme leur nom l'indique, les revêtements nobles de Ni, Ag, Cu, Pb ou Cr sur l'acier sont nobles dans la classification des potentiels de dissolution par rapport au métal de base. Il est important que les revêtements nobles soient toujours préparés avec un nombre minimum de pores et que de tels pores s'ils doivent exister soient aussi petits que possible pour empêcher l'accès de l'eau jusqu'au métal de base. Ceci implique souvent une augmentation de l'épaisseur du revêtement (figure I.9).

– Les sacrificiels : dits aussi anodiques ou consommables, tels que ceux de Zn ou de Cd, et également dans certains milieux ceux d'aluminium et d'étain sur l'acier. Le courant galvanique à travers l'électrolyte va du revêtement vers le métal de base, ce qui provoque une protection cathodique du métal.

Tant qu'un courant suffisant s'écoule et que le revêtement reste en contact électrique, la corrosion du métal de base ne se produit pas. C'est pourquoi le degré de porosité des revêtements sacrificiels, contrairement à ce qui se passe pour les revêtements nobles, n'a pas une grande importance. Par conséquent, plus le revêtement est épais, plus la protection cathodique est de longue durée (figure I.10).

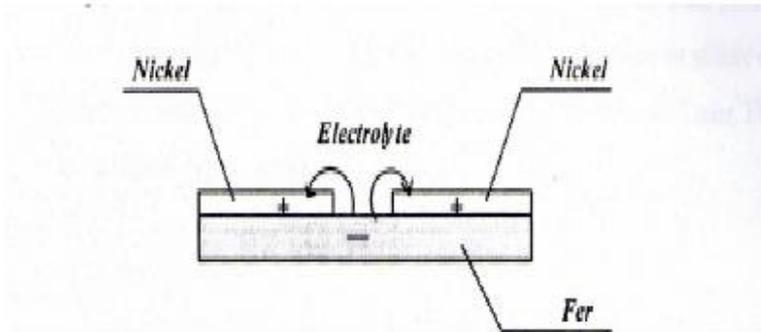


Fig I.9 Revêtement cathodique (cas du nickel sur fer).

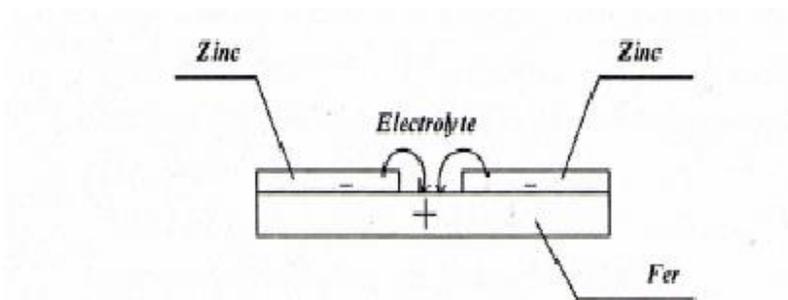


Fig I.10 Revêtement cathodique (cas du zinc sur fer).

a).3.2. Procédés d'application des revêtements métalliques

Les revêtements métalliques peuvent être appliqués de plusieurs façons selon l'épaisseur voulue et les caractéristiques du support [12].

a).3.2.1 Immersion dans un bain fondu

Le métal à protéger est plongé dans un bain de métal protecteur fondu. La couche formée est complexe car des phénomènes de diffusion interviennent.

Cette méthode est utilisée en particulier pour le dépôt de zinc (galvanisation) ou d'étain (étamage).

a).3.2.2. Métallisation par pistolet

Le métal fondu au chalumeau est projeté en fines gouttelettes sur la structure à protéger. Les revêtements présentent un aspect granuleux et ils sont très poreux, de plus, les pertes résultant de la pulvérisation peuvent être importantes (50%).

Pour obtenir une bonne protection, le métal de base doit être décapé par sablage et le dépôt doit atteindre plusieurs dixièmes de millimètre d'épaisseur. Cette méthode est d'un emploi assez simple. Elle peut être utilisée pour projeter de nombreux métaux comme le zinc, l'aluminium, le plomb, le nickel, le cuivre et même des alliages comme l'acier inoxydable.

a).3.2.3. Métallisation sous vide

Il s'agit d'un revêtement obtenu par vaporisation sous vide d'un métal porté à haute température par chauffage électrique d'un support. Cette technique est utilisée en optique et en électronique, et par exemple pour déposer de l'aluminium sur l'acier. Elle n'est pas utilisée en anticorrosion.

a).3.2.4. Dépôt en phase gazeuse

La pièce à revêtir est portée à une température légèrement supérieure à celle qui correspond à la décomposition ou à la réduction du composé métallique gazeux.

Le dépôt est effectué sous pression réduite du composé. Son épaisseur peut être très grande, plusieurs dixièmes de mm. Cette méthode est utilisée en anticorrosion pour la protection des pièces de forme complexe.

La métallisation sous vide et le dépôt en phase gazeuse peuvent être utilisés pour revêtir des pièces non métalliques, par exemple, des réfractaires.

a).3.2.5. Dépôts par réduction chimique

Les revêtements métalliques, homogènes en épaisseur, sont obtenus sur des pièces de formes diverses, sans source de courant extérieur et grâce à l'ionisation du métal qui sert de substrat (dépôt par déplacement) ou l'oxydation d'une espèce en solution (dépôt chimique auto catalytique).

a).3.2.6. Dépôt par déplacement :

Les épaisseurs déposées sont faibles (< 0,2 mm) et seuls les revêtements sur des substrats moins nobles sont possibles. Cette technique est utilisée dans certaines gammes opératoires de traitement de surface (nickelage avant émaillage de l'acier, zingage ou étamage de l'aluminium avant dépôt électrolytique).

a).3.2.7. Dépôt auto catalytique :

Très utilisé pour les couches de nickel, l'agent réducteur est soit de l'hypophosphite, soit un dérivé du bore (borohydrure ou amine-borane).

Le dépôt est en fait un alliage Ni-P (7 à 12 % de P) ou Ni-B (1 à 6 % de B). Un traitement thermique permet d'augmenter la dureté du revêtement. Après activation de la surface par un catalyseur puissant (palladium), on peut réaliser des dépôts chimiques sur supports isolants (cuivrage des matières plastiques); dorure et dépôt de palladium sont souvent effectués.

a).3.2.8. Dépôts chimiques

Ce procédé consiste à mettre en contact un composé volatil du matériau à déposer (halogénure, organométallique...etc.) soit avec la surface à recouvrir, soit avec un autre gaz au voisinage de cette surface, de façon à provoquer une réaction chimique donnant au moins un produit solide. La température, souvent élevée dans ce procédé, favorise la diffusion; elle entraîne une modification des produits de la réaction et une bonne adhérence du revêtement, mais induit parfois une porosité gênante. De nombreux matériaux (métaux, alliages, composés intermétalliques tels que carbures, borures, oxydes...etc.) peuvent être déposés sur des substrats divers en épaisseurs importantes.

Des revêtements de Cr (chromisation), Al (aluminisation ou calorisation), Si (siliciuration), B (boruration), etc., sont couramment réalisés par ce procédé, par ailleurs également très utilisé dans l'industrie de la micro-électronique.

L'utilisation de dépôt à basse pression ou de dépôt assisté par plasma permet d'améliorer la qualité des revêtements et le rendement de ce procédé.

a).3.2.9 Dépôts électrolytiques

Réalisés généralement en solution aqueuse et plus rarement en solution organique ou en bain de sels fondus, ces dépôts s'effectuent en plaçant la pièce à recouvrir en situation de cathode dans un électrolyte contenant, sous forme de sels simples ou complexes, les ions du métal à déposer. La réaction s'effectue plus ou moins facilement selon la stabilité de l'ion et sa mobilité. L'adhérence du dépôt est souvent bonne mais dépend beaucoup de la qualité de la préparation préalable de la surface.

Diverses solutions électrolytiques sont utilisées et mises au point plus ou moins empiriquement pour chaque type de métal ou d'alliage à déposer. Chacune a pour objet d'obtenir des caractéristiques particulières du dépôt (pureté, brillance, adhérence, action nivelant, contraintes déterminées, dureté, finesse de grain, porosité, rendement, présence contrôlée d'inclusions d'oxydes ou de carbures, etc.). De nombreux métaux (Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Sn, métaux nobles...) ou alliages (base Cu, Ni, Sn...etc.) peuvent être déposés en épaisseurs comprises entre (1 μm) et quelques millimètres.

Chapitre II :

***TRAITEMENT DE SURFACE ET
LES DEPOTS ELYCTROLYTIQUES***

II.1. Traitement de surface :

II.1.1. Introduction:

La préparation des surfaces des pièces à revêtir est une étape importante qui d'amélioré la qualité du revêtement (adhérence, recouvrement et uniformité).

Dans cette partie en présentera les étapes de préparation du surface (dégraissage ; décapage ; polissage ;...). Étapes nécessaires avant tout dépôt. Puis en passera à l'élaboration des dépôts composites Ni/Mo.

II.1.2. Dégraissage :

Cette technique est évidemment utilisée pour éliminer les corps gras, graisses animales et végétales saponifiables ou huile minérale non gras qui souillant la surface. Très et « trop » souvent, c'est la seule méthode de traitement de la surface avant tout revêtement.

Le dégraissage peut être soit chimique, soit électrolytique.

II.1.2.1. Dégraissage chimique

Il est très souvent utilisé, mais pour qu'il s'avère efficace, il doit être parfaitement adapté au matériau à dégraisser, car son rôle n'est pas uniquement de nettoyer la surface, mais aussi de la conditionner au traitement ultérieur.

Les produits dégraissant couramment utilisés peuvent être classés en deux catégories. D'une part, les dégraissants à base de solvants organiques (trichloréthylène, perchloréthylène, benzène,...) qui assurent un prédégraissage de la surface par solubilisation des matières grasses, plus spécialement les huiles minérales non saponifiables. D'autre part, des solutions alcalines de pH 7 à 14 (soude, carbonate de soude ...) qui enlèvent la salissure (graisses animales saponifiables) suivant un processus plus complexe. Le choix du dégraissant dépend essentiellement de la nature de la salissure et du matériau. Après un dégraissage, il faut éliminer tous les produits et ceux formés lors des réactions. Cette étape est très importante, car il n'est pas toujours facile d'éliminer ces produits comme par exemple les composés colloïdaux hydrophiles. Aussi, les conséquences d'un mauvais dégraissage peuvent être plus catastrophiques que celles de la pollution initiale.

II.1.2.2. Dégraissage électrolytique

La différence principale avec le dégraissage chimique réside dans le fait que la solution aqueuse de dégraissage est utilisée comme électrolyte dans une cellule où les pièces à dégraisser sont placées soit en position d'anode, soit en position de cathode. Au niveau de ces électrodes, il se produit un dégagement gazeux, oxygène à l'anode et l'hydrogène à la cathode.

Ces dégagement, générateurs d'une agitation locale, associés aux propriétés dégraissantes du bain, assure un excellent nettoyage de la surface et des microfissures sous-jacentes.

Cette technique donne de très bons résultats, cependant certains effets secondaires sont parfois néfastes (formation d'oxydes à l'anode, attaque du métal par la solution basique à la cathode, fragilisation du substrat par hydrogène, redéposition d'impuretés à partir de bain pollué).

Pour pallier ces inconvénients, il existe des systèmes qui permettent d'alterner périodiquement les polarités des pièces à dégraisser. Les principaux produits alcalins utilisés sont là encore, la soude caustique, les carbonates, les phosphates et divers silicates, etc.

Le choix du bain, comme pour le décapage chimique, est lié à la nature du substrat à nettoyer.

II.1.2.3. Paramètres de dégraissage électrolytique

II.1.2.3.1. Agitation :

Les forces mécaniques sont très importantes dans le dégraissage où elles interviennent à tous les stades pour mettre le métal continuellement en contact avec de la solution fraîche, arracher les salissures, enfin les maintenir dispersées. Elles sont donc été l'objet d'études approfondies qui ont permis à Bacon et Smith d'aboutir à la relation suivante:

$$S = k(CFT)^n$$

Avec, S : efficacité du dégraissage (pourcentage de souillure éliminée), K : constante, C : concentration du détergent, F : force mécanique, T : temps: exposant compris entre 0 et 1.Elle montre que l'efficacité du dégraissage S est une fonction croissante de F. Pratiquement, l'agitation permet de différencier très nettement les différents modes d'application du dégraissant : immersion, aspersion, lance haute pression [13].

II.1.2.3.2. Temps de traitement :

Dans la pratique, celui-ci est souvent imposé par la cadence de l'installation déjà existences. Il est de quelques secondes à quelques minutes en aspersion et de quelques dizaines de minutes en immersion.

II.1.2.3.3. Concentration du dégraissant :

Elle dépend essentiellement du type de traitement est de l'ordre de 5 à 10 g/ l pour l'aspersion, il faut monter de 20 à 100g/l pour l'immersion, de manière à compenser le manque d'effet mécanique.

II.1.2.3.4. Températures de traitement :

Une température élevée est encore actuellement un atout appréciable de la détergence ; si l'abaissement de tension interfaciale qu'elle procure est négligeable devant le pouvoir des tensions actives, elle accélère les réactions de saponification et surtout elle ramollit les huiles épaisses et visqueuses ainsi que les cires et les graisses qui, sans cet effet, seraient très difficiles à retirer de la surface.

II.1.2.4. Dégraissage U. V- Ozone:

Il est aussi possible de supprimer certains contaminants organiques par l'action combinée du rayonnement ultraviolet et de l'ozone. Cette action combinée permet la rupture des liaisons organiques et contribue à leur oxydation sous forme d'eau et de dioxyde de carbone.

Ces produits formés sont plus facilement éliminés par la suite.

II.1.3. Décapage:

II.1.3.1. Décapage mécanique:

Il permet d'éliminer les couches adhérentes de produits de corrosion, de calamines et, plus généralement, d'oxydes ou de revêtements protecteurs anciens mais dégradés. Les vocables spécifiques de décalaminage, dérochage, dé passivation, désoxydation, dérouillage, avivage, activation, sont souvent utilisés en pratique industrielle.

Le décapage mécanique, réalisé par brossage, grattage, sablage, grenailage, microbillage... s'effectue soit à sec, soit en phase humide (sablage humide). Dans ce dernier cas, un agent passivant est ajouté à l'eau afin de « freiner » la réactivité de l'atmosphère environnante avec la surface fraîchement mise à nu.

II.1.3.2. Décapage chimique

Par dissolution des couches adhérentes sur la surface et/ou du substrat sous-jacent, le décapage chimique conduit au même résultat que le décapage mécanique. On utilise un bain acide pour les pièces en acier ou en titane et un bain alcalin pour les pièces en alliages d'aluminium.

Les bains acides contiennent souvent des adjuvants tensioactifs et des inhibiteurs, dits bloquants, qui évitent l'attaque excessive du substrat lorsque la surface est partiellement et localement décapée.

II.1.3.3. Décapage électrochimique

Dans le bain, généralement acide, la pièce est placée en situation d'anode. En plus de l'effet mécanique favorable du dégagement gazeux, ce procédé permet un meilleur contrôle des conditions de décapage et un gain de productivité [14].

II.1.4. Polissage

II.1.4.1. Le polissage mécanique

Le polissage mécanique est utilisé soit comme « prétraitement », pour éliminer les imperfections géométriques de la surface (rugosité), soit en finition pour lui conférer un aspect ou un « brillant » particulier. Il se réalise en plusieurs étapes successives : tout d'abord avec un abrasif grossier (par exemple carbure de silicium) de granulométrie décroissante, puis

avec un abrasif fin (alumine en suspension aqueuse, pâte diamantée...). Il se pratique avec des meules, des brosses, des tampons ou sur bandes abrasives, sur feutres ou sur tissus.

Le polissage « **en vrac** », au tonneau, est très utilisé pour des charges constituées de très nombreuses petites pièces.

II.1.4.2. Le polissage chimique

Le polissage chimique correspond à une attaque chimique contrôlée de la surface par une solution dont la composition dépend du matériau à polir (par exemple pour l'acier peu allié : solution aqueuse d'acide oxalique et d'eau oxygénée).

II.1.4.3. Le polissage électrochimique

Pour le polissage électrochimique, la pièce constitue l'anode et les paramètres opératoires (composition de l'électrolyte, température et agitation du bain, conditions et durée de polarisation...) sont choisis pour conduire à une dissolution préférentielle des aspérités et donc à une surface plane, sans ondulation.

Il convient de signaler que les procédés de polissage, tout particulièrement le polissage mécanique, «perturbent» la surface et peuvent induire des transformations structurales ou des modifications mécaniques locales.

Une **restauration physico-chimique**, par un traitement thermique, est parfois nécessaire pour diminuer par exemple le niveau de contraintes en surface.

Dans le cas du polissage électrochimique et surtout chimique, un post- traitement de **dégazage** et thermique est souvent recommandé [15].

II.1.5. Dégazage

Tout traitement en bain alcalin et surtout acide est susceptible d'entraîner l'adsorption d'atomes d'hydrogène sur la surface et leur absorption, puis leur diffusion rapide (sous forme protonique) dans la structure, pouvant conduire alors à divers modes de fragilisation par l'hydrogène, dont la sévérité dépend de la « susceptibilité » du matériau traité et des conditions de chargement. Un dégazage par étuvage, de préférence sous vide, immédiatement après le traitement, permet d'éviter cette détérioration d'ordre mécanique. Cette opération est nécessaire aussi, lors de la réalisation d'un dépôt sous vide, mais cette fois avant traitement, pour supprimer tout risque de dégazage non contrôlé : la désorption trop brutale des divers gaz

adsorbés sur la surface pouvant entraîner le décollement du revêtement [15].

I.1.6. Lavage, rinçage, séchage

Les opérations de **lavage et de rinçage** permettent d'éliminer les contaminations peu adhérentes.

Elles sont particulièrement nécessaires dans le cas des dépôts et des traitements par voie humide, ces derniers comportant généralement plusieurs étapes successives d'immersion dans des bains différents.

Entre chaque étape, le lavage et le(s) rinçage(s) devront être effectués avec soin afin d'éviter le transport de matière entre chaque bain, les quantités de sels ou molécules organiques piégées par capillarité pouvant nuire à la durabilité du bain suivant et ainsi à la qualité du traitement.

Par ailleurs, de nombreux traitements nécessitent un support « sec ». Il s'agit là d'une notion toute relative, lorsqu'on sait que les dernières molécules d'eau adsorbées sur une surface sont difficiles à éliminer, même à des températures bien supérieures à 100°C.

Un séchage à l'air pulsé, sec et chaud (entre 110 et 150°C), pendant 5 minutes est souvent recommandé. Des précautions doivent être prises dans le cas d'air comprimé, car le compresseur peut entraîner une contamination de l'air par de très fines gouttelettes d'huile [15].

II.2.DEPOTS ELYCTROLYTIQUE :

II.2.1. Introduction:

L'électrolyse est utilisée pour déposer une ou plusieurs couches métalliques sur une surface de métal.

Le principe de réalisation d'un dépôt électrolytique est simple : la pièce à recouvrir est placée dans un bac à électrolyse pour jouer le rôle d'une cathode sur laquelle viennent se déposer des ions métalliques (figure II.1).

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 et cela, aussi bien en ce qui concerne sa structure que ses propriétés [16].

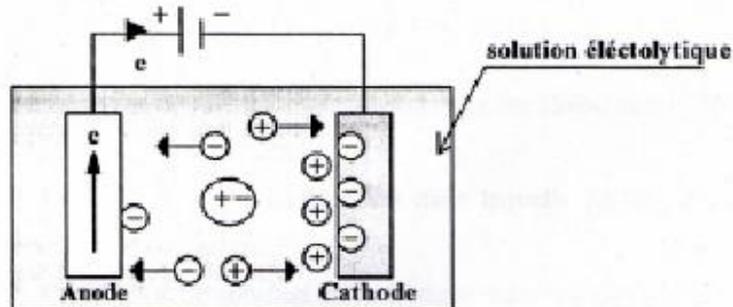


Fig II.1 Principe d'électrolyse.

Cette opération a pour but de conférer au métal certaines propriétés de surface [16], dont:

- Résistance à la corrosion.
- Aspect (mat, semi-brillant, brillant, satiné,...).
- Propriétés optiques.
- Soudabilité.
- Conductibilité, résistance de contact.
- Dureté.
- Ductilité.
- Résistance à l'usure, à l'abrasion, au frottement.
- Rugosité.
- Tenue au vide.
- Non-toxicité etc.

II.2.2. Mécanisme de formation des dépôts électrolytiques:

La région interphase métal-solution peut se représenter selon le schéma de la (figure II.2) [16].

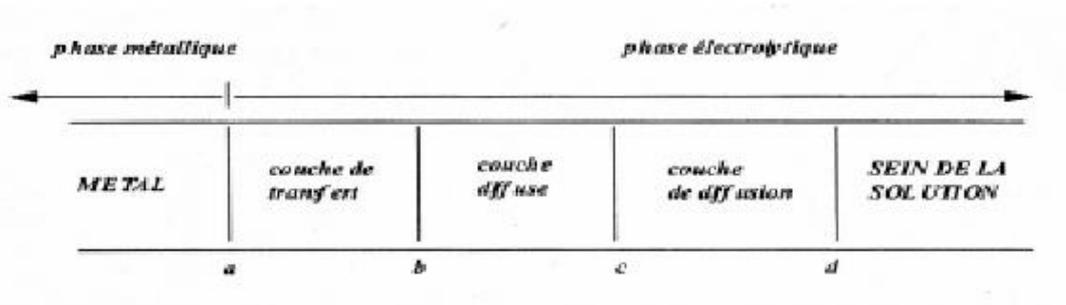


Fig II.2 Interphase métal – solution.

Dans la zone ac ou double couche, se produisent les phénomènes d'électrodes et dans la zone cd les phénomènes de diffusion.

ab : couche de transfert, couche d'adsorption dans laquelle les électrons du métal participent aux réactions d'électrodes.

bc : couche diffuse, portion de solution électrolytique dans laquelle, tant à courant nul qu'à courant non nul, il existe en tout point une densité de charge et des gradients de potentiel électrique et de potentiel chimique.

cd : couche de diffusion, portion de solution électrolytique dans laquelle, en présence de courant, la composition est différente de celle de la phase II ; les gradients de potentiels électrique et chimique étant légèrement plus faibles que dans la couche diffuse bc, et la densité de charge étant en tout point pratiquement négligeable ou nulle.

Lors d'un dépôt électrolytique, on distingue :

- L'apport de l'ion hydraté, du sein de la solution jusqu'à l'électrode,
- Le transfert de charge et l'intégration au réseau cristallin.

Ces deux mécanismes difficilement dissociables interviennent lorsque l'ion hydraté se trouve dans la zone ac, au niveau de l'électrode.

II.2.2.1. Transport de Masse:

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

II.2.2.1.1. Migration:

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

II.2.2.1.2. Convection:

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

II.2.2.1.3. Diffusion:

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

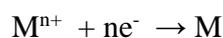
II.2.2.2. Transfert de charge et intégration au réseau cristallin:

II.2.2.2.1. Anciennes théories:

Dans les travaux antérieurs, on considérait lors d'un processus de décharge les étapes suivantes [16] :

– Déshydratation de l'ion ou perte des molécules d'eau de solvation.

Neutralisation de l'espèce ionique par saut d'un ou plusieurs électrons du métal suivant la réaction :



– Fixation de l'atome sur un centre actif et réunion d'un certain nombre de ces atomes pour constituer un germe de cristallisation sans aucune structure et finalement, à partir de ces germes, élaboration de l'édifice cristallin.

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

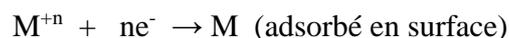
- Formation de germes ;
- Grossissement cristallin de ces germes.

Si la vitesse de grossissement des germes est supérieure à leur vitesse de production, le dépôt se fait sous forme de gros cristaux. Dans le cas contraire, il est constitué par une agglomération de petits cristaux.

II.2.2.2.2. Théories actuelles:

Les théories actuelles sur la formation des dépôts infirment le processus dit de neutralisation. Il a en effet été remarqué que le centre de l'ion positif se trouve, lors de cette réaction, situé à plusieurs angströms du réseau cristallin. Au cours du transfert de charge, il ne se formerait pas d'atomes à proprement parler [17].

En fait, on schématise le mécanisme de transfert de charges à l'interface électrode-solution suivant :



M ne représente peut-être pas un atome, on le désigne sous le nom d'adion, par abréviation d'ion adsorbé. Après sa formation sur un site plan, l'adion diffuse vers une imperfection du réseau cristallin afin de s'y intégrer; l'imperfection peut être une dislocation du métal ou une maille incomplète du cristal. L'adion migre pour chercher sa position la plus stable.

En résumé, les anciennes théories admettent que le transfert de charges et la cristallisation s'accomplissent simultanément: l'ion se décharge sur une imperfection du métal. Les théories actuelles admettent deux réactions séparées: transfert et cristallisation; l'ion se décharge en n'importe quel point d'une surface et diffuse vers un point privilégié pour s'intégrer au réseau cristallin.

II.2.3. Facteurs d'un dépôt électrolytique:

II.2.3.1. Nature de l'électrolyte:

L'utilisation de sels complexes donne des dépôts très cohérents et qui adhèrent bien au métal [18].

L'expérience a montré que l'électrolyse de sels complexes donne des dépôts de meilleure qualité que ceux obtenus avec les sels simples. Ainsi, le dépôt d'argent réalisé en électrolysant une solution d'un sel simple (par exemple, le 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.

Les dépôts de fer obtenus à partir d'une solution chlorhydrique sont plus grossiers que ceux obtenus à partir d'une solution sulfurique.

II.2.3.2. Agitation de l'électrolyte:

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.

II.2.3.3. 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 [18].

II.2.3.4. Le 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 de substances tampons. Cela permet d'éviter les modifications de qualité du dépôt qui résulteraient des variations de l'acidité [1].

II.2.3.5. Température:

Deux effets opposés peuvent être prévus. Si la température du bain augmente, la vitesse de diffusion des ions et la conductibilité du bain croissent aussi, cela accélère le processus de microcristallisation. Cependant, dans le même temps, les surtensions diminuent et cela favorise la croissance des grains. En effet, la température augmente la mobilité latérale des atomes métalliques dans la couche de croissance et les atomes peuvent atteindre plus facilement les centres actifs de croissance des cristaux. Ainsi, elle favorise une croissance de petits cristaux [19].

II.2.3.6. 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 [20].

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.

II.2.3.7. Concentration:

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

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

II.2.3.8. Métal de base:

La structure du dépôt est souvent semblable à la structure de la surface métallique à recouvrir (effets épitactiques). Les propriétés de la couche dépendent pour beaucoup de celle de la surface métallique qui doit être très propre et parfaitement polie.

II.2.4. Nickelage électrolytique:

Le recouvrement par le nickel de métaux et même de matières ne conduisant pas le courant électrique est très couramment utilisé depuis fort longtemps. C'est sans aucun doute le métal le plus employé, en galvanoplastie, à côté du cuivre. Cette importance d'utilisation du nickel a incité de très nombreux chercheurs à étudier des améliorations diverses pour déposer plus vite, pour obtenir des couches de nickel brillantes et pour rendre le dépôt de métal encore plus apte à mieux protéger les surfaces qu'il recouvre, soit seul, soit associé à des couches d'autres métaux tels que le cuivre, le chrome ou les métaux précieux [21].

De ce fait, il existe des formules et de nombreux procédés pour déposer le nickel aussi bien sur les métaux que sur les matières inertes telles que les résines synthétiques.

Tout d'abord, il est possible de diviser les procédés de déposition de nickel en deux grands groupes [22]:

- Le dépôt chimique sans courant électrique ;
- Et le dépôt par procédé électrolytique.

Le procédé chimique a pris beaucoup d'extension ces derniers temps à cause des améliorations qui ont été apportées au point de vue de la régularité du dépôt, sa vitesse de déposition et même son aspect extérieur.

II.2.4.1. Caractéristiques physico - chimiques du nickel:

II.2.4.1.1. Propriétés physiques:

Le nickel, découvert par Cronstedt en 1751, est un métal blanc à reflet jaunâtre, assez ductile et tenace. On le trouve aussi dans de nombreuses météorites.

Il s'allie par voie thermique avec de nombreux métaux: fer, cuivre, chrome, cobalt, manganèse, etc., mais par voie électrolytique, le nombre de métaux d'alliages et leurs applications sont considérablement plus restreints: cobalt, fer, phosphore, tungstène, étain.

Ses principales constantes physiques utiles sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau II.1 Principales caractéristiques physiques et mécaniques du nickel.

Principales caractéristiques physiques et mécaniques du nickel	
Symbole	Ni
Masse atomique (g/l)	58.71
Masse volumique (g/cm ³)	8.907
Densité	8.8
Température de fusion (°C)	1453
Coefficient de dilatation (K ⁻¹)	-6
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	12.8 x 10 à 20 °C 7.2 à 20 °C
Résistance à la rupture Rm(MPa)	Supérieure ou
Limite d'élasticité Re(MPa)	égale à 350

II.2.4.1.2. Propriétés électrochimiques:

Le nickel présente le degré d'oxydation + II et exceptionnellement + IV.

Métal légèrement noble, il se ternit à l'air par formation d'oxyde NiO qui le passive, alors que l'eau pure est sans action sur lui.

Le potentiel standard du couple Ni/Ni⁺⁺ (- 0,250 V/E.H.N.) le rend plus noble que le fer (- 0,44 V), mais, du fait de la forte irréversibilité de la réaction $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{++} + 2e^-$ et d'une forte surtension de dégagement d'hydrogène sur le nickel. Le nickel ne se corrode pratiquement pas dans une très large étendue de pH (milieux alcalins, neutres ou même légèrement acides) en l'absence d'oxydants et de complexant [22].

Les acides sulfurique et chlorhydrique dilués ne corrodent que lentement le nickel, au contraire des acides phosphorique et nitrique où l'attaque est accentuée.

Toutefois, la passivation est aisée en phase anodique (solution non chlorurée) ou en présence de certains oxydants.

II.2.4.2. Electrolytes de nickelage:

Connus depuis presque 150 ans, les bains de nickelage, ne sont pas pour autant entièrement maîtrisés. De nombreux travaux ont permis d'améliorer ce procédé.

Les dépôts de nickel s'effectuent à partir des solutions de sels simples: sulfate, chlorure, sulfamate, fluoborate. Ces dépôts peuvent être mats ou brillants, durs ou tendres, ductiles ou tendus.

De nombreux additifs, souvent brevetés, apportent une incomparable flexibilité au procédé [21].

II.2.4.2.1. Réactions aux électrodes lors du nickelage:

Les sels simples fournissent une haute activité en cations Ni^{++} puisqu'entièrement dissociés [21].

Anode et cathode sont alors le siège de réactions symétriques assurant ainsi la constance de l'électrolyte:

Dissolution de nickel à l'anode :



Dépôt de nickel à la cathode :



La plupart des procédés de nickelage ont un rendement cathodique voisin de 95 à 97 % entre pH 2 et 6.

II.2.5. Propriétés et structure des dépôts:

Ces caractéristiques dépendent de très nombreux paramètres, composition d'électrolyte, présence d'additifs spécifiques ou d'impuretés, conditions d'électrolyte (agitation, et parfois post traitement : thermique, usinage, autres dépôts.). La qualité et la stabilité d'un bain de dépôt chimique ne peuvent être obtenues que par un ajustage précis d'un certain nombre de paramètres [23].

II.2.6. Caractéristiques du métal déposé électriquement:

Le phénomène d'électrocristallisation n'est pas encore bien compris : de nombreuses recherches sont en cours sur ce sujet, en particulier pour expliquer le faciès du métal en cours de croissance.

Cependant, il est certain que le dépôt électrolytique se fait à partir de germes naissant sur certains points de la cathode.

Assez souvent, ces germes sont peu nombreux et vont se développer perpendiculairement à la surface de la cathode, car les filets de courant se dirigent de préférence vers eux car la distance anode – cathode est plus courte. Comme l'anode et la cathode sont toujours proches à quelques centimètres pour diminuer la résistance du bain, dans ces conditions on peut avoir un court-circuit. Les cristaux ont la forme de dendrites : le plus souvent ils se détachent assez facilement de la cathode.

Dans la plupart des cas, un dépôt compact micro-cristallin est désiré. Il faut que les germes se multiplient à la surface de la cathode, en évitant le développement préférentiel de quelques dendrites. C'est une question de composition de l'électrolyte (nature et concentration des sels, pH, ...) de température, de densité de courant, d'agitation du bain.

C'est là, la deuxième raison qui nécessite l'ajustement et le maintien du bain à une composition bien déterminée. Les perturbations de composition et hétérogénéité du bain proviennent :

- De l'augmentation de la concentration en impuretés dans le cas d'électrolyse à anode soluble
- De l'abaissement de la concentration en ions utiles dans le cas d'électrolyse d'une solution et évolution du pH quand il ya formation d'hydrogène ;

- De l'hétérogénéité due à l'appauvrissement cathodique et anodique, à l'apport d'eau par les ions hydratés tant à l'anode qu'à la cathode ;
- De la disparition de certains adjuvants du fait de leur électrolyse (sels d'ammonium par exemple) [24].

II.2.7. Théories de Co-déposition:

Avant d'entamer l'historique de la co-déposition électrolytique de particules, il paraît indispensable de définir cette co-déposition le plus précisément possible.

Le terme co-déposition est en fait un terme général propre à la galvanisation mais auquel on donne dans la littérature différents sens. Il s'emploie par exemple lors de la déposition électrolytique d'alliages. Au départ, de bains contenant des sels de métaux différents, un alliage est obtenu lorsque la réduction simultanée (co-déposition) de différents ions métalliques a lieu

L'incorporation d'ions complexés présents dans les bains est également rapportée dans la littérature sous la dénomination co-déposition.

Le principe de la co-déposition électrolytique repose sur la possibilité d'incorporer dans des dépôts électrolytiques (ou catalytiques) des particules solides qui sont maintenues en suspension dans le bain électrolytique.

Le degré de cette incorporation est entre autres fonction de l'intensité de courant, de la concentration en particules dans le bain et du transport de masse le long de la cathode. Une telle co-déposition est par exemple la co-déposition de complexes de cobalt dans des dépôts électrolytiques d'or. Ceci a permis le développement de dépôts qui possèdent une excellente résistance à l'usure.

La co-déposition électrolytique qui nous intéresse dans notre travail est l'incorporation de particules solides dans le dépôt cathodique.

A cet égard, les particules les plus utilisées sont des oxydes tels que l'alumine et la silice, des carbures tels que le carbure de chrome et le carbure de silicium et ainsi que des polymères.

Au cours de l'électrolyse, ces particules sont incorporées dans le dépôt métallique obtenu à la cathode suite à la réduction des ions métalliques présents dans le bain d'électrolyse [25 – 27].

Le mécanisme du dépôt composite est représenté d'une façon schématisée dans la (figure II.3).

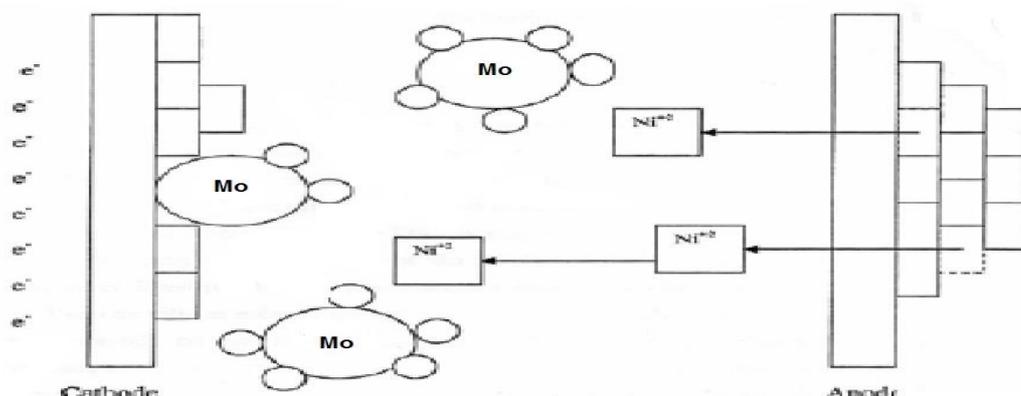


Fig II.3 Procédé de co-dépôt électrolytique Ni-Mo [29].

II.2.8. Dépôts composites métal –particules:

Des dépôts réalisés en régime électrodéposés en présence de particules minérales (oxydes, carbures...) ou organiques (téflon, PTFE...) en suspension dans l'électrolyte, confirment l'amélioration structurale des couches obtenues.

II.2.9. Dépôt composites en présence d'additifs:

Les dépôts électrolytiques de nickel obtenus avec les bains décrits ci-avant sont normalement mats et pour obtenir une finition brillante, doivent être polis mécaniquement.

Les additifs incorporés aux solutions de nickelage pour produire des dépôts brillants se distinguent selon leur fonction : relaxation de contraintes (additifs I), brillance ou affineur de cristallisation (additifs II), nivelant, mouillabilité (additifs III) [23].

Les propriétés et la structure du nickel déposé dépendent de l'électrolyte et des agents d'addition, qui modifient largement la cristallisation et donc la finesse du grain, la brillance ou la porosité du dépôt [28].

CHAPITRE III :
MATERIAUX ET METHODES
EXPRIMENTALES

III. 1. Introduction :

L'élaboration d'un revêtement métallique quelle que soit la nature d'un substrat est une manière qui protège ce substrat dans le milieu extérieur contre les agressions qui risquent de le détériorer.

L'objectif visé par la présente étude se résume dans l'élaboration des revêtements d'un composite Ni-Mo sur des substrats de cuivre par l'emploi de la technique électrolytique.

Avant l'opération de nickelage, les échantillons sont soigneusement préparés pour permettre un bon recouvrement et une meilleure adhérence du revêtement.

L'élaboration de ces dépôts a été suivie par une caractérisation métallographique et vis-à-vis de la corrosion.

III 2. Matériaux:

III 2.1. Substrat utilisé :

Comme substrat nous avons utilisé des sheets de cuivre à une forme rectangulaire.

III 2.2. Plaque de nickel:

Comme anodes, nous avons utilisé deux plaques de nickel rectangulaire d'une part et d'autre de la cathode, environ de pureté de 99,7%.

III 3. Préparation de la surface:

La préparation des surfaces des pièces à revêtir est une étape importante qui a amélioré la qualité.

III 3.1. Polissage mécanique:

Le polissage mécanique des substrats est réalisé par un papier abrasif. Une polisseuse rotative, munie d'un disque abrasif de différentes granulométries a été utilisée. (p120-p1200).



Fig. III.1 Schéma de polisseuse utilisé dans le polissage mécanique.

III 3.2. Dégraissage électrolytique:

Un circuit de tension statique a été monté les opérations de dégraissage.

L'électrode à nettoyer (la plaquette de cuivre) est prise comme cathode dans l'électrolyte d'une solution alcaline contenant un mélange d'hydroxyde de sodium (NaOH) et du bicarbonate sodium (Na_2CO_3), qui joue le rôle de tensioactif, il abaisse la tension interfaciale de la pièce, assure son mouillage et facilite le découlement des salissures.

Hydroxyde de sodium [NaOH]	30g/l
Carbonate de sodium [Na_2CO_3]	10g/l

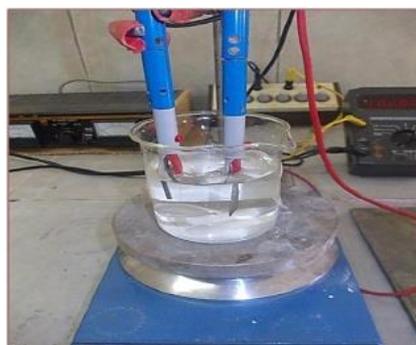


Fig. III.2 Schéma de montage de dégraissage électrolytique.

III.3.3. Décapage chimique:

Le décapage chimique des échantillons a été réalisé dans l'acide chlorhydrique bouillant en 10% (en volume). Les plaquettes de cuivre ont été totalement immergées dans la solution acide pendant 3min, le temps du décapage est considéré comme une fonction du degré de souillure de l'échantillon.

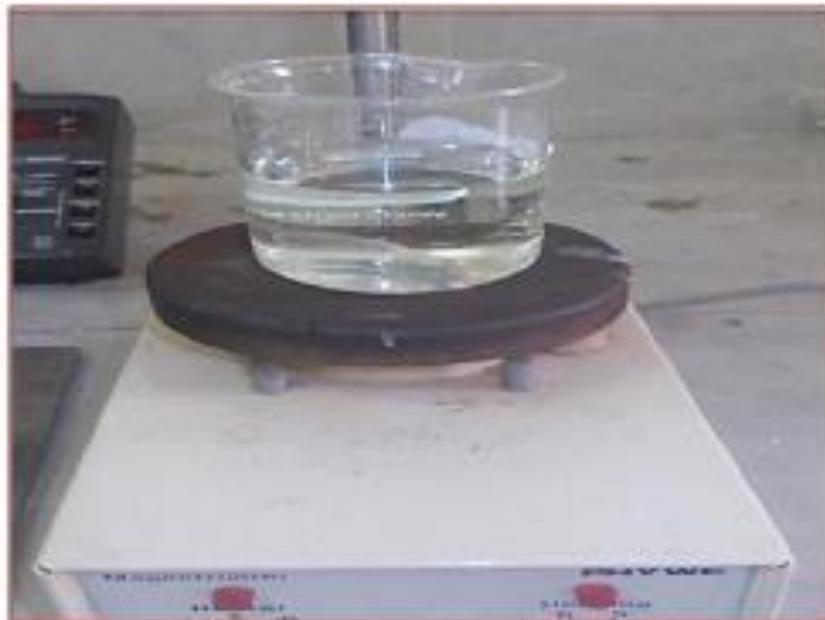


Fig. III.3 Schéma de montage de décapage chimique.

III.3.4. Rinçage:

Une fois, les échantillons sont décapés, on les a rincé immédiatement avec l'eau distillée, l'acétone puis avec la solution de notre bain.

III.4. Bain de Nickel pur :

Le tableau suivant récapitule la composition et les concentrations utilisées pour les différents dépôts électrolytiques :

Tableau (III.1) Les Compositions du bain de nickelage pur.

composition	Concentration (g/l)
NiCl ₂ .6H ₂ O	25
NH ₄ Cl	21.5
H ₃ BO ₃	18.5
NaCl	6
La gamme arabique	Des traces (0.1)
Parameters	conditions
Densité du courant	10, 15, 20, 25 et 30 A /dm ²
PH	5.5 – 6
Température	30 °C
Agitation	Magnétique

III.5. Bain électrolytique:

Le bain électrolytique est un mélange complexe d'espèces solubles du métal à déposer, d'électrolyte et de différents additifs permettant d'obtenir les propriétés et les caractéristiques désirées.

Tableau(III.2) Les compositions chimiques de bains de nickelage au sulfate

composition	Concentration (g/l)
NiCl ₂ .6H ₂ O	25
NH ₄ Cl	21.5
H ₃ BO ₃	18.5
NaCl	6
MO ₇ (NH ₄) ₆ O ₂₄ .4H ₂ O	12
La gamme arabique	Des traces (0.1)
Parameters	conditions
Densité du courant	10 ;15 ;20 ;25 et30 A \dm ²
PH	5.5 – 6
Température	30 C ⁰
Agitation	Magnétique

III.6. Electrodeposition de nickel:

Un montage électrochimique a été réalisé pour toutes les opérations de déposition électrolytique, fig. (III.4). La plaquette rectangulaire de cuivre (substrat) est prise comme cathode, alors que comme anodes nous avons utilisé deux plaques de nickel de géométrie rectangulaire.

Ces électrodes sont plongées dans un bain d'électrolyse avec un thermomètre et une électrode de verre à un pH-mètre. Le bain est soumis à une agitation magnétique pendant toutes les opérations d'électrodeposition.



Fig. III.4 Schéma de montage d'électrodeposition.

III.7. Caractérisation des dépôts:

Les propriétés essentiellement suivies lors de la caractérisation des dépôts élaborés sont l'épaisseur, l'adhérence, le rayon X, la morphologie par le microscope électronique à balayage (MEB) et la résistance vis-à-vis de la corrosion.

III.7.1. Mesure de l'adhérence de la couche :

Les tests d'adhérence ont été réalisés par des chocs thermiques. L'échantillon est maintenu à une température de 250°C pendant 30 minutes puis subit une trempe dans de l'eau à la température ambiante. L'apparition de cloques est un signe de mauvaise adhérence.

III.7.2. Mesure de l'épaisseur :

La mesure de l'épaisseur des couches a été effectuée par la méthode pondérale selon l'équation suivante : $e = \Delta m / (S \cdot \rho)$

Ou

e (cm) : épaisseur du dépôt

ρ (cm) : masse volumique de dépôt (d dépôt = 8,9 g/cm³)

S (cm) : la surface du substrat.

m dépôt = $\Delta m = m_f - m_i$

m_f (g) : la masse de l'échantillon après revêtement.

m_i (g) : la masse de l'échantillon avant revêtement.

III.7.3. Etude de la tenue à la corrosion:

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

III.7.3.1. Méthode de la masse perdue:

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

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

III.7.4. Microscopie électronique à balayage (MEB):

Les propriétés et la structure du nickel déposé et de la couche Ni-Mo co-déposée dépendent de l'électrolyte, des conditions d'électrolyse, et des agents addition qui modifient le processus de cristallisation et enfin de la granulométrie des particules déposées.

La microscopie électronique à balayage (MEB) permet d'observer ces particules incorporées dans la matrice métallique et définit donc la morphologie de la surface ainsi revêtue.

Cette microscopie est basée sur l'observation des électrons secondaires, émis par suite de l'excitation de la surface de l'échantillon par un faisceau des électrons incidents. La zone concernée est limitée à quelques nanomètres. L'intensité de l'émission est fonction des accidents de la surface, du potentiel local et du numéro atomique.

Le faisceau incident balaye la surface de l'échantillon étudié, le signal module la brillance d'un tube cathodique fonctionnant en balayage synchrone, il y a formation d'une image reflétée de la surface observée



Fig III.5. Microscopie électronique à balayage (MEB).

III. 7.5. Diffraction par le rayon X:

La diffractométrie par rayon X est une méthode d'analyse qui ne peut être appliquée que sur de la matière cristalline (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés) et non sur de la matière amorphe (liquides, polymères, verres). Les Diagrammes de diffraction obtenus par rayons X nous permettent de reconnaître les plans réticulaires et par conséquent la structure du revêtement ainsi que le réseau cristallin des grains du revêtement.

En effet, les rayons X permettent même de reconnaître des matériaux qui ont la même composition chimique brute, mais qui sont de forme de cristallisation différente.



Fig III.6. Système de diffraction par rayon X.

III.7.6. Méthode de polarisation potentiodynamique :

Les mesures de polarisation potentiodynamique ont été réalisées en utilisant une cellule à trois électrodes standard avec les échantillons revêtus (1.156 cm^2) comme une électrode de travail, Pt comme électrode auxiliaire et l'électrode au calomel saturé comme électrode de référence, tous immergés dans 0,6 M de NaCl et 0,1 M HCl électrolyte

Cette cellule a été reliée à VoltaLab 20 (PGP201) dispositif de travail à une vitesse de balayage de $0,5 \text{ mV / s}$ et dans le domaine de potentiel de -1000 à -100 mV . Vitesse de corrosion (mm / an), potentiel de corrosion E_{CORR} (mV), et les pentes de Tafel (mV / s) ont été calculées en utilisant Tafel extrapolation technique fournie par Voltalab logiciel Master 4.



Fig III.7. Montage potentionstatique pour mesures électrochimiques

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 L'adhérence

La mesure de la qualité d'adhérence des couches électrodéposées a été effectuée par la méthode du choc thermique (chauffage du dépôt jusqu'à 250 °C pendant 30 minutes, puis trempe rapide dans l'eau à température ambiante). Ces tests de choc thermique pour différentes couches nous amènent à conclure que ces revêtements ont une très bonne adhérence.

IV.2 Caractérisation de la surface

IV.2.1 MEB observation

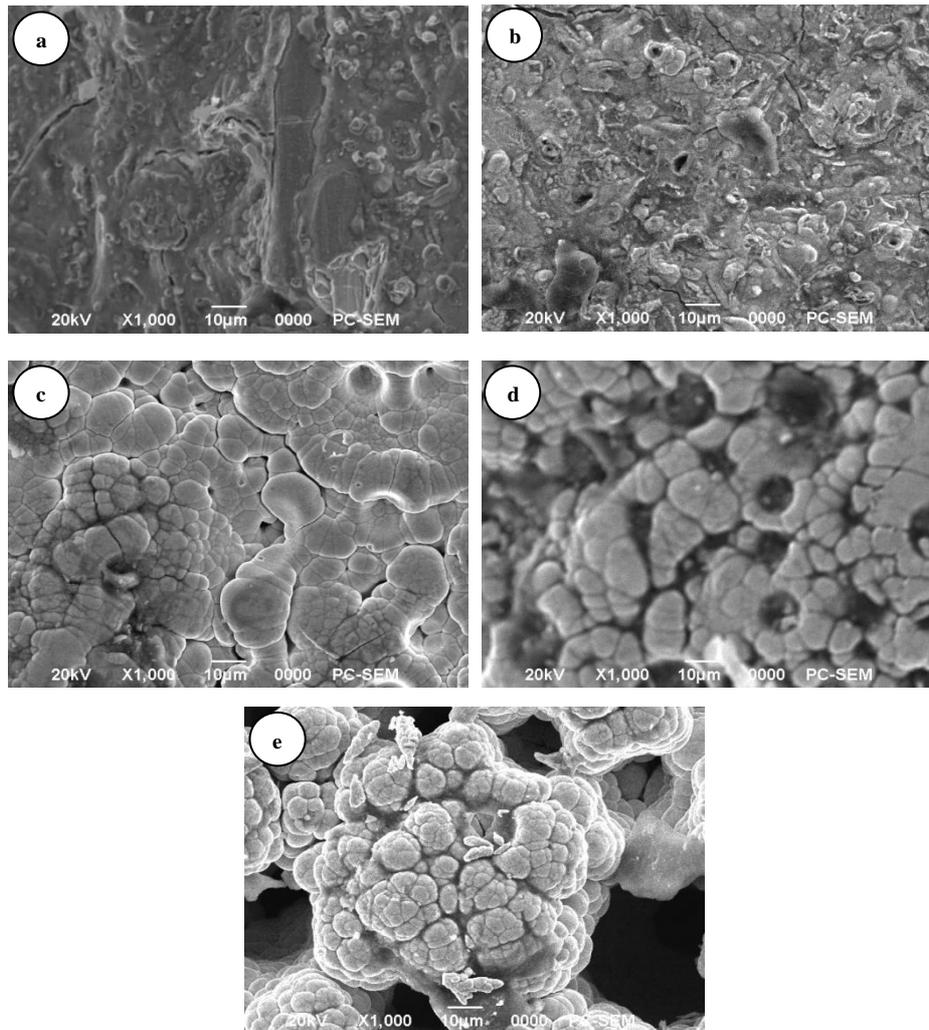


Fig.IV.1. MEB observation des dépôts Ni-Mo en fonction de la densité appliquée (a) 10 A/dm², (b) 15 A/dm², (c) 20 A/dm², (d) 25 A/dm², (e) 30 A/dm².

La morphologie des revêtements électrolytiques Ni-Mo préparés à différentes densités de courant est représentée sur la (Fig.IV.1). La présence de Mo en tant que Co-dépôt dans la matrice de nickel élargit nettement la surface réelle des couches. L'ensemble du domaine des revêtements composites observés à densité de courant élevée est rugueux et indique des

pores profonds et étroits (Fig.IV.1.d-e), (Fig.IV.1.a-c) présente une zone fissurée de la couche déposée Ni-Mo. Cette zone fissurée peut être attribuée à des contraintes internes causées par l'intensification de la réaction de l'hydrogène.

IV.2.2 Analyse par EDS

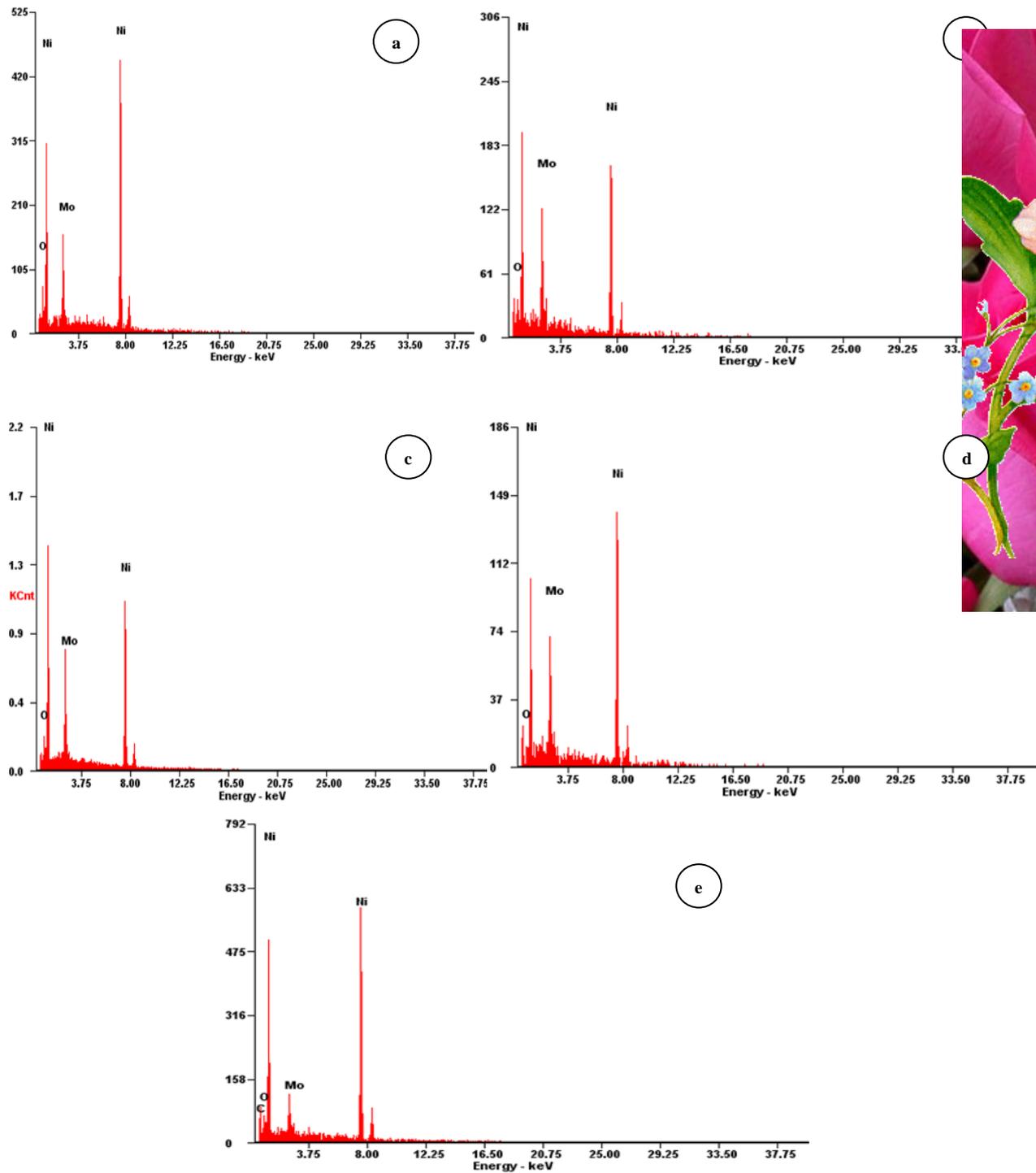


Fig.IV.2. EDS analyses des dépôts Ni-Mo en fonction de la densité appliquée (a) 10 A/dm², (b) 15 A/dm², (c) 20 A/dm², (d) 25 A/dm², (e) 30 A/dm².

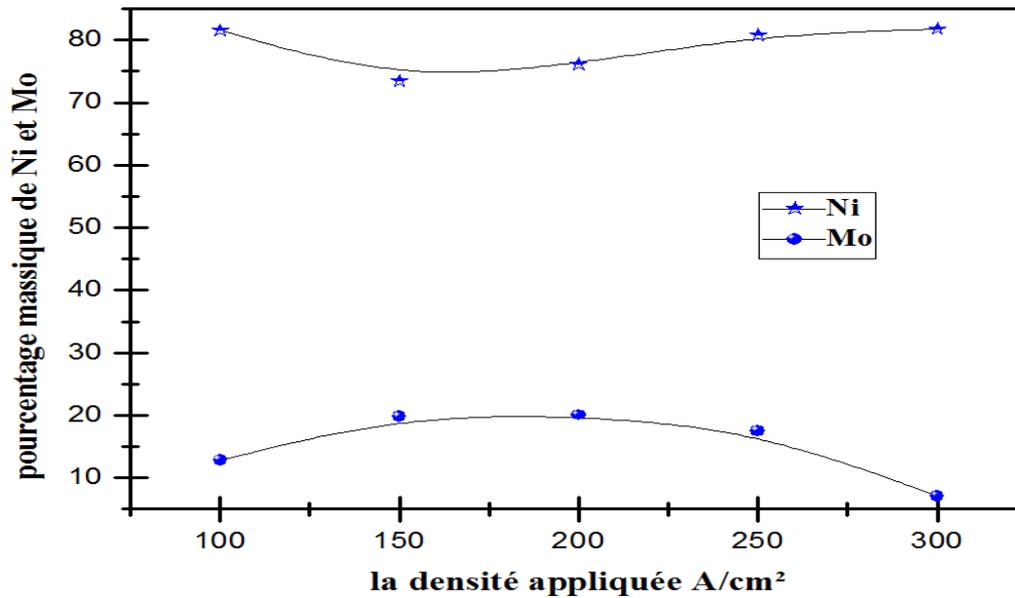


Fig.IV.3. Influence de la densité du courant appliqué sur la composition des dépôts Ni-Mo.

La composition chimique de l'alliage Ni-Mo dépend de la densité de courant appliquée (fig.IV .2.a-e) et. (Fig.IV.3) une augmentation de la teneur en Mo dans le dépôt a été atteinte par une augmentation de la densité de courant appliquée. Lors de la densité de courant de 10 à 20 A/dm², les dépôts obtenus contiennent de 13 à 20.wt. % de Mo, ce comportement est dû à l'augmentation du mouvement du métal Mo vers la cathode comme résultant de la densité de courant augmente. L'augmentation de la densité de courant de plus de 20 A/dm² provoque une chute de la teneur en Mo dans les dépôts, cette diminution peut être attribuée par un entrainement partiel de Mo par les ions de nickel.

IV.2.3 Diagramme de Rayon X

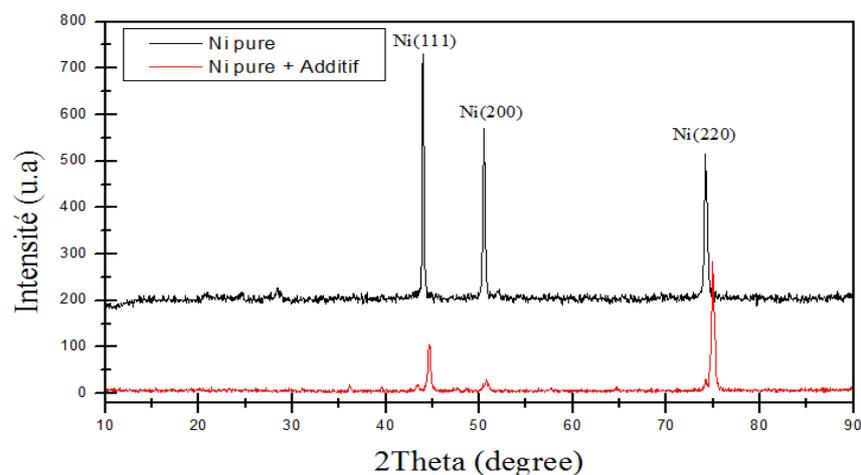


Fig.IV.4. Diffractogramme de rayon X des dépôts composite Ni pure + additif.

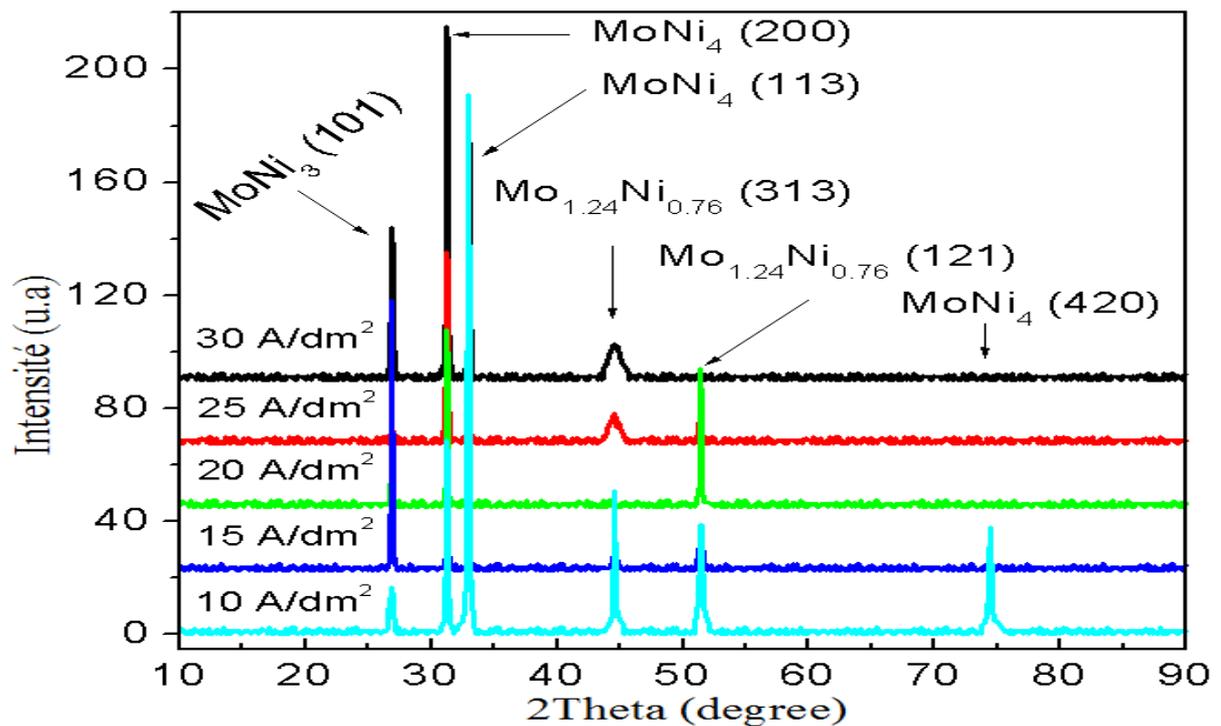


Fig.IV.5. Diffractogramme de rayon X des dépôts composites Ni-Mo en fonction de la densité du courant appliquée.

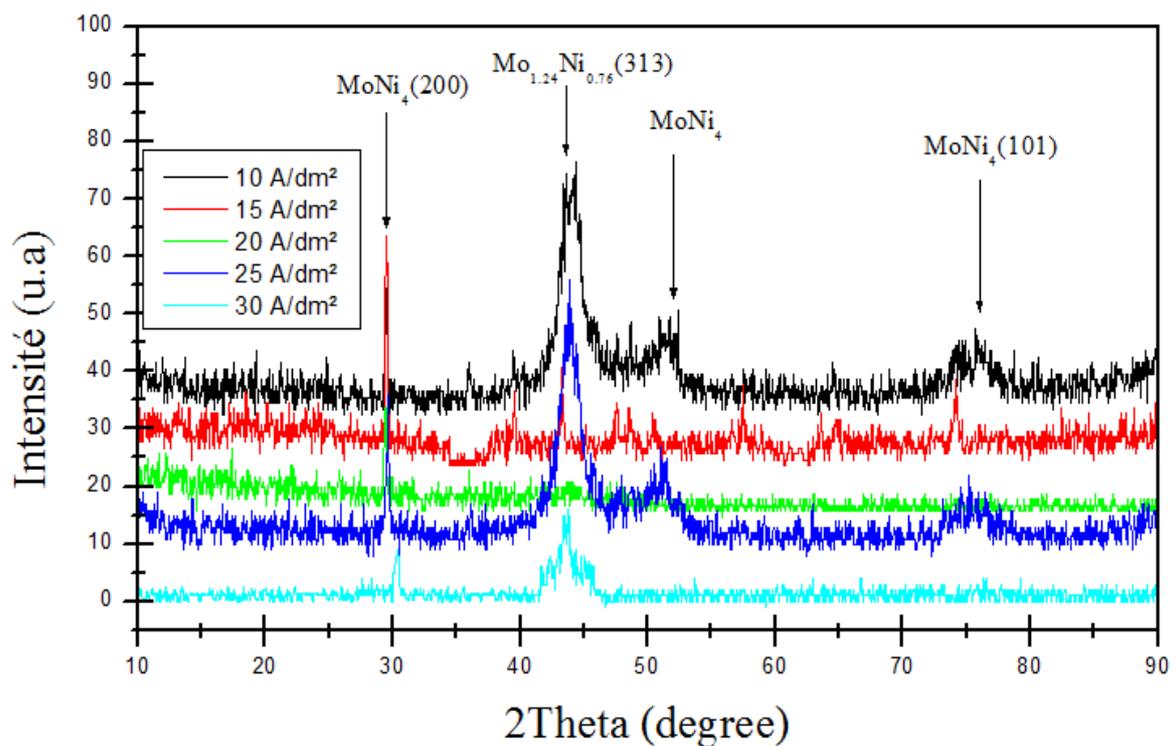


Fig.IV.6. Diffractogramme de rayon X des dépôts composites (Ni-Mo + additif) en fonction de la densité du courant appliquée.

Les caractéristiques des pics de diffraction des rayons X dans la Fig. IV.4 montre que les pics à $2\theta = 44-45^\circ$, $51-52^\circ$ et $75-76^\circ$ représentent Ni phase cristalline et correspondent aux plans ci-après: (1 1 1), (2 0 0) et (2 2 0), respectivement. La présence de la gomme arabique comme un additif a réduit l'intensité des pics et favorise le plan (220).

Analyse par rayons X de nos revêtements est représentée sur la (Fig. 5). Le diagramme de diffraction des rayons X de Ni-Mo électrodéposée à divers densités de courant a montré que le pic lié à la phase MoNi_4 avec le plan (200), présente l'intensité la plus élevée en appliquant une densité de courant de 10 A / dm^2 , il peut être attribué à l'effet d'augmenter la densité de courant. En outre, la phase Ni_3Mo avec le plan (101) présente une intensité importante de dépôt Ni-Mo à 15 A / dm^2 , des pics ont été observés $\text{Mo}_{1.24}\text{Ni}_{0.76}$ avec les plans (313) et (121) en utilisant une densité de courant de 10 et 20 A/dm^2 progressivement. La Figure.IV.6 montre que L'addition du gomme arabique a un effet sur la structure des dépôts Ni/Mo, où il a favorisé le plan (313) de la phase $\text{Mo}_{1.24}\text{Ni}_{0.76}$. Mais comme on peut le voir aucune présence de pics Ni ou Mo purs, cette absence pourrait être expliquée par la densité de courant plus élevée appliquée formé un fortement tenu des phases MoNi_4 , Ni_3Mo , $\text{Mo}_{1.24}\text{Ni}_{0.76}$.

IV.3. Etude de la corrosion

A/ Méthode de la masse perdue

Le taux de corrosion calculé à partir de la formule

$$T_{\text{corr}} = 365 \cdot \Delta m / S \cdot t$$

T_{corr} : taux de corrosion en ($\text{mg / cm}^2 \cdot \text{j}$).

Δm : différence de masse en (g) ;

S : surface soumise au test en (cm^2).

t : temps de l'expérience en (an).

Tableau (IV.1) Taux de corrosion des dépôts électrolytiques Ni/Mo par la méthode de la masse perdue.

échantillon	mi(g)	mf(g)	Δm (g)	S (cm^2)	Taux de corrosion ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{j}$)
Ni pure	0.6937	0.6931	0.0006	1.194	0.012
1	1.2248	1.2237	0.0008	1.398	0.014
2	1.0740	1.0727	0.0011	1.503	0.018
3	1.1595	1.1580	0.0013	1.539	0.020
4	0.7943	0.7929	0.0015	1.610	0.023
5	1.1800	1.1785	0.0018	1.774	0.025

Tableau (IV.2) Taux de corrosion des dépôts électrolytiques Ni/Mo+ additif par la méthode de la masse perdue.

échantillon	mi(g)	mf(g)	Δm (g)	S (cm ²)	Taux de corrosion (g/cm ² .j)
Ni pure	0.6742	0.6737	0.0005	1.182	0.010
1	1.1214	1.1207	0.0007	1.320	0.0129
2	1.5684	1.5674	0.0010	1.476	0.0164
3	1.8859	1.8847	0.0012	1.512	0.0193
4	1.8003	1.7988	0.0015	1.594	0.0228
5	1.1220	1.1206	0.0017	1.743	0.0237

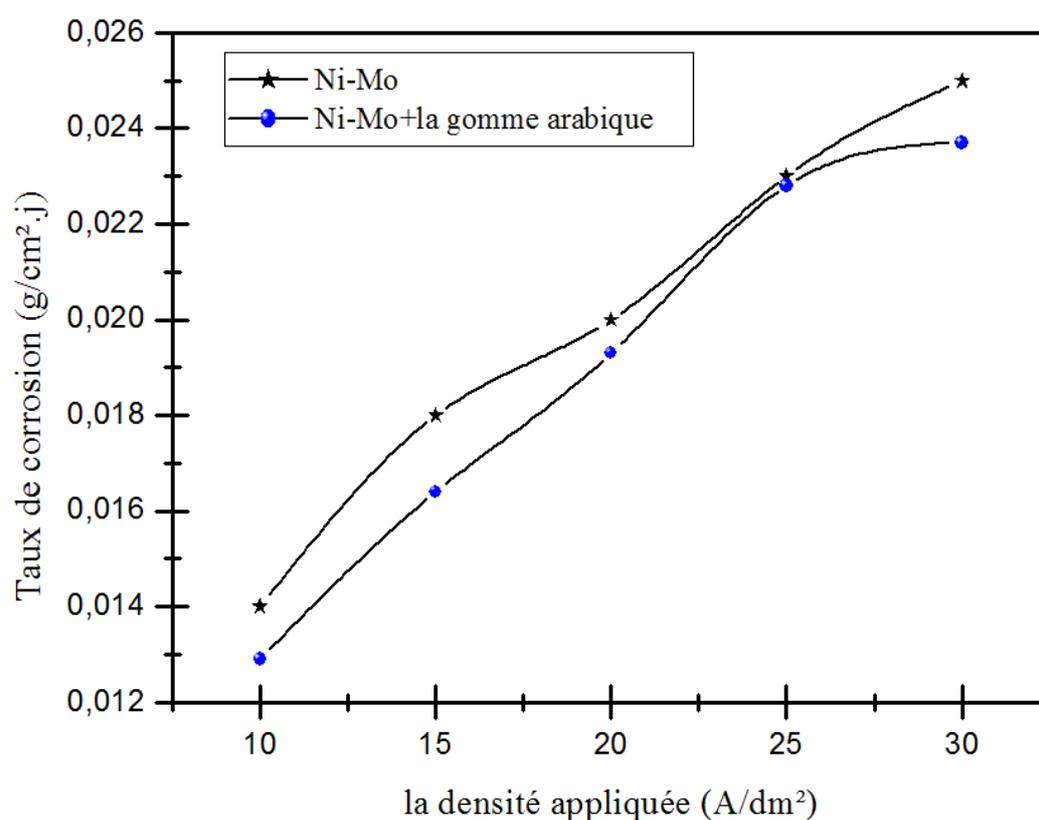


Fig.IV.7. Le taux de corrosion des dépôts électrolytiques Ni-Mo + gomme arabique en fonction de la densité du courant.

Les tests de corrosion effectués en utilisant la méthode de perte de poids, (Fig.IV.6) et examinés dans un environnement agressif (NaCl 0,6 M) pendant 15 jours à la température ambiante montrent que le taux de corrosion augmente avec l'augmentation de la densité de courant électrolytique due à la porosité et la fissuration de la surface de dépôts. En plus

l'addition de la gomme arabique comme un additif organique a amélioré la résistance des dépôts à la corrosion, où le taux de corrosion est diminué après leur addition. Donc comme un meilleur dépôt résiste bien à la corrosion est celui déposé à 10 A/dm² en présence de gomme arabique.

B/ Méthode de la polarisation potentiodynamique

Tableau(IV.3) Résultats de la polarisation des dépôts électrolytiques Ni-Mo en fonction de la densité du courant appliquée.

Densité du courant (A/dm ²)	Mo content (wt. %)	E _{corr} (mV)	I _{corr} (μA/cm ²)	Vitesse de Corrosion (mm/an)
10	12.83	-281.9	0.8950	1.086
15	19.80	-288.0	92.8987	10.46
20	20.06	-450.2	7.9922	93.47
25	17.51	-638.3	7.8453	91.76
30	7.09	-674.4	30.5949	357.8

Tableau(IV.4) Résultats de la polarisation des dépôts électrolytiques Ni-Mo + additif en fonction de la densité du courant appliquée.

Densité du courant (A/dm ²)	E _{corr} (mV)	I _{corr} (μA/cm ²)	Vitesse de Corrosion (mm/an)
10	-483	0.1637	1.133
15	-559	96.9	1.914
20	-246.9	6.3283	0.7401
25	-456	74.6	0.8728
30	-535	18.9	0.2208

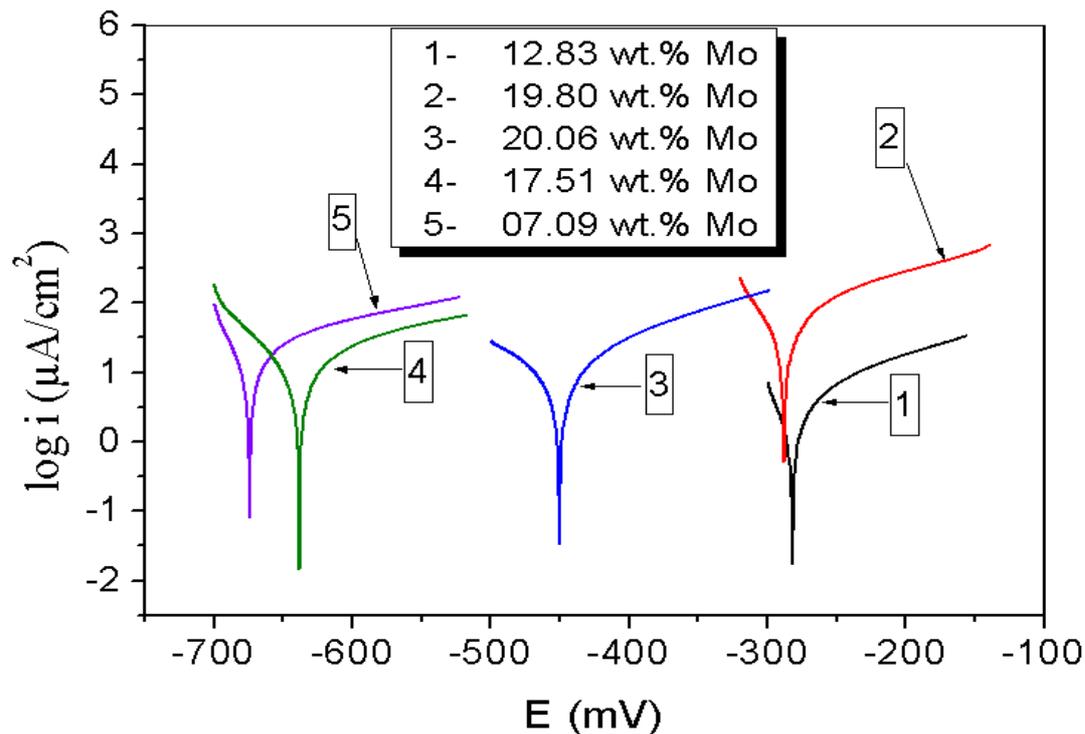


Fig.IV.8. Courbes de polarisation potentiodynamique des dépôts Ni-Mo en fonction de la densité du courant appliquée dans le milieu 0,6 M NaCl.

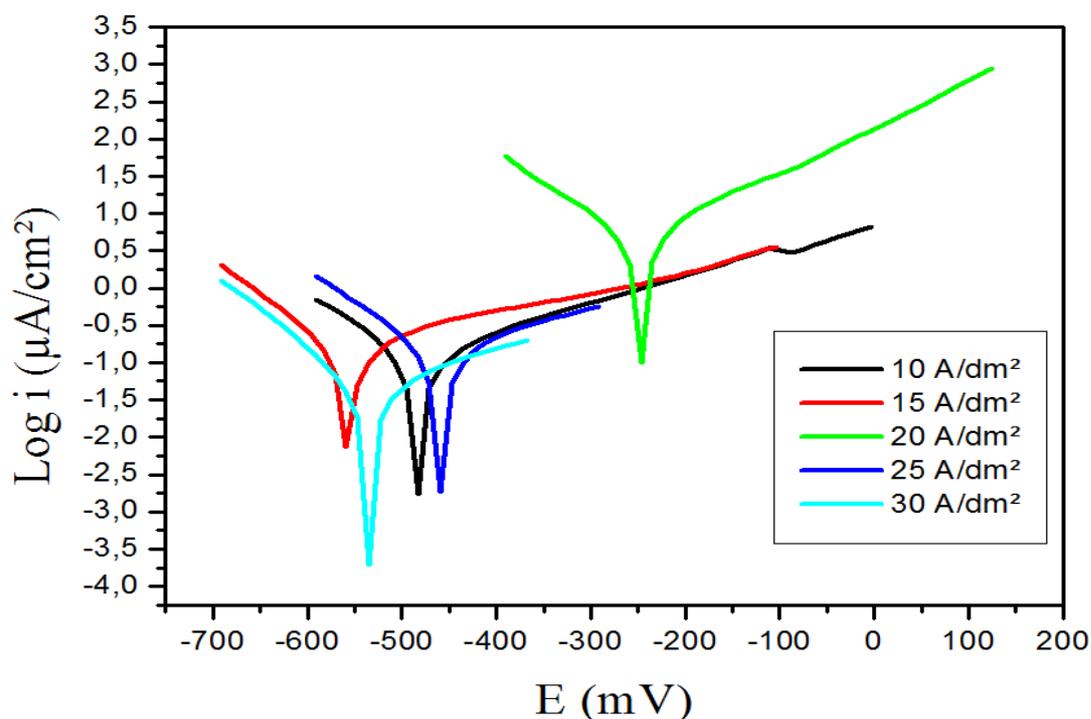


Fig.IV.9. Courbes de polarisation potentiodynamique des dépôts Ni-Mo + additif en fonction de la densité du courant appliquée dans le milieu 0,6 M NaCl.

La méthode de polarisation potentiodynamique a été utilisée pour évaluer notre essai de corrosion sur Cu revêtu par les dépôts composites Ni-Mo dans l'environnement agressif (NaCl 0,6 M) à une température ambiante (Fig.IV.7). Il est évident de voir que, comme un dépôt composite noble Ni-Mo contenant ~ 13.wt. % Comme il avait un taux de corrosion de (1.086 mm/an), le potentiel de corrosion le moins négative ($E_{\text{corr}} = -281,9 \text{ mV}$) et la minimale valeur de la densité de corrosion ($I_{\text{corr}} = 0.8950 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Cela est dû à la surface uniforme et faiblement craquée. La plus grande valeur négative de potentiel de corrosion ($E_{\text{corr}} = -674,4 \text{ mV}$) et le taux de corrosion maximale (357,8 mm / y) ont été obtenus pour les dépôts Ni-Mo contenant ~ 8.wt%. L'étude morphologique de cet échantillon révèle la rugosité et les pores étroits et profonds. La présence de la gomme arabique comme un additif organique dans la solution d'électrodéposition des couches Ni-Mo a réduit les propriétés électrochimiques de ces revêtements Figure. IV.9, où la meilleure densité de corrosion ($I_{\text{corr}} = 0.1637\mu\text{A}/\text{cm}^2$) est celle en appliquant une densité de 10 A/dm² (voir tableau IV.4).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude nous a permis d'atteindre les objectifs recherchés :

L'électrodéposition des matériaux composites exige des bains permettant d'obtenir les propriétés et les caractéristiques voulues. Le bain proposé a été dicté par le fait qu'il répond aux exigences.

Toutes les expériences d'électrodéposition ont été réalisées au Laboratoire de Chimie industriel de l'Université de Biskra.

La solution est soumise à l'agitation pendant 48 heures pour assurer une bonne dispersion des particules.

L'optimisation des conditions d'élaboration nous a conduit à réaliser les dépôts à différentes densités de courant de l'ordre de $J = 10, 15, 20, 25, 30 \text{ A/dm}^2$, une durée de 90 min, pH de 5,5-6 et une température allant de $30 \pm 1 \text{ C}^\circ$.

Les revêtements de nickel d'une part et les couches composites (Ni-Mo) d'autre part, sont obtenus par voie électrolytique sur des substrats de cuivre doux préalablement traités.

On peut constater que le test du choc thermique nous amène à conclure que ces revêtements ont une très bonne adhérence. Le revêtement Ni/Mo est poreux et contient des craques. Les revêtements électrodéposés à 10 A/dm^2 en présence de la gomme arabique donnent les meilleures propriétés électrochimiques.

Référence bibliographique

- [1] D. Landolt « corrosion et chimie de surface des métaux traité de matériaux », Ed.Press Polytechnique et universitaire Romandes, Paris, 1993 p 488-499.
- [2] G. Fontana «Corrosion Engineering», McGraw-Hill 3ed Edition, USA, 1985 p305-306.
- [3] H.H. UHLIG, « Corrosion et protection ». Ed DUNOD. Paris, 1970.
- [4] A. BERNARD, J. MICHEL, J.PHILEBERT, « Processus et facteurs de corrosion desmétaux et alliages », Métallurgie générale, Ed Masson & Cie Paris,1969 .
- [5] C. FUVELLE, « Introduction à la corrosion (formes et prévention) », Ed CETIM,1989 .
- [6] L. Antropov, Electrochimie Théorique, Moscou, 1965.
- [7]:Corrosion et inhibition des puits et collectes", Technique 1981, Paris
- [8] B. LAZHAR , "Influence des inhibiteurs organiques et inorganique sur la corrosion électrochimique d'acier en milieu acide", Mémoire de fin d'étude, universitaire d'Ouargla, 1998.
- [9] J.J.Lamoureux, « Précis de Corrosion», MASSON, 1994.
- [10].H. H. Uhlig, « Corrosion Handbook», John Wiley and Sons, New York, 1948.
- [11]REZGUI Imane, thèse de magister, université de Batna,08 Décembre 2010.
- [12]J. Benard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot, « Métallurgie Générale», 3ème Edition, Paris, MASSON et CIE, 1969.
- [13] G. Garnier, «Dégraissage chimique », technique de l'ingénieur, 1989, pp. M 1451.
- [14] Y. Cetre, V. Brege, P. Eichner et M. Senac, «Traitements et Revêtements de surface dans l'industrie chimique : présentation d'un guide de choix», p.717-725.
- [15] A. B. Vannes et C. Langlade-bomba, «Peut-on choisir un traitement superficiel à partir de considérations tribologiques», p.147-166.
- [16]P. PAUMELLE, «Optimisation des Epaisseurs de Dépôt Electrolytique parSimulation, Corrosion et Anticorrosion», Journées Techniques, Bordeaux, CETIM,1997 [17].L. Lacourcelle, «Revêtements Métalliques par Voie Electrolytique», M 1591, Technique de l'Ingénieur, 2000.
- [18].B. Conway et J. Bockris, Electrochemical Acta, 3, p. 340, 1961.
- [19].L. Antropov, «Electrochimie Théorique», Moscou, 1965

- [20]S. Glastone, «Electrochimie des Solutions», Felix Alcan, Paris, 1936
- [21].R. H. Rousselot, «Réparation du Potentiel et du Courant dans les Electrolytes», DUNOD, 1959
- [22].Y. Badé, «Revêtements Métalliques par Voie Electrolytique», Nickelage, M 1610, Technique de l'Ingénieur, 2000.
- [23]. F. Lowenheir, « Modern Electroplating», Wiley. 1974
- [24].Y. Bade, «Revêtements Métalliques par Voie Electrolytique (Nickelage) », Technique de l'Ingénieur, 4-1989, M 1610.
- [25].J. Bernard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot, Métallurgie Générale, 2ème Edition, Masson, Paris, 1991.
- [26].J. P Cellis, J. R Roos, «Les Perspectives d'Avenir des Dépôts Composites», Oberflache Surface 24, Heft 10, pp352-357,1993.
- [27].J. P Celis, J. Fransear, J. R Roos, «La Synthèse et le Comportement Tribiologique de Revêtements Electrolytiques de Nickel-Composite Contenant de l'Huile», Matériaux et techniques, Vo.1-2, pp5-8,1995.
- [28]Y. Badé, «Revêtements Métalliques par Voie Electrolytique(Cuivrage) », M 1605 Technique de l'Ingénieur, 2000.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تأثير كل من مميزات مركب نيكيل-موليبدينوم وذلك بتقنية التغليف الكهروكيميائي , هذا التغليف تم انطلاقاً من حمام سولفاتالنيكل مع إضافات عضوية فوق قطعة نحاسية معالجة مسبقاً .

من اجل دراسة خصائص هذه الاغطية قمنا بالاختبارات التالية نوعية التلاصق -التآكل في مياه البحر بطريقتين الكتلة الضائعة والاستقطاب المتحرك - MEB. هذه الاختبارات بينت لنا ان الاغطية تكتسب نوعية جيدة من التلاصق -مقاومة جيدة ضد التآكل و بنية تحتوي على مسامات,مترابطة بحبيبات الموليبدان بدرجة كبيرة كميتهما .

كلمات مفاتيح: توضعكهر وكيميائي،نيكل-موليبدان،التآكل.

Résumé

Dans ce travail on a mené une étude expérimentale des revêtements composites Ni / Mo. Ces revêtements ont été réalisés par voie électrolytique sur des substrats de cuivre préalablement traités.

Des tests de caractérisation successifs ont été effectués à savoir : la qualité d'adhérence, la tenue à la corrosion par la méthode de masse perdue ainsi que la polarisation potentiodynamique, la diffraction des rayons X, MEB et EDS.

Cette étude permet de conclure que les dépôts composites élaborés ont une bonne adhérence et qui résistent mieux à la corrosion dans le milieu agressif (NaCl 0,6 M). Ces dépôts sont homogènes et compacts.

Mots clés : Ni / Mo, revêtements composites, Dépôts composites, Corrosion.