

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

THESE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : GÉNIE DES MATÉRIAUX

PAR :

AISSOU RABAH

Thème

**Comportement électrochimique d'un dépôt de CUIVRE obtenu par
projection thermique**

Soutenu le 15-06-2023 devant le jury composé de :

Mr. BRADAI M.A Président.
Mr. YOUNES R Rapporteur.
Mr. IDIR A Examineur.
Mlle BOUDJIT S Invitée.

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022/2023

Remerciements

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Mes vifs remerciements sont destinés à Mr R.YOUNES, mon promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Je ne peux pas oublier de présenter ma gratitude à mes parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour moi.

Je remercie également les membres du jury qui me font honneur en acceptant d'examiner et de juger mon travail.

Sans oublier l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia,

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

Enfin, un merci particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes très chers parents

A mon frère

A tous mes proches

A tous les enseignants

A tous mes amis

Sommaire

Sommaire

	Introduction générale	
	Chapitre I : étude bibliographique	
	Introduction.....	
I.1	Classification des matériaux.....	1
I.2	Historique du cuivre.....	2
I.3	Généralité sur cuivre	2
I.4	Propriétés cristallines du cuivre	3
I.5	Propriété électrique du cuivre	3
I.6	Propriétés mécaniques.....	3
I.7	Propriétés chimiques.....	3
I.8	Application du cuivre.....	4
	La projection thermique.....	
I.9	Principe de la projection thermique	5
I.10	Différents types de procédés de projection thermique.....	5
I.11	Projection a flamme	6
I.12	Projection flamme-fil	7
I.13	Projection flamme poudre.....	8
I.14	Projection à l'Arc électrique	8
I.14.a	Principe de base	9
I.14.b	Constitution du système	10
I.14.c	Caractéristiques.....	10
I.14.d	Avantage	11
I.14.e	Utilisations	11
I.15	La préparation des surfaces.....	12
I.16	La propreté	13
I.17	La rugosité	13
I.18	Le préchauffage.....	13
	Eau de mer.....	
I.19	La salinité	14
I.20	Composition de l'eau de mer	14

Sommaire

I.21	Mesure directe de la salinité	14
I.22	Mesures indirectes de la salinité.....	15
I.23	L'indice de réfraction.....	15
I.24	Le ph.....	15
I.25	Oxygène dissous.....	16
I.25.a	Mesure.....	16
I.26	Corrosion.....	16
I.27	Importance de la corrosion.....	17
I.28	Facteurs de corrosion.....	17
I.29	Morphologie de la corrosion.....	18
I.30	Méthodes de préventions contre la corrosion.....	20
I.31	Comportement à la corrosion du cuivre et des alliages de cuivres.....	21
Chapitre II : Matériaux et techniques Expérimentales		
	Introduction.....	
II.1	Matériaux utilisés	23
II.1.1	Substrat.....	23
II.1.2	Elaboration des échantillons	23
II.2.1	Paramètre de projection	24
II.2.2	Procédé d'élaboration arc électrique.....	24
II.3	Méthodes de caractérisation et Préparation des échantillons.....	25
II.3.1	Microscope optique	26
II.4.	Diffraction des rayons X (DRX).....	26
II.4.1	Caractérisation mécanique	27
II.5	Essai Rockwell	28
II.6	Profilomètre	29
II.7	L'essai de traction	30
II.8	Caractérisation électrochimique	31
II.8.1	L'électrode de travail.....	31

Sommaire

II.8.2	L'électrode de référence.....	32
II.8.3	L'électrode auxiliaire	32
II.8.4	Milieu d'essai.....	33
Chapitre III : Résultats et discussions		
	Introduction.....	
III.1	Analyse structural et microstructural	34
III.1.1	Analyse microstructural	34
III.1.2	caractérisation structurale d'un dépôt de cuivre.....	35
III.2	Caractérisation mécaniques.....	36
III.2.1	Dureté	36
III.2.2	Profilomètre	38
III.2.3	Essaie de traction.....	40
III.3	Caractérisation électrochimiques.....	47
III.3.1	Courbe anodique et cathodiques	47
III.3.2	Courbe de Tafel.....	48
III.3.3	Courbe perte de masses.....	50
III.3.4	Conclusion générale	

Liste des figures

Chapitre I

Étude bibliographiques

Figure I.1	Tableau périodique.	2
Figure I.2	Principe général de la projection thermique.....	5
Figure I.3	Schéma de principe de la projection à la flamme	7
Figure I.4	Fonctionnement de la projection flamme-fil.....	8
Figure I.5	schéma du principe de projection flamme poudre.....	8
Figure I.6	Schéma de fonctionnement de la projection à l'arc électrique.....	9
Figure I.7	Tableau de comparaison des différentes techniques de projection.....	12
Figure I.8	Tableau facteurs de corrosion	17
Figure I.9	schéma de corrosion uniforme	18
Figure I.10	Corrosion par piqûres.....	18
Figure I.11	Corrosion caverneuse	19
Figure I.12	Corrosion sous contrainte.	19
Figure I.13	Corrosion sous contrainte en présence d'une pression partielle de sulfure d'hydrogène.....	20

Chapitre II : Matériaux et techniques Expérimentales

Figure II.1	Echantillon utilisé pour la projection.....	24
Figure II.2	Schéma de fonctionnement de la projection l'arc électrique	25
Figure II.3	Polisseuse mécanique.....	25
Figure II.4	microscope Optique.....	26

Liste des figures

Figure II.5	Essai Rockwell	29
Figure II.6	Schéma de principe d'un profilomètre optique	30
Figure II.7	Schéma de principe d'un essai de traction.....	31
Figure II.8	Dispositif de mesure d'une courbe de polarisation potentiodynamique.....	32
Figure II.9	La technique de la masse perdue.....	33

Chapitre III

Résultats et discussions

Figure III.1	Microscope électronique à balayage du revêtement de cuivre.....	34
Figure III.2	caractérisation structurale d'un revêtement de cuivre obtenus par diffraction aux rayons X.....	35
Figure III.3	dureté Rockwell pour le dépôt de Cu.....	36
Figure III.4	Histogramme de dureté Rockwell.....	37
Figure III.5	profil de rugosité de revêtement du cuivre après pulvérisation....	38
Figure III.6	graphique essai de traction substrat	40
Figure III.7	graphique essai de traction avec revêtement.....	42
Figure III.8	graphique comparatif essai de traction.....	45
Figure III.9	Courbes de polarisation cathodique (a) et anodique (b) des deux électrodes acier nu et acier revêtu en Cu.....	47
Figure III.10	Courbe de Tafel	49
Figure III.11	histogramme perte de masse avec revêtements.....	50
Figure III.12	histogramme perte de masse substrat.....	51
Figure III.13	histogramme comparatif perte de masse	52

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1	La composition chimique de l'acier E335.	23
Tableau II.2	paramètres de projection utilisée par l'entreprise	24

Introduction générale

Introduction général

Le dépôt de cuivre par projection thermique est un procédé largement utilisé dans divers secteurs industriels en raison des excellentes propriétés électriques, mécaniques et chimiques du cuivre. Comprendre le comportement électrochimique de tels dépôts est donc d'une grande importance pour assurer leur durabilité et leurs performances en présence de certains environnements, notamment l'eau de mer.

Ce mémoire porte sur une étude détaillée du comportement électrochimique des dépôts de cuivre produits par projection thermique. Pour ce faire, nous avons étudié plusieurs aspects clés du cuivre, notamment les propriétés cristallines, électriques, mécaniques et chimiques. De plus, nous avons exploré différentes techniques de projection thermique, en nous concentrant sur notre intérêt principal, la projection à l'arc électrique. Une partie importante de nos recherches porte également sur les environnements où les revêtements de cuivre sont susceptibles d'être exposés, en particulier l'eau de mer. Nous avons étudié les propriétés de l'eau de mer telles que sa salinité, sa composition chimique, son pH, l'oxygène dissous et les processus corrosifs que le cuivre peut subir. Nous avons également étudié les méthodes de protection contre la corrosion pour mieux comprendre et maîtriser les phénomènes de corrosion en milieu marin.

Le chapitre sur les matériaux et les études expérimentales détaille les matériaux utilisés dans les expériences, les paramètres de projection et les techniques de caractérisation utilisées. Des méthodes telles que la microscopie optique, la diffraction des rayons X, les essais de dureté, la caractérisation mécanique par profilométrie et essai de traction, et les techniques électrochimiques ont été utilisées pour évaluer le comportement électrochimique des dépôts de cuivre. Enfin, le chapitre « Résultats et discussion » présente les analyses structurales, microstructurales, mécaniques et électrochimiques que nous avons réalisées. Les courbes anodiques, cathodiques, Tafel et les courbes de perte de masse ont été étudiées pour évaluer les performances électrochimiques du dépôt de cuivre dans différents milieux de test.

En résumé, ce mémoire fournit un aperçu détaillé du comportement électrochimique des dépôts de cuivre projetés thermiquement. Les résultats obtenus contribuent à une meilleure compréhension des propriétés et des performances de tels revêtements, ouvrant la voie à de nouvelles applications et améliorations dans divers secteurs industriels.

Chapitre I :

Étude bibliographique

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Introduction

Le dépôt par projection thermique de cuivre est un processus électrochimique qui convertit l'énergie électrique en énergie thermique. Ce processus est utilisé pour déposer des revêtements de cuivre sur une variété de substrats pour une variété d'applications dans des domaines tels que l'industrie électronique et la fabrication de composants métalliques.

L'électrochimie est la science qui étudie la relation entre les phénomènes électriques et chimiques. Dans la projection thermique de cuivre, un processus électrochimique se produit lorsqu'un courant électrique traverse une électrode de cuivre, la chauffant à une température élevée et produisant un jet de particules de cuivre fondu.

Le dépôt de cuivre par pulvérisation thermique est une réaction électrochimique qui se produit à l'interface entre l'électrode de cuivre et le substrat sur lequel le cuivre est déposé. Cette réaction électrochimique est affectée par plusieurs facteurs, notamment la température, la vitesse de pulvérisation, la pression, la chimie de l'électrolyte et le type d'électrode.

En résumé, le dépôt de cuivre par pulvérisation est un processus électrochimique complexe qui convertit l'énergie électrique en énergie thermique pour déposer une couche de cuivre sur un substrat.

I.1 Classification des matériaux

Le cuivre est un élément chimique dont le symbole est Cu. Numéro atomique : 29, Poids atomique : 63,546 UMA (unité de masse atomique figure I.1). Le cuivre vient du mot latin cuprum, qui signifie "de l'île de Chypre".

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Tableau périodique des éléments chimiques. Le cuivre (Cu) est entouré d'un cercle rouge.

1 H Hydrogène																	2 He Hélium
3 Li Lithium	4 Be Béryllium											5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Néon
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	* Lanthanides	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Tungstène	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astate	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	** Actinides	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Uub Ununbium	113 Uut Ununtrium	114 Uuq Ununquadium	115 Uup Ununpentium	116 Uuh Ununhexium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium
		57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutécium	
		89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Américium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendélévium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium	

Figure I.1 : Tableau périodique.

I.2 Historique du cuivre

Bien que divers outils et objets de décoration en cuivre datant de 9 000 ans avant JC aient été découverts, des preuves archéologiques suggèrent que ce sont les premiers Mésopotamiens qui, il y a environ 5 000 à 6 000 ans, ont été les premiers à exploiter pleinement la capacité d'extraire et de travailler le cuivre.

I.3 Généralité sur cuivre

Métal de couleur rougeâtre, rouge ou rouge orangée, le cuivre possède une exceptionnelle conductivité thermique et électrique. Le métal très pur est résistant à la corrosion atmosphérique et marine, mais aussi très malléable, tenace et ductile, relativement mou.

Le cuivre est un élément simple, c'est-à-dire qu'il est composé d'un seul type d'atome, les atomes de cuivre. Ce n'est pas un alliage. Comme c'est un métal, le cuivre peut former des ions positifs.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Il est extrêmement durable et peut conserver son intégrité pendant des années. La malléabilité du cuivre lui permet d'être formé et transformé en formes et tailles uniques. Le cuivre peut rester intact après avoir été travaillé ; il conserve sa résistance de base et ne s'affaiblit pas après avoir été sollicité.

I.4 Propriétés cristallines du cuivre

Le cuivre natif cristallise dans le système cubique et ne présente pas de clivage.

I.5 Propriété électrique du cuivre

Outre l'argent, le cuivre est le meilleur conducteur d'électricité. Le cuivre a une conductivité de 100 % et, grâce aux avancées technologiques modernes, il peut même atteindre une conductivité de 101 % par rapport à sa propre norme lorsque l'oxygène est supprimé.

I.6 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du cuivre sont assez favorables à la mise en forme à chaud et à froid. Le cuivre et ses alliages présentent cette intéressante particularité que leurs caractéristiques mécaniques s'améliorent lorsque la température baisse. De là leur utilisation comme matériaux cryotechniques dans l'industrie des gaz liquéfiés. Du côté des hautes températures, au contraire, ils présentent deux inconvénients : la résistance à l'oxydation décroît avec la température et les caractéristiques mécaniques diminuent dès 200 degrés pour le cuivre pur. Les cupronickels et les cupro-aluminiums sont, parmi les alliages de cuivre, ceux qui résistent le mieux aux températures élevées. Pour ces alliages, la température limite est de l'ordre de 400 à 500 degrés selon le temps qu'ils demeurent à ces températures.

I.7 Propriétés chimiques

Le cuivre précède l'argent et l'or dans le sous-groupe b de la première colonne du tableau périodique des éléments. Neuvième des dix éléments de transition compris entre le calcium et le gallium, il est le premier à posséder une sous-couche 3 d complète. L'arrangement des électrons implique que le cuivre est normalement monovalent, et les sels cuivreux ressemblent en effet aux sels d'argent, auxquels ils sont souvent mêlés dans la nature. L'oxyde, le sulfure et les halogénures cuivreux ont une structure covalente prédominante. Ils cristallisent dans le système cubique du type de celui de la blende. Les halogénures sont facilement fusibles et sont semi-conducteurs. L'ion Cu^+ est incolore et diamagnétique. En raison de son rayon important (0,091 nm), il ne donne pas d'hydrates et ses complexes sont peu stables. D'une façon générale, les sels cuivreux sont instables en solution en raison de l'équilibre.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Les sels cuivriques anhydres cristallisés sont diversement colorés, mais la solution ammoniacale d'un sel cuivrique est toujours d'un beau bleu foncé, les hydrates ont une couleur bleue ou verte. Très stables, les complexes cuivriques (hydrates, amminés) sont tous paramagnétiques lorsqu'ils ont un électron célibataire et ont une structure dsp².

Métal noble, le cuivre, à l'inverse du fer, du zinc et du plomb, ne déplace pas l'hydrogène de ses solutions, et n'est donc pas soluble dans les hydracides. Il est soluble, en revanche, dans les acides oxydants (acide nitrique, acide sulfurique concentré et chaud). L'ammoniaque le dissout également en donnant une solution bleue connue sous le nom de « liqueur de Schweitzer ».

Le cuivre résiste bien à la corrosion atmosphérique et marine ; une longue exposition entraîne la formation d'une fine couche de carbonate basique d'un beau vert. C'est la patine de certains toits.

I.8 Application du cuivre

Le cuivre est utilisé dans de nombreux secteurs, tels que l'industrie de la construction (plomberie, toiture, construction navale et bardage), le secteur de l'énergie (centrales électriques et infrastructures électriques), celui de l'industrie, des transports ou des produits finis : dans de nombreux pays, c'est le principal composant des pièces de monnaie, accessoires pour le logement, chauffe-eau, etc.

Le secteur des biens de consommation (appareils électroménagers, instruments de climatisation et de réfrigération, électronique industrielle et commerciale, et informatique) représente 29 % de la consommation de cuivre, suivi par celui de la construction (25 %), de l'industrie (19 %), de la transmission électrique (15 %) et enfin des transports (12 %).

De fait, le cuivre est largement utilisé dans des applications à longue durée de vie, allant jusqu'à plusieurs décennies. On estime ainsi que les deux tiers du cuivre produit depuis 1900 étaient encore utilisés en 2010. Par conséquent, la période pendant laquelle le cuivre peut rester immobilisé dans des produits encore en service constitue un obstacle majeur à sa réutilisation. Ce métal n'est pas uniformément réparti dans la croûte terrestre.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Partie 2. La projection thermique

I.9 Principe de la projection thermique

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. La surface de base ne subit ainsi aucune fusion. L'adhérence du dépôt est mécanique. On présente le principe général (Figure I.2) de la projection thermique : la matière à déposer, sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma). Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir. [1]

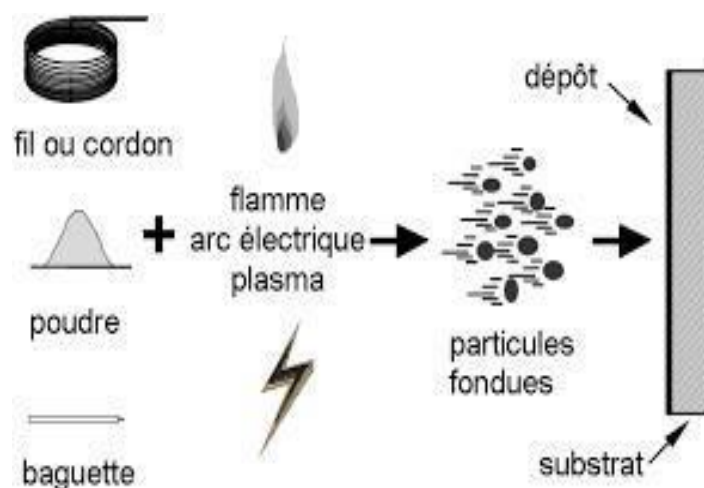


Figure I.2: Principe général de la projection thermique.

I.10 Différents types de procédés de projection thermique

Tous les procédés utilisent le même principe: fondre un matériau d'apport, puis le projeter grâce à un gaz vecteur. [2]

Deux types d'énergie sont utilisés comme source de chaleur :

✓la flamme ;

✓l'arc électrique.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

L'autre caractéristique commune à l'ensemble des procédés est la liaison avec le substrat qui est entièrement mécanique, avec cependant, dans quelques cas particuliers, inter diffusion entre dépôt et substrat.

I.11 Projection a flamme

L'utilisation de l'énergie d'une réaction chimique de combustion est un principe de base pour trois grandes techniques de projection à la flamme.

En fonction de la propagation de la réaction chimique différente technique sont utilisables. La projection à la flamme classique à une vitesse d'éjection des gaz de l'ordre de 100 à 150m/s.

La technique appelée HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) qui basée sur la combustion continue de gaz introduits sous pression à fort débit, ce qui conduit à en une

vitesse d'éjection variant entre 1500 et 2500 m/s. Enfin la projection par détonation : c'est un processus discontinu permettant d'utiliser l'énergie d'une détonation. La projection à la flamme est une technique largement employée dans le monde (Figure I.3)

compte tenu de sa simplicité et de son faible coût d'équipement. Les pistolets à flamme sont principalement utilisés pour projeter les matériaux sous forme de poudre, de fils ou de baguettes. Le principe est fondé sur l'introduction du matériau à déposer dans la flamme [figure I.3]. Les principaux mélanges de gaz enthalpiques sont : acétylène/oxygène, hydrogène/oxygène ou propane/oxygène. Ils permettent d'atteindre des températures de flamme de 3200°C, 2700°C et 2400°C respectivement à la stœchiométrie. Le projectile subit des échanges thermique et cinétique dans la flamme et est donc fondu et accéléré avant d'être déposé en fines gouttelettes («splats» en appellation anglaise) sur la surface à revêtir.

Les premiers matériaux utilisés étaient le plomb et le zinc pour des applications de protection anti-corrosion. Depuis, la gamme des matériaux ainsi que les applications ont été élargies. Des métaux pur comme Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo, des aciers y compris des aciers inoxydables, des alliages à base de Zn, Cu, Ni ou Sn, mais aussi des polymères peuvent être utilisés comme matériaux d'apport sous forme de poudre ou en fils. Des céramiques Al_2O_3 , $Al_2O_3-TiO_2$, Cr_2O_3 , ZrO_2-CaO sous forme de cordons ou de baguettes peuvent être aussi déposées en utilisant cette technique. [3]

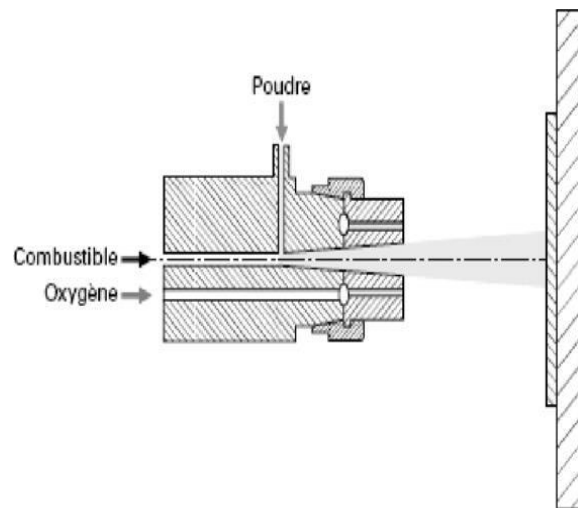


Figure I.3 : Schéma de principe de la projection à la flamme.

La technique propose de multiples solutions pour des problèmes d'usure, de corrosion, de protection thermique, etc., via la projection mais aussi le traitement par refusions des revêtements obtenus pour améliorer leurs propriétés. Cependant elle reste limitée à des matériaux dont la température de fusion est inférieure à celle de la flamme. La vitesse des particules varie entre 30 et 150 m/s, ce qui produit des taux des porosités relativement élevés (entre 5 et 10%) et une adhérence limitée. Le taux de dépôt varie de quelques kilogrammes par heure pour la projection de poudre jusqu'à quelques dizaines de kilogrammes par heure pour la projection de fil.

I.12 Projection flamme-fil

son principe consiste à introduire un matériau, sous forme de fil, cordon ou baguette, au centre d'une flamme oxy-combustible produite par un chalumeau et à le projeter sur le substrat (Figure I.4). Mais contrairement à ce dernier, la flamme est uniquement utilisée pour fondre le matériau d'apport, dont la projection des gouttelettes sur le support est assurée par un jet d'air comprimé qui atomise et propulse le matériau fondu. [4]

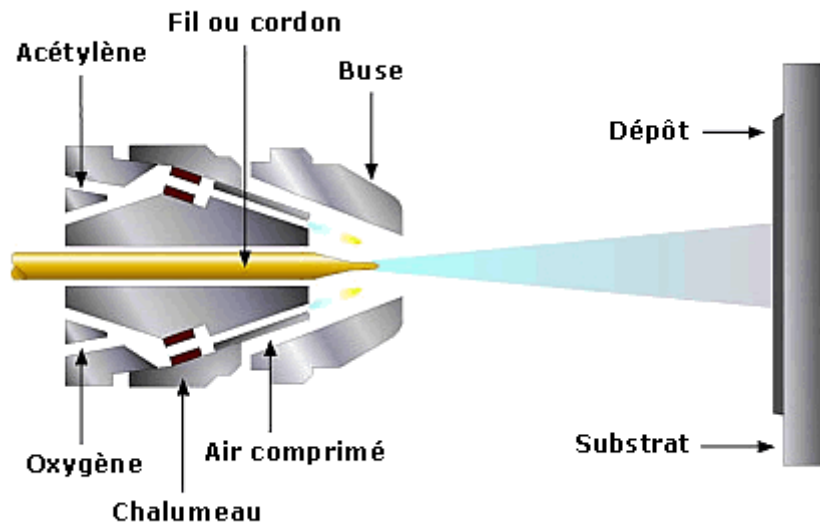


Figure I.4 : Fonctionnement de la projection flamme-fil.

I.13 Projection flamme poudre

Ce procédé est sans conteste le plus simple des procédés de projection thermique. Il utilise l'énergie d'une réaction chimique. Son principe consiste à introduire un matériau, sous forme de poudre, au centre d'une flamme oxy-combustible produite par un chalumeau et de le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (Figure I.5).

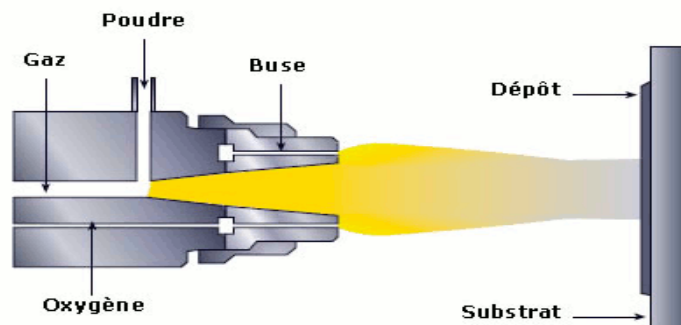


Figure I.5 : schéma du principe de projection flamme poudre.

I.14 Projection à l'Arc électrique

Le procédé de projection à arc électrique expérimenté par SCHOOP en collaboration avec BAUERLIN (ingénieur en électricité) est longtemps resté du domaine du laboratoire. Les

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

tentatives infructueuses étaient dues au fait que l'arc était utilisé comme source de chaleur pour fondre le métal dans un creuset, avant d'être pulvérisé par des gicleurs à air comprimé.

Plus tard, le système évolua vers un arc établi entre deux fils, isolés l'un de l'autre, avec une différence de potentiel d'environ 89 V qui fait fondre les fils.

Ce n'est qu'à partir de 1945 que le procédé connu un véritable développement et fût industriellement utilisé en Europe. Les pistolets développés par SCHOOP en 1914 ne diffèrent pas radicalement de ceux utilisés de nos jours.

I.14.a Principe de base

Son principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables d'un métal d'apport. Le métal fondu dans l'arc est ensuite atomisé et propulsé par un jet d'air comprimé sur le substrat (Figure I.6). Ce procédé diffère du procédé thermique à flamme du fait qu'il n'emploie aucune source de chaleur extérieure pour la combustion du fil d'apport. Le chauffage et la fonte se produisent entre les deux fils constituant le matériau d'apport. Tous deux chargés électriquement avec des polarités opposées et alimentés ensemble pour maintenir un arc constant.

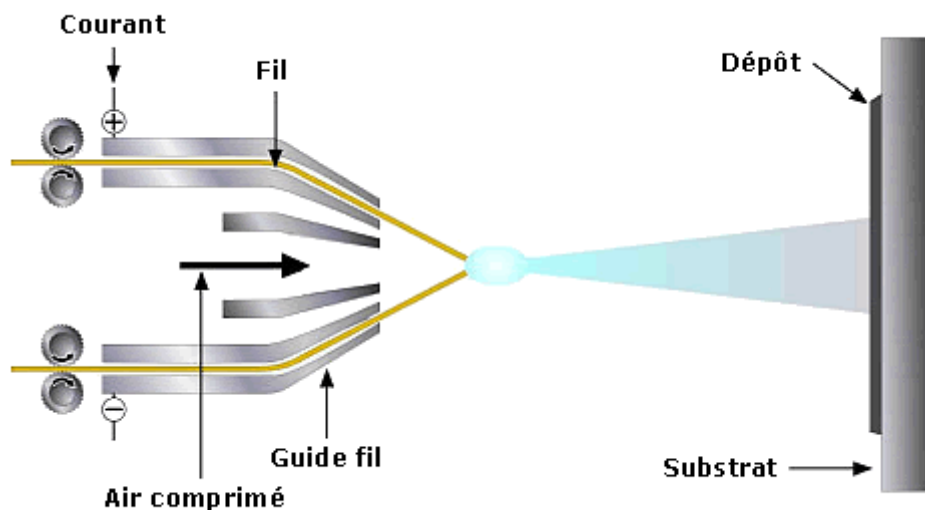


Figure I.6 : Schéma de fonctionnement du pistolet de la projection à arc électrique.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

I.14.b Constitution du système

L'alimentation

L'arrivée du courant électrique aux deux fils peut être obtenue au moyen de galets, de ruban sans fin ou de tubes de contact. L'alimentation provient généralement d'un générateur à courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 Volts, pour des intensités de courant allant de 100 à 500 Ampères. Dans le cas d'un entraînement du fil par moteur électrique, l'alimentation en fil est asservie à la tension de l'arc et les pistolets sont munis de stabilisateurs de tension.

Le pistolet

Il est essentiellement constitué de deux parties distinctes :

- la première sert à l'entraînement des fils, Les fils, conditionnés en bobines, sont tirés au travers de gaines souples, par des molettes entraînées par une turbine à air pour les appareils portables, ou par un moteur électrique pour les appareils fixes montés sur des machines. Dans le cas de fils très rigides, ou de grandes distances entre le pistolet et les bobines (supérieures à 5 m), il est nécessaire d'adjoindre un système d'entraînement des fils par poussée à l'entrée des gaines. Ce type d'équipement est communément appelé « poussé-tiré ».
- la seconde assure la fusion et la projection du métal fondu. À l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes permettant, d'une part, le positionnement du fil avant son entrée dans la zone de fusion et, d'autre part, la transmission du courant électrique aux fils. Une buse située derrière le point d'intersection des fils, dirige un flux de gaz comprimé à grande vitesse sur l'extrémité des fils en fusion, et propulse le matériau atomisé sur le substrat.

I.14.c Caractéristiques

La température de l'arc, d'environ 6000K dans l'air à pression ambiante, est largement au-dessus du point de fusion des matériaux projetés. Ceci peut entraîner une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes.

Cependant, cette dernière peut aider à créer des zones d'interaction métallurgiques dans le dépôt ou à l'interface dépôt/substrat et des zones de diffusion, améliorant ainsi sensiblement l'adhérence et la cohésion des dépôts.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

I.14.d Avantages

L'avance des fils à vitesse constante permet la projection en continu avec des débits de matières élevés (jusqu'à 40 kg/h suivant l'intensité et le diamètre des fils), ceci en dépit du caractère discontinu qu'induit la création et l'extinction de l'arc lors de la formation et de l'atomisation des gouttelettes. L'utilisation d'un gaz d'atomisation secondaire (gaz de gainage) permet une meilleure canalisation du jet des particules et l'augmentation de leurs vitesses d'impact, ce qui améliore les propriétés du dépôt. Il permet aussi de réduire l'entraînement de l'air ambiant et l'oxydation du dépôt.

Les dépôts obtenus avec ce procédé sont très adhérents (3 fois plus que la projection à la flamme), du fait des points où le revêtement est soudé au support par diffusion. Cette technique permet de réaliser des dépôts dont l'épaisseur varie entre 0,5 et 3mm. Son coût de mise en œuvre est relativement peu élevé par rapport aux procédés à la torche plasma ou à la flamme en raison d'une conception simple et nécessitant une maintenance réduite.

I.14.e Utilisations

La projection par arc électrique présente un meilleur rendement de dépôt par rapport aux autres procédés de projection, mais elle nécessite des matériaux conducteurs électriques et tréfilables. La plupart des matériaux métalliques tels que le Zinc, le Cuivre, l'Aluminium, le Bronze, l'Acier, le Molybdène, ainsi que de nombreux alliages peuvent être projetés par cette technique.

En raison d'une température d'arc élevée, la variété des matériaux métalliques déposables n'est limitée qu'à la fabrication des fils. Néanmoins, l'emploi de fils fourrés ductiles permet la projection d'alliages complexes et de composites techniques.

Les domaines d'applications sont l'anticorrosion et les rechargements, surtout pour les dépôts durs.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Tableau de comparaison des différentes techniques de projection

Caractéristiques	Flamme poudre	Flamme fil-cordon	Arc électrique
Source de chaleur	Flamme	Flamme	Arc électrique
Température de la source chaude (°C)	3000	3000	6000
Vitesse d'écoulement (m/s)	80 – 100	100 – 300	200 – 300
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Air comprimé
Vitesse des particules (m/s)	40	150	150
Forme du produit d'apport	Poudre	Fil-cordon	Fil
Taux horaire de dépôt (kg/h)	1 à 3	1 à 20	5 à 30
Taux d'oxyde (%)	6 – 12	4 – 8	1 – 10
Rendement moyen* (%)	50	70	80
Force d'adhérence (MPa)	20 à 40	20 à 40	40
Taux de porosité (%)	10 à 20	10 à 20	8 à 15
Epaisseur déposée (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,2 à 3
Exemples de matériaux d'apport	Métaux Cermets Céramiques	Métaux Cermets Céramiques	Métaux Fils fourrés

Figure I.7 : Tableau de comparaison des différentes techniques de projection.

I.15 La préparation des surfaces

La métallisation exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir. Si quelques fois on peut obtenir, avec des particules liquides et très chaudes des liaisons ponctuelles par fusion entre le projectile et le subjectile, cet accrochage reste toujours très insuffisant. En effet, que ce soit pendant les opérations d'usinage sur des pièces rechargées, ou au cours des sollicitations sur des pièces protégées contre la corrosion, les efforts mécaniques induits aux Revêtements engendreront son décollement.

Il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir:

✓ Une propreté qui est un état chimique.

✓ Une rugosité qui est un état physique.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

✓ Un préchauffage éventuel.

I.16 La propreté

La propreté est le constat visuel de la disparition plus ou moins importante des impuretés de toutes natures, pouvant souiller la surface d'un produit. Elle permet aussi de mettre à jour les modifications physiques éventuelles de la structure (défauts autres). Ou La métallisation exige, que la surface du support devant recevoir un futur revêtement, soit particulièrement propre, exempte de traces de calamine, de rouille, d'huile, ou de graisse, afin de ne pas nuire l'adhérence du métal d'apport. Cette propreté sera obtenue, suivant le type de polluant de la surface, soit par un dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le cas d'opération de protection anticorrosion.

I.17 La rugosité

Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire, mais pas suffisante. Il faut créer un accrochage mécanique entre le produit et le support. Celui-ci s'obtient par la réalisation d'une rugosité sur toute la surface.

La rugosité est le résultat de la modification micro géométrique d'une surface, provoqué par le bombardement intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage.

Dans les deux cas, le résultat a pour effet:

✓ D'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue de la surface.

✓ De créer un maximum d'aspérités, où le matériau déposé viendra s'ancrer. La rugosité est complémentaire de la propreté.

I.18 Le préchauffage

Comme nous l'avons vu précédemment, suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle du support, on obtiendra un accrochage plus ou moins important. Raison pour laquelle, un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence.

Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre et surtout pour les matières plastiques qui ne sont pas conductrices de chaleur. Le préchauffage peut aussi être employé

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile, que le nettoyage n'a pas atteint. Il permettra de faire sortir les liquides absorbés, afin que la métallisation adhère efficacement.

Partie 3. Eau de mer

I.19 La salinité

Par définition la salinité est la quantité de sel dissout par kilo d'eau de mer. Elle s'exprime en grammes par kilo [g/kg] ou, ce qui revient au même, en ppt (Part Per Thousand ou ‰) ou en PSU (Practical Salinity Unit). Il existe malheureusement plusieurs méthodes pour savoir combien notre eau contient de sel, dont certaines peuvent provoquer des erreurs de mesure.

I.20 Composition de l'eau de mer

L'eau de mer naturelle contient en moyenne 35 grammes de sel par kilo d'eau (35 ppt).

Une première remarque est que cette proportion ne dépend pas de la température : un kilo d'eau pèsera toujours un kilo que cette eau soit à 10 ou à 50°C n'y changera rien ; idem pour le sel quelle contient.

Une seconde remarque est qu'il s'agit d'une moyenne de tous les océans du globe, la teneur pouvant varier de 32 g/kg dans la mer Baltique à 39 g/kg dans la mer rouge, et je ne parlerai pas de la mer morte. Le sel contenu dans l'eau de mer est composé de divers ingrédients dont les principaux sont, en grammes pour un kilo d'eau

Il est à remarquer que le Chlorure de Sodium NaCl qui n'est autre que du sel de cuisine représente à lui seul 29,5 grammes sur 35 soit 84,4% de la totalité des sels dissouts.

Autre fait remarquable : si la quantité totale de sel varie d'un océan à l'autre, le rapport entre les différents éléments est constant ; par exemple, à l'exception de quelques endroits particuliers comme les estuaires, le potassium représente toujours 1,086% du sel total.

I.21 Mesure directe de la salinité

La première méthode qui vient à l'esprit pour mesurer cette salinité, est de laisser évaporer un kg d'eau salée et de peser le résidu qui subsiste mais elle ne fonctionne pas car certains Composés s'évaporent aussi au lieu de cristalliser.

Sachant que la proportion entre les éléments est constante, il suffit d'en mesurer un, par

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Exemple le potassium, pour connaître la teneur de tous les autres composants.

Cette méthode convient à l'eau de mer naturelle mais pas pour nos bacs dont la

Composition n'est pas uniforme ; par exemple certains ont trop de calcium, d'autres pas assez.

I.22 Mesures indirectes de la salinité

Ne sachant pas mesurer directement la salinité nous sommes obligés d'utiliser un autre moyen : mesurer un paramètre qui dépend de la salinité, par exemple l'indice de réfraction, la conductivité, le volume, le poids, ...

I.23 L'indice de réfraction

Quand un rayon lumineux passe d'un milieu transparent à un autre, par exemple de l'air à l'eau, le faisceau est dévié.

Cette déviation dépend de l'indice de réfraction des deux milieux traversés.

L'indice de réfraction de l'eau de mer dépend de la salinité.

Ainsi en mesurant l'indice de réfraction de l'eau de mer on peut en déduire sa salinité et c'est ce que fait un réfractomètre.

I.24 Le PH

Le potentiel hydrogène, noté PH, est une mesure de l'activité chimique des protons ou ions hydrogène en solution. Notamment, en solution aqueuse, ces ions sont présents sous forme d'ions hydronium. Le PH sert à mesurer l'acidité ou la basicité d'une solution. Ainsi, dans un milieu aqueux à 25 °C.

Eau de mer

Son PH est proche de 8,05-8,1, avec en moyenne 35 g L⁻¹ d'éléments minéraux, et pourrait descendre à 7,9 à la fin du siècle en rapport avec la montée du taux de CO₂ dans l'atmosphère. On définit la salinité en grammes de résidus solides par kg d'eau de mer, après conversion des carbonates en oxydes. La salinité moyenne des océans est de 34,7. Elle est plus forte en

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Méditerranée (environ 38), très élevée dans la Mer Morte (270), plus faible dans la Mer Noire (17,5) et dans la Caspienne (13) par suite des apports d'eau douce des grands fleuves.

I.25 Oxygène dissous

Le terme oxygène dissous est communément employé pour "dioxygène dissous". Lorsque l'on parle de cette mesure on fait exclusivement référence à l'oxygène moléculaire (O_2). Le dioxygène dissous est indispensable car il intervient dans la plupart des processus biologiques qui permettent la vie, sur terre comme en mer. La concentration en oxygène dissous dans l'eau résulte de paramètres physiques (température, salinité, mélange de la masse d'eau), chimiques et biologiques : échanges à l'interface terre-mer (gain ou perte), diffusion et mélanges au sein de la masse d'eau, photo-oxydation (perte), respiration des organismes aquatiques (perte), nitrification (perte), photosynthèse (gain). En son absence ou en dessous de certaines concentrations, des conséquences pouvant aller jusqu'à la mort des espèces vivantes sont observées.

I.25.a Mesure

Le meilleur moyen de mesurer l'oxygène dissous est de le faire directement dans l'eau à l'aide d'un capteur d'oxygène dissous calibré. L'oxygène dissous peut être mesuré en milligrammes par litre (mg/L) ou en pourcentage de la quantité calculée (ou prévue) à la saturation, appelée saturation en oxygène dissous.

L'oxygène dissous est influencé par : la température de l'eau, la croissance des algues (p.ex. la chlorophylle)

L'oxygène dissous influence : les formes et la toxicité de certains métaux (par exemple les métaux dissous) et les concentrations de certains constituants chimiques (. le sulfure et l'ammoniac)

I.26 Corrosion

La corrosion désigne l'altération d'un matériau par réaction chimique avec un oxydant (le dioxygène et le cation H^+ en majorité). Il faut en exclure les effets purement mécaniques (cela ne concerne pas, par exemple, la rupture sous l'effet de chocs), mais la corrosion peut se combiner avec les effets mécaniques et donner de la corrosion sous contrainte et de la fatigue-corrosion ; de même, elle intervient dans certaines formes d'usure des surfaces dont les causes sont à la fois physicochimiques et mécaniques.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

I.27 Importance de la corrosion

Elle présente une grande importance étant donné les conséquences qu'elle a dans des domaines très variés de l'activité humaine. Dans le domaine économique, par exemple, les dommages causés par la corrosion ont une incidence non négligeable sur l'établissement des prix de revient. C'est ainsi que l'on estime à 20 % environ de la production la quantité d'acier qui est chaque année utilisée pour le remplacement des installations de toutes sortes détruites par la corrosion. Le remplacement du matériel corrodé constitue donc, pour l'industrie en particulier, une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations, nécessaire pour effectuer les réparations.

La corrosion détruit $\frac{1}{4}$ de la production mondiale annuelle d'acier soit environ 5 tonnes par seconde.

I.28 Facteurs de corrosion

Liés au matériau	Liés à la surface	Liés au milieu
Composition	Orientation des grains	Composition
Structure cristallographique	Film superficiel	Teneur en oxygène
Taille des grains	Composition de la surface	Différence d'aération
Texture*	Précipités et inclusions émergeant en surface	pH
Etat de déformation	Rugosité	Température
Contraintes résiduelles	Ségrégations intergranulaires	Cyclage thermique
Gradient thermique		Gradient thermique
Appauvrissement ou enrichissement (précipités) aux joints de grains et/ou dans les zones voisines		Agitation et écoulement
		Contraintes appliquées (statiques et dynamiques)
		Bactéries
		Complexants
		Irradiation

Figure I.8 : Tableau facteurs de corrosion.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

I.29 Morphologie de la corrosion

Corrosion généralisée (uniforme) :

Ce type de corrosion, qui est le plus connu, est également le plus facile à repérer et à prévoir. Il est peu courant – mais pas impossible – que la corrosion généralisée entraîne des défaillances catastrophiques. Pour cette raison, la corrosion généralisée est souvent davantage perçue comme une pollution visuelle que comme un problème grave. La corrosion généralisée attaque une surface métallique d'une manière relativement uniforme (Figure I.10). La diminution progressive de l'épaisseur de paroi d'un composant doit être prise en compte dans le calcul des pressions nominales.



Figure I.9 : corrosion uniforme.

Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûres engendre la formation de petites cavités à la surface d'un matériau (Figure I.11). Ces piqûres, bien que généralement décelables en procédant à un examen visuel approfondi, peuvent devenir suffisamment profondes pour perforer la paroi d'un tube. La corrosion par piqûres s'observe le plus souvent à des températures élevées dans des milieux à forte teneur en ions chlorure.

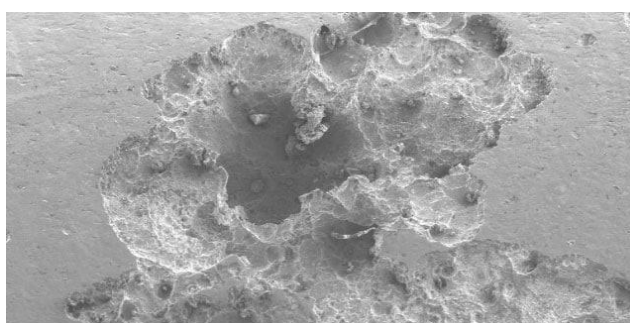


Figure I.10 : Corrosion par piqûres.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Corrosion caverneuse :

Dans un système fluide, des anfractuosités sont généralement présentes entre les tubes et les supports ou les colliers qui les soutiennent, entre deux tronçons de tube adjacents ou sous la boue ou les dépôts qui ont pu s'accumuler sur des surfaces (Figure I.12). Il est pratiquement impossible de l'éviter, mais lorsque ces anfractuosités sont de petite taille, le risque de corrosion devient très important.

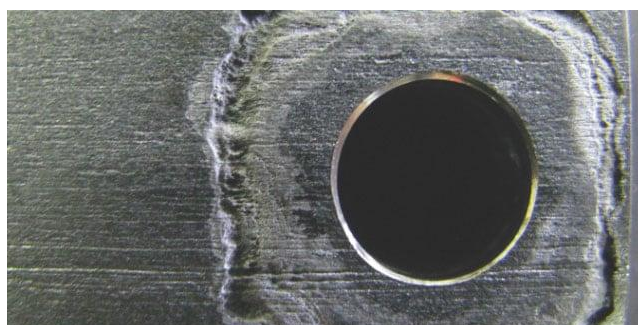


Figure I.11 : Corrosion caverneuse.

Corrosion sous contrainte dans les fluides contenant des ions chlorures:

La corrosion sous contrainte (SCC) est dangereuse, car elle peut entraîner la destruction d'un composant à des niveaux de contraintes très inférieurs à la limite d'élasticité d'un alliage. En présence d'ions chlorure, les aciers inoxydables austénitiques sont sujets à ce type de corrosion. Les ions réagissent avec le matériau au fond d'une fissure – là où les contraintes de traction sont les plus fortes – ce qui favorise l'élargissement la fissure. Une fois amorcée, la corrosion sous contrainte peut s'avérer difficile à déceler : une défaillance définitive du composant concerné peut alors survenir soudainement (Figure I.13).



Figure I.12 : Corrosion sous contrainte.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

Corrosion sous contrainte en présence d'une pression partielle de sulfure d'hydrogène :

La corrosion sous contrainte due aux gaz sulfureux a pour effet de dégrader un métal en contact avec de l'hydrogène sulfuré (H₂S) dans une atmosphère humide. En présence d'eau, l'hydrogène sulfuré (ou sulfure d'hydrogène - H₂S) devient extrêmement corrosif. Cette situation peut conduire à une fragilisation du matériau et aboutir à une fissuration sous l'action conjuguée de contraintes de traction et de la corrosion (Figure I.14).



Figure I.13 : Corrosion sous contrainte en présence d'une pression partielle de sulfure d'hydrogène.

I.30 Méthodes de préventions contre la corrosion

La façon la plus simple d'empêcher la corrosion est d'utiliser un type de métal qui résiste à la corrosion, comme l'acier inoxydable ou l'aluminium. Les innovations constantes et le développement de nouveaux alliages de nickel, d'acier et de titane rehaussent les niveaux de protection contre la corrosion.

Méthodes pour prévenir la corrosion :

L'utilisation de revêtements,

La propreté de l'environnement de travail,

L'oxydation volontaire et contrôlée des pièces,

L'utilisation de solutions électrochimiques,

Le remplacement du métal par d'autres matériaux plus résistant à la corrosion.

CHAPITRE 1: Etude Bibliographique

I.31 Comportement à la corrosion du cuivre et des alliages de cuivres

Le cuivre se corrode au contact de l'air. Il se couvre d'une couche verdâtre appelée vert-de-gris. Cette couche est imperméable et isole le cuivre de l'air et des réactifs responsables de sa corrosion. La corrosion du cuivre s'arrête donc dès l'apparition du vert-de-gris.

Le cuivre et ses alliages ne sont pas attaqués par l'eau ni par un grand nombre de produits chimiques : tuyaux en cuivre, récipients, conteneurs, robinetterie, toitures. En milieu marin, on l'allie à l'aluminium ou au nickel pour lui donner une bonne résistance à l'agression contre l'eau de mer. Les pompes et canalisations d'eau de mer, dont les débits atteignent parfois plusieurs m³ par seconde (plateformes pétrolières off-shore, navires, centrales électriques de bord de mer sont en cupro-aluminium ou cupro-nickel). Les bronzes et laitons résistent mieux à l'eau de mer seulement si le pourcentage de cuivre est plus grand que 70. La dégradation des cuivres dans les milieux contenant de l'oxygène est souvent due aux courants électriques résultant de l'inégalité d'accès de l'oxygène aux différentes parties de la surface du métal. Dans les chaudières par exemple, la corrosion est alors due à la soude caustique qui se forme dans l'eau.

Chapitre II :

Matériaux et Etudes Expérimentales

CHAPITRE II: Matériaux et études expérimentales

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons dans un premier temps le dispositif expérimental de projection thermique utilisé pour le développement du dépôt, et dans une seconde partie nous présenterons différentes techniques de caractérisation : analyse microstructurale et caractérisation mécanique basée sur des essais de microdureté Rockwell, caractérisation électrochimique et essai de traction de nos échantillons.

II.1 Matériaux utilisés

II.1.1 Substrat

Le substrat utilisé, dans cette étude, est un acier de nuance E335 relatif à un acier à base de carbone non allié d'usage construction mécanique. Le substrat est de forme cylindrique de diamètre 10 mm et de longueur 20 mm, Sa composition chimique est donnée dans le tableau ci-dessous.

Eléments	Mn	Cu	C	Si	S	Mo	Ni	Fe
Compositions (%)	0,231	0,119	0,1	0,044	0,01	0,007	<0,03	Bal

Tableau II.1 : La composition chimique de l'acier E335.

II.1.2 Elaboration des échantillons

Les échantillons utilisés pour la projection thermique, ont été usinés sur le tour parallèle au niveau du hall de technologie où on a effectué :

Un dressage, pour avoir un bon état de surface, de la structure à revêtir ;

Un épaulement, dans le but de fixer les pièces, lors de la projection ;

Un chanfreinage, dont le but d'avoir un contact parfait entre le revêtement et de la surface antagoniste. [5]

Les échantillons élaborés présentent la forme suivante :

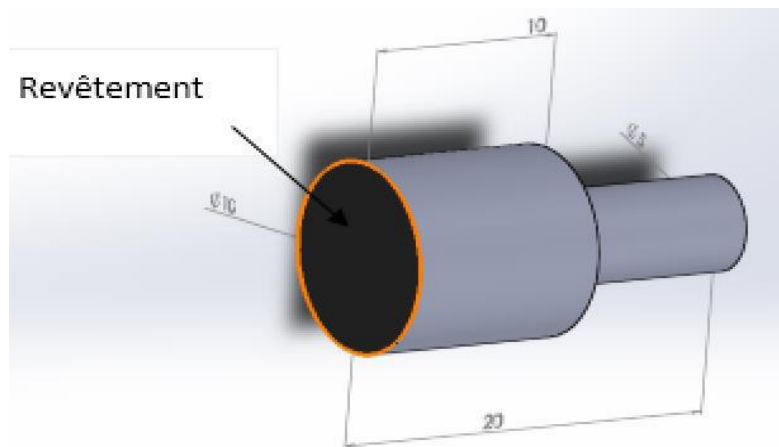


Figure II.1 : Echantillon utilisé pour la projection.

II.2.1 Paramètre de projection

Les différents dépôts ont été obtenus selon les paramètres de projection utilisés par l'entreprise, ils sont résumés dans le tableau suivant :

Paramètres de projection	
Pression de l'air (bar)	4
Pression de l'oxygène (bar)	4
Pression du gaz acétylène (bar)	0,7
Distance de projection (mm)	150

Tableau II.2 : paramètres de projection utilisé par l'entreprise.

II.2.2 Procédé d'élaboration arc électrique

Son principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables d'un métal d'apport. Le métal fondu dans l'arc est ensuite atomisé et propulsé par un jet d'air comprimé sur le substrat. Ce procédé diffère du procédé thermique à flamme du fait qu'il n'emploie aucune source de chaleur extérieure pour la combustion du fil d'apport. Le chauffage et la fonte se produisent entre les deux fils constituant le matériau d'apport. Tous deux chargés électriquement avec des polarités opposées et alimentés ensemble pour maintenir un arc constant.

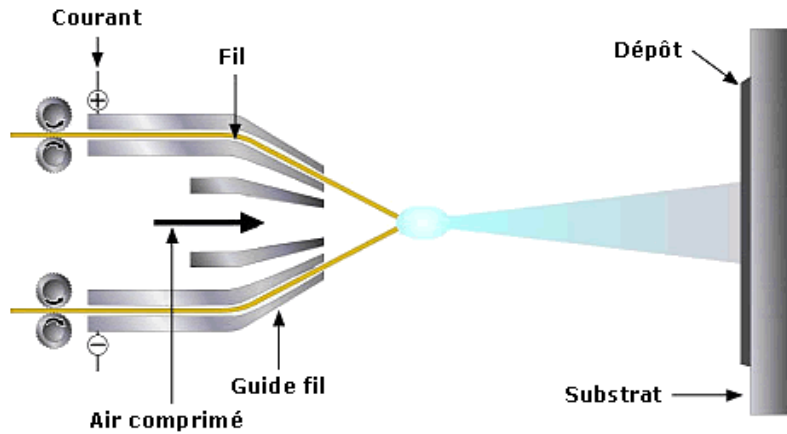


Figure II.2 : Schéma de fonctionnement du pistolet de la projection l'arc électrique.

II.3 Méthodes de caractérisation et Préparation des échantillons

Pour obtenir une surface agréable pour toutes les caractérisations, il nécessite un polissage fin de la surface de la coupe du dépôt à observer. Le polissage mécanique est obtenu en utilisant une polisseuse qui vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface à l'aide de papiers abrasifs de carbure de silicium (SiC), de différentes granulométries de plus en plus faible (180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000 grains /cm²). Puis une finition a été faite sur du papier à pâte diamantée.



Figure II.3 : Polisseuse mécanique.

CHAPITRE II: Matériaux et études expérimentales

II.3.1 Microscope optique

La microscopie optique permet d'obtenir des informations sur les éléments constitutifs des microstructures telles que la texture, la dimension des grains et les différentes phases présentes.

Afin de rendre ces éléments visibles à partir d'une surface polie. Le microscope optique utilisé dans cette étude est de marque PHYWE, permet l'observation des échantillons avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000 fois. L'avantage de la microscopie optique c'est qu'elle nous permet l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Mais vu son faible résolution, il n'est possible de l'utiliser pour une observation fine des objets rugueux ou de petites tailles.

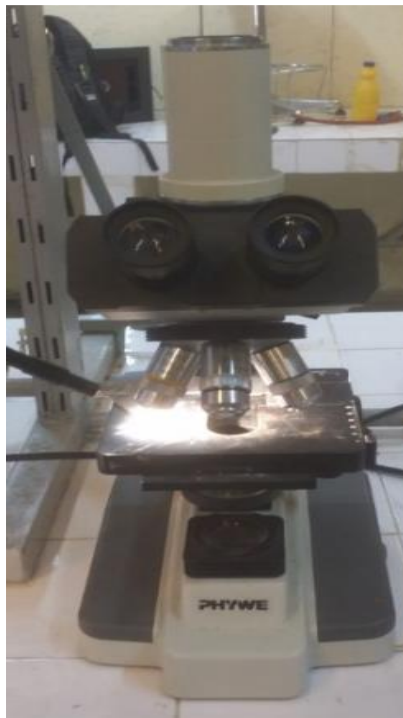


Figure II.4 : Microscope Optique.

II.4 Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X a été utilisée afin de révéler la présence de certaines phases (ferrite, austénite...) dans nos échantillons. La direction des faisceaux diffractés correspond à la diffusion élastique par une famille de plans (hkl) et vérifie la loi de Bragg :

$$2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} = \lambda$$

CHAPITRE II: Matériaux et études expérimentales

La connaissance de λ (imposée par la source) et la mesure de θ permet d'identifier la famille de plans diffractant. En inclinant l'échantillon face à la source, on peut ainsi faire diffracter tous les plans possibles et identifier les phases présentes dans l'acier (ferrite, martensite, austénite...).

En fait, la distinction entre ces phases est parfois difficile. En principe, la martensite se distingue de la ferrite par un dédoublement des pics dû à sa tétragonalité qui dépend de la teneur en carbone. Cependant, ce dédoublement peut être noyé dans la largeur intrinsèque des pics.

L'analyse par diffraction des rayons X nécessite une surface polie miroir (polissage mécanique jusqu'au micron). De plus, en raison de la faible pénétration des rayons X dans l'acier (quelques μm), un polissage électrolytique est recommandé afin d'éliminer la couche superficielle écrouie par le polissage. En effet, dans cette couche écrouie, l'austénite résiduelle a pu être déstabilisée par la déformation plastique et les contraintes dues à la préparation.

II.4.1 Caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique en projection thermique est une étape importante pour évaluer la qualité et les performances des revêtements thermiques produits par cette technique. La caractérisation mécanique consiste à mesurer les propriétés mécaniques du revêtement, telles que sa résistance à la traction, sa dureté, sa résistance à l'usure et à la corrosion, entre autres.

La résistance à la traction est une mesure de la force nécessaire pour casser ou déformer un matériau en traction. Elle est généralement mesurée à l'aide d'un équipement de test de traction. La résistance à la traction est importante pour évaluer la résistance du revêtement aux forces de traction, qui peuvent être générées lors de l'utilisation du matériau.

La dureté est une mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration. Elle peut être mesurée à l'aide d'un testeur de dureté, qui mesure la résistance du matériau à l'indentation. La dureté est importante pour évaluer la résistance du revêtement aux rayures et à l'usure.

La résistance à l'usure est une mesure de la capacité d'un matériau à résister à l'usure causée par le frottement et l'abrasion. Elle peut être mesurée à l'aide d'un test de résistance à l'usure, qui mesure la résistance du revêtement à l'usure et à l'abrasion. La résistance à l'usure est importante pour évaluer la durabilité du revêtement et sa capacité à résister à des conditions d'utilisation difficiles.

CHAPITRE II: Matériaux et études expérimentales

La résistance à la corrosion est une mesure de la résistance d'un matériau à la corrosion. Elle peut être mesurée à l'aide de tests de corrosion, qui exposent le revêtement à des environnements corrosifs et mesurent la perte de poids ou la formation de corrosion. La résistance à la corrosion est importante pour évaluer la capacité du revêtement à résister à des environnements corrosifs, tels que des milieux acides ou salins.

En résumé, la caractérisation mécanique en projection thermique est importante pour évaluer la qualité et les performances des revêtements thermiques. Elle consiste à mesurer les propriétés mécaniques du revêtement, telles que la résistance à la traction, la dureté, la résistance à l'usure et à la corrosion. Les données obtenues à partir de ces tests peuvent être utilisées pour optimiser la production du revêtement et garantir sa qualité et sa durabilité.

II.5 Essai Rockwell

Principe de l'essai : le pénétrateur peut être une bielle en acier trempé, ou un cône en diamant, et la charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs. La dureté définie à partir de la différence de profondeur de pénétration après application de la charge. Le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce avec une pré charge F_0 . Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures.

Une surcharge F_1 est appliquée, pour atteindre la valeur de la charge totale F .

La surcharge est retirée, entraînant une remontée du pénétrateur (retour élastique).

On mesure alors à l'aide d'un comparateur l'accroissement h de la profondeur de pénétration, entre le début et la fin de l'essai sous pré charge F_0 .

La dureté Rockwell, noter HRC, est un nombre sans dimension compris entre 0 et 100 (ou 130), défini comme le complément de h à une profondeur de référence de 0.2mm (respectivement 0.26mm) Partagée en cent (respectivement 130) graduation identiques.

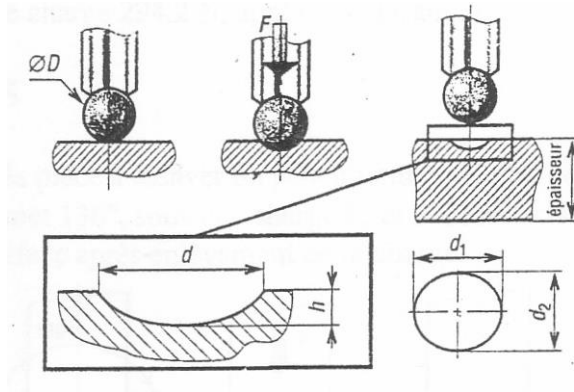


Figure II.5 : Essai Rockwell.

II.6 Profilomètre

Le profilomètre est un outil de mesure qui permet de mesurer la rugosité et le profil de surface d'un matériau. Dans le contexte de la projection thermique, le profilomètre est utilisé pour caractériser la qualité des revêtements thermiques en mesurant la rugosité et le profil de surface du revêtement.

La rugosité est une mesure quantitative des irrégularités de surface, qui peut être utilisée pour évaluer la qualité du revêtement en termes de planéité, de régularité et de finition de surface. La rugosité est généralement mesurée à l'aide d'un profilomètre optique, qui utilise un faisceau laser pour balayer la surface du revêtement et enregistrer les variations de hauteur de la surface. Les données de hauteur enregistrées peuvent ensuite être analysées pour déterminer la rugosité de surface.

Le profil de surface est une mesure qualitative de la forme de surface, qui peut être utilisée pour évaluer la qualité du revêtement en termes de planéité, de régularité et de forme de la surface. Le profil de surface est généralement mesuré à l'aide d'un profilomètre à contact, qui utilise une pointe de mesure pour balayer la surface du revêtement et enregistrer les variations de hauteur de la surface. Les données de hauteur enregistrées peuvent ensuite être analysées pour déterminer le profil de surface.

En mesurant la rugosité et le profil de surface du revêtement thermique, le profilomètre peut aider à identifier les zones du revêtement qui présentent des problèmes de qualité, tels que des zones présentant une rugosité excessive, des zones creuses, des zones de faible densité ou des zones présentant des défauts de surface. Cette information peut être utilisée pour améliorer la qualité du revêtement et optimiser sa performance.

CHAPITRE II: Matériaux et études expérimentales

En résumé, le profilomètre est un outil de mesure important pour caractériser la qualité des revêtements thermiques dans la projection thermique. Il permet de mesurer la rugosité et le profil de surface du revêtement, ce qui est essentiel pour comprendre les propriétés du revêtement et améliorer sa performance et sa durabilité. Les données de mesure peuvent être utilisées pour identifier les zones de problèmes de qualité et optimiser la production du revêtement. [6]

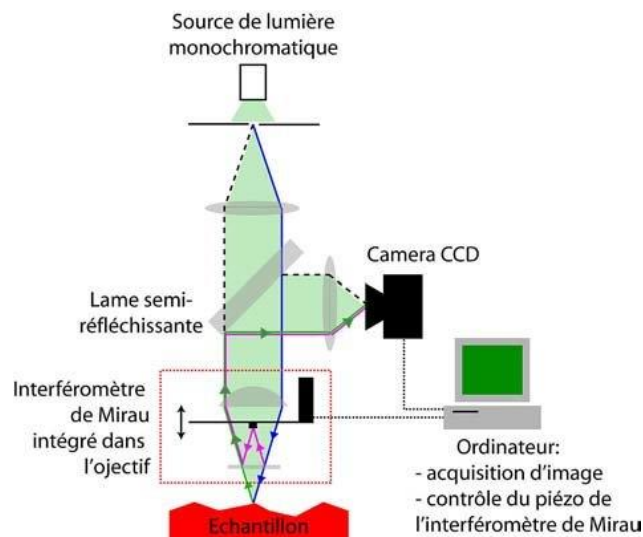


Figure II.6 : Schéma de principe d'un profilomètre optique.

II.7 L'essai de traction

L'essai de traction constitue l'essai mécanique le plus classique et le mieux étudié, il consiste à exercer sur une éprouvette, une force croissante ou une déformation constante qui va la déformer progressivement et la rompre.

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet de : déterminer le comportement élastique d'un matériau ; mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau ; et ce dans un état de contrainte uniaxiale. [7]

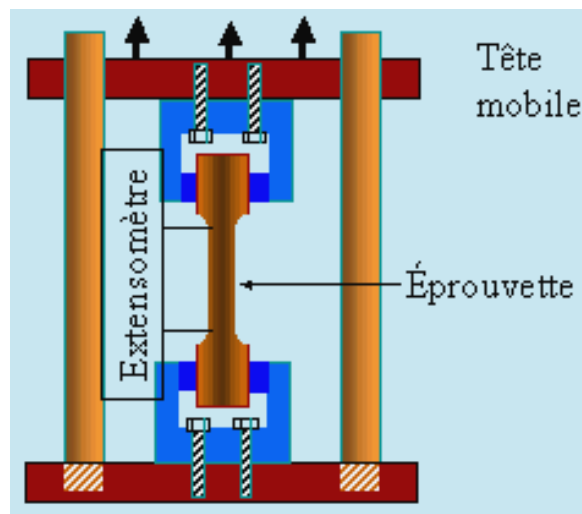


Figure II.7 : Schéma de principe d'un essai de traction.

II.8 Caractérisation électrochimique

La caractérisation des dépôts étudiés est déterminée par le tracé des courbes du potentiels libre, et de polarisation courant/potentiel en mode semi-logarithmique, qui donnent en outre accès aux paramètres cinétique des réactions d'oxydoréduction du processus de corrosion, à savoir le courant de corrosion, le potentiel de corrosion et les paramètres de Tafel anodiques et cathodiques. La corrosion d'un matériau est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécaniques sous l'effet de l'environnement immédiat.

Les tracés des courbes de potentiel d'abondant, et de polarisation sont effectués à l'aide d'un potentiostat de type PGP201 piloté par ordinateur grâce au logiciel Voltmaster 4 et d'une cellule électrochimique de 100ml en verre PYREX à double parois (thermostaté).

La cellule électrochimique contient trois électrodes : l'électrode de travaille, l'électrode de référence et l'électrode auxiliaire. [8]

II.8.1 L'électrode de travail

C'est un échantillon de 0.8cm² de surface constituée d'un dépôt à base nickel sur un acier doux ordinaire. Le contact électrique est assuré par l'intermédiaire d'un fil conducteur, la face arrière de l'échantillon est enrobée par une résine époxy mélangée à un durcisseur de manière à laisser exposer au milieu corrosif que la surface du dépôt de nickel.

II.8.2 L'électrode de référence

Le potentiel E de l'électrode de travail est repéré par rapport à une électrode de référence au calomel saturé de KCl (ECS). Celle-ci schématisée par la chaîne électrochimique :

$Hg/Hg_2Cl_2/KCl$ saturé. La demi-équation d'oxydoréduction associée au couple Hg_2Cl_2/Hg est: $Hg_2Cl_2(s) + 2e \rightarrow 2Hg(l) + Cl^{2-}$ L'électrode de référence utilisée est de marque Radiometer analytical son potentiel par rapport à l'électrode normale à hydrogène à $25^\circ C$ est de

$$E = 0.244v.$$

II.8.3 L'électrode auxiliaire

C'est une électrode de marque Radiometer analytical, elle est constituée d'une plaque de platine, son rôle est d'assurer le passage du courant électrique dans un montage à trois électrodes.

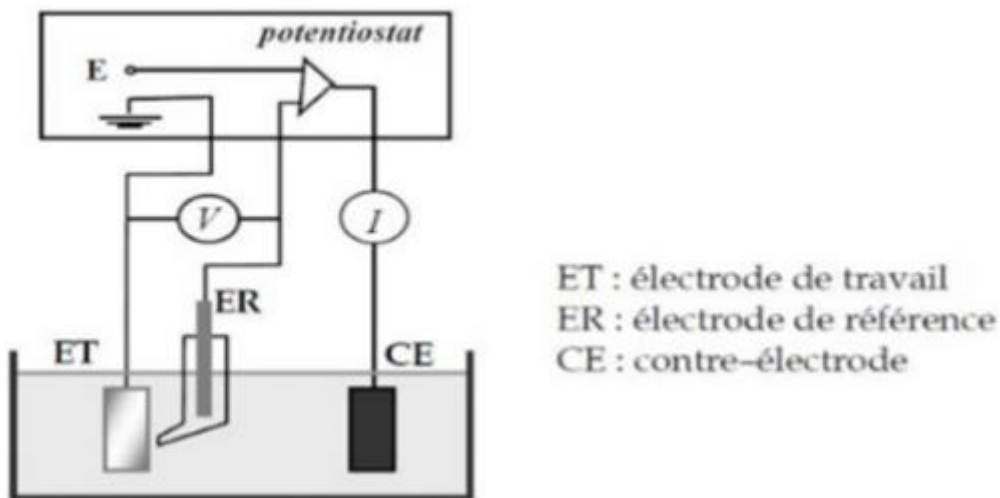


Figure II.8 : Dispositif de mesure d'une courbe de polarisation potentiodynamique.

II.8.4 Milieu d'essai

Les mesures de perte de poids sont une première approche de l'étude de la corrosion d'un métal dans une solution marine. Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple et de ne pas nécessiter un appareillage important. Cette méthode consiste à mesurer la perte de masse Δm des échantillons substrat et du dépôt de cuivre pendant un temps d'immersion de l'échantillon dans une solution corrosive. Cette méthode dont le dispositif est représentée par la figure. (II.9) nécessite de laboratoire suivant :

- Échantillons en aciers
- Béchers
- Balance de précision de sensibilité de 0.0001g
- solution marin



Figure II.9: La technique de la masse perdue

Chapitre III :

Résultats et discussions

Introduction

Après avoir en revue les matériaux étudiés, les méthodes de caractérisation ainsi que les équipements mis en œuvre, nous présenterons dans le présent chapitre les résultats obtenus par les différentes techniques et leurs interprétations.

III.1 Analyse structural et microstructural

Les microstructures de dépôt ont été réalisées en utilisant le microscope électronique à balayage (MEB).

III.1.1 Analyse microstructural

La figure III.1 montre la morphologie d'un revêtement de cuivre obtenus par projection thermique en utilisant la Microscopie électronique à balayage.

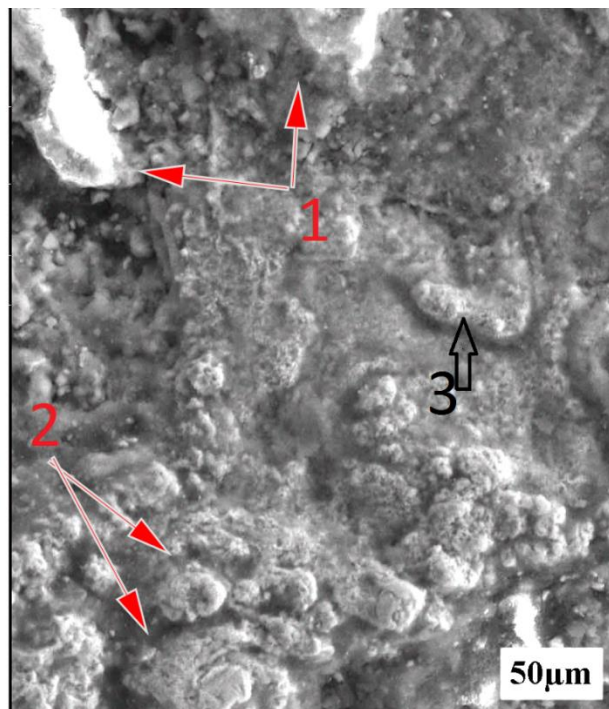


Figure III.1 Microscope électronique à balayage du revêtement de cuivre.

Les observations au MEB des dépôts de cuivre élaborés par la projection arc électrique montrent une microstructure dense, compacte, complexe formée de plusieurs phases (1 et 2) avec la présence de porosités et de particules non fondus (3). Cette microstructure est constituée par des lamelles et des pores globulaires et ne présente pas de fissures.

III.1.2 : caractérisation structurale d'un dépôt de cuivre

La diffraction des rayons X est un outil qui permet de mettre en évidence du changement de structure cristalline. La figure (III.2) représente le spectre de diffraction X du dépôt de cuivre

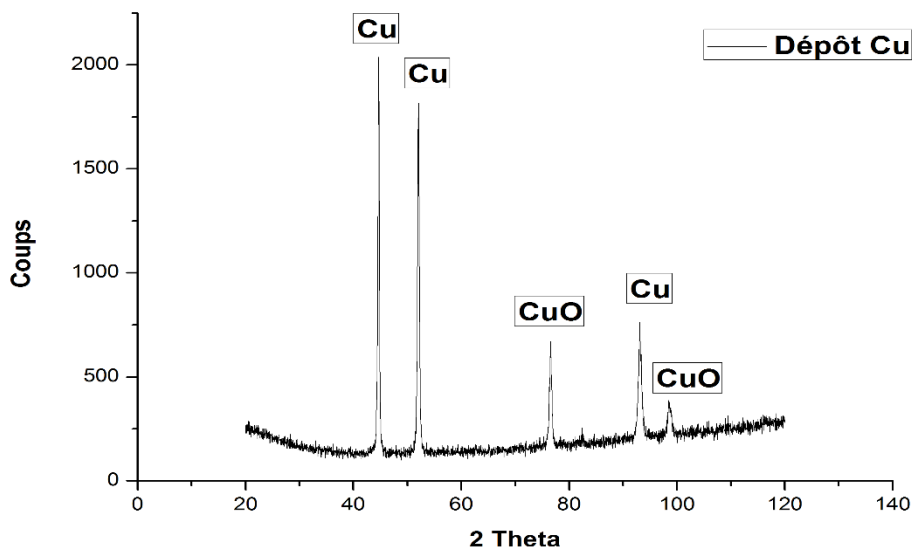


Figure III.2 caractérisation structurale d'un revêtement de cuivre obtenus par diffraction aux rayons X.

La surface du revêtement soigneusement polie jusqu'à la pâte diamantée et nettoyée aux ultra-sons dans de l'éthanol, a été explorée par DRX obtenu (figure III.2). Le spectre de diffraction X correspondent aux angles de diffraction suivant : 2θ , 5° , 83° , 98° , 116° ont révélé la présence des mêmes pics caractéristiques

- D'une phase majoritaire Cu de structure cubique de paramètre de mail $a=b=c=3.5175\text{\AA}$.

- La présence de phases secondaires CuO de structure cubique avec des paramètres de mail $a=b=c=2.8787\text{\AA}$

La présence des oxydes dans le revêtement est tout à fait attendue du fait que d'une part la projection du métal fondu se fait sous pression d'air et d'autre part chaque particule liquide de

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

l'alliage enveloppée d'une pellicule d'air tout le long de son envol va continuer son oxydation avec le piégeage de l'oxygène après son écrasement sur la cible.

III.2 Caractérisation mécaniques

III.2.1 Dureté

La figure III.3 montre le graphique d'un test de dureté Rockwell sur un échantillon revêtu.

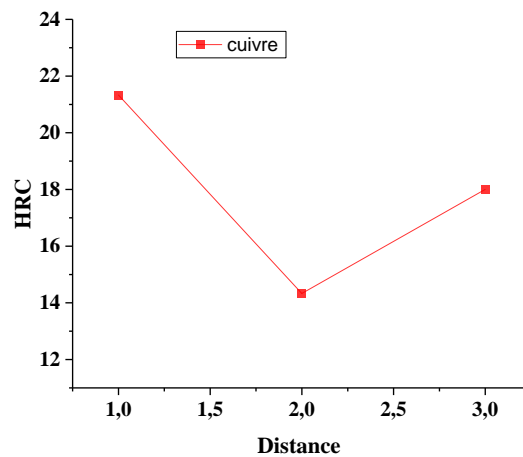


Figure III.3 dureté Rockwell pour le dépôt de Cu.

En examinant le graphique qui traduit la dureté Rockwell sur l'échantillon revêtu en cuivre on remarque l'apparition de points essentiels :

Premier point (1mm; 21.33HRC) : La valeur de dureté à une distance de 1 mm du début de la partie cuivrée est de 21,33 HRC. Cela indique que le cuivre à cet endroit particulier est modérément mi dur. Le cuivre présente une certaine résistance à la déformation plastique, ce qui peut avoir un impact positif sur la durabilité des pièces et la résistance à l'usure.

Deuxième point (2mm; 14.33HRC) : La valeur de dureté à une distance de 2 mm du début de la partie cuivrée est de 14,33 HRC. Cette valeur est inférieure au premier point, indiquant une baisse de dureté juste à ce point. Une dureté inférieure peut indiquer une meilleure ductilité du cuivre;

Troisième point (3mm; 18HRC) : la valeur de dureté est de 18 HRC. Par rapport au premier point, la dureté est ici réduite. Les valeurs de dureté inférieures peuvent être attribuées aux

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

variations de la composition du cuivre, de la microstructure ou du traitement thermique dans cette plage.

Dans l'ensemble, le graphique montre la variation de dureté le long de la partie revêtue de cuivre de l'échantillon. Cela peut être dû à des différences locales dans la composition du cuivre, la microstructure et le traitement thermique.

La figure III.4 montre les résultats de test de dureté Rockwell sur un histogramme.

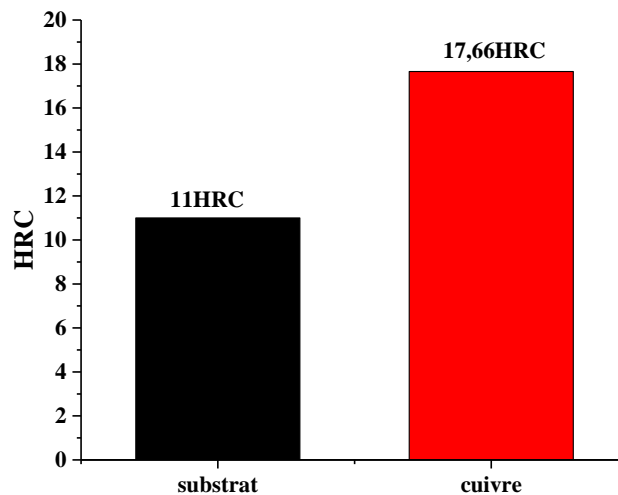


Figure III.4 Histogramme de dureté Rockwell.

Premier pic (11 HRC) : Le pic de dureté Rockwell à 11 HRC indique que le substrat est relativement mou. Cela signifie qu'il s'agit d'un matériau plus ductile, ce qui peut être un avantage dans les applications nécessitant un certain degré de flexibilité et de résistance à la déformation. Cependant, la dureté relativement faible peut également indiquer une susceptibilité à l'usure et aux défaillances mécaniques.

Deuxième pic (17,66 HRC) : Une dureté Rockwell maximale de 17,66 HRC pour le cuivre indique une dureté plus élevée par rapport au matériau de base. Cela peut signifier que le cuivre a été durci ou traité pour le rendre plus résistant à la déformation et à l'usure. Une dureté plus élevée peut rendre le matériau plus adapté aux applications nécessitant une plus grande résistance, telles que les pièces d'usure, les contacts électriques et les composants structurels.

En comparaison, le cuivre est plus dur que le substrat, ce qui peut indiquer une meilleure résistance à la déformation et à l'usure.

III.2.2 Profilomètre

La figure III.5 montre le profil de rugosité de revêtement du cuivre après pulvérisation.

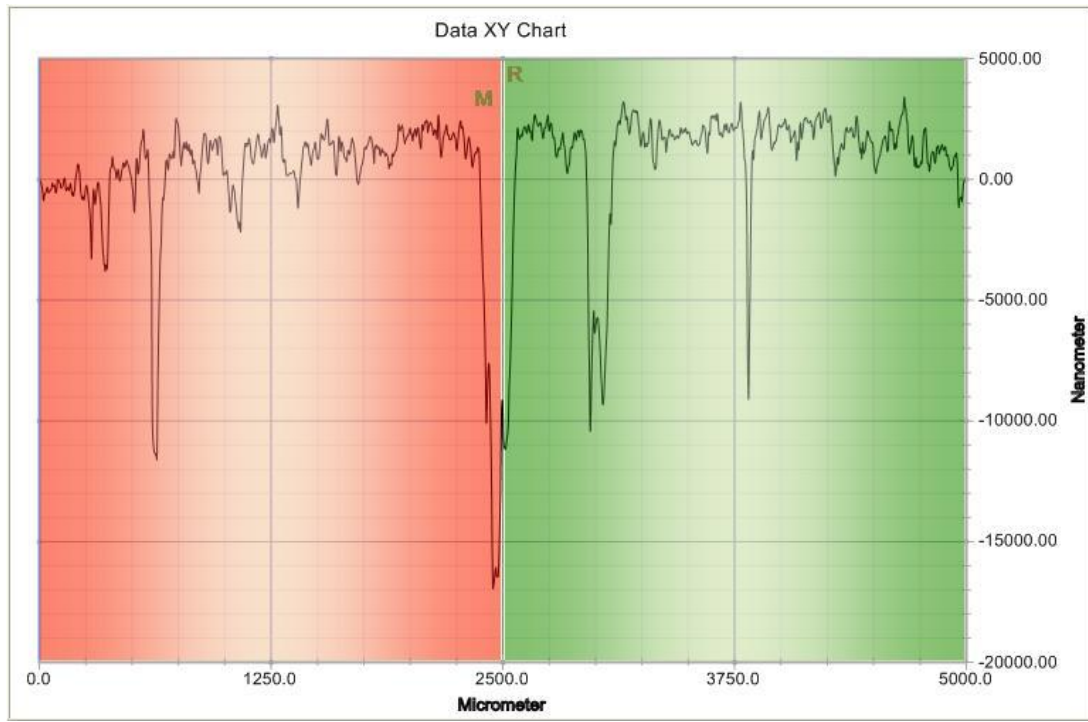


Figure III.5 profil de rugosité de revêtement du cuivre après pulvérisation.

$$Ra = 1\mu\text{m} / Rz = 20500\text{nm}$$

La plage de valeurs de l'axe X représente le déplacement en microns et la plage de valeurs de l'axe Y représente la hauteur en nanomètres. Ce diagramme est divisé en deux parties distinctes.

Partie 1 (0 à 2500 microns) : Cette partie mentionne l'existence d'une profondeur maximale atteignant -17000 nanomètres. Cela signifie que la surface du revêtement présente de profondes dépressions et irrégularités. Une profondeur de -17 000 nm indique que certaines zones du revêtement sont déprimées par rapport à la référence de surface. Cela peut être dû à des conditions de pulvérisation inégales, à des imperfections du matériau ou à d'autres facteurs liés au processus de revêtement.

Partie 2 (2500-5000 microns) : Dans cette partie, on note que la hauteur maximale du graphique est d'environ 3500 nanomètres. Cela indique la présence de hauts pics ou crêtes à la surface du revêtement. Une hauteur maximale de 3500 nm suggère que certaines zones du

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

revêtement dépassent de manière significative la norme de surface. Cela peut être dû à un dépôt irrégulier de matière lors de la projection thermique, à la formation de particules ou d'agglomérats en surface, ou à d'autres phénomènes similaires.

Les paramètres de rugosité Ra (valeur de rugosité moyenne arithmétique) et Rz (profondeur de rugosité maximale) sont généralement utilisés pour évaluer les surfaces. Dans notre cas, on a dit que Ra est égal à 1 micron et Rz est égal à 20500 nanomètres.

Ra mesure l'écart moyen entre les pics et les creux de surface sur la longueur d'échantillonnage spécifiée. A une valeur Ra de 1 micron, on peut supposer que la surface du revêtement est globalement relativement lisse, avec des vallées et des pics bien définis.

Rz, quant à lui, mesure la profondeur maximale de la vallée par rapport à la surface de référence sur une longueur d'échantillon donnée. Dans notre cas, Rz est de 20500 nanomètres, soit la profondeur maximale observée dans la partie 1 du graphique (-17000 nanomètres). Cette valeur élevée indique qu'il existe des creux significatifs sur la surface du revêtement.

En résumé, l'interprétation des résultats suggère que la rugosité du revêtement de cuivre post-pulvérisé n'est pas uniforme. La partie 1 du graphique montre des bas et la partie 2 montre des hauts. La présence de creux importants peut indiquer des défauts du matériau ou des conditions de pulvérisation inégales, tandis que la présence de pics élevés indique un dépôt inégal ou la formation de particules et d'agrégats sur la surface. Les valeurs Ra et Rz fournissent des mesures quantitatives de la rugosité moyenne et de la profondeur maximale, respectivement.

III.2.3 Essai de traction

La figure III.6 montre le graphique d'un essai de traction sur un échantillon de substrat

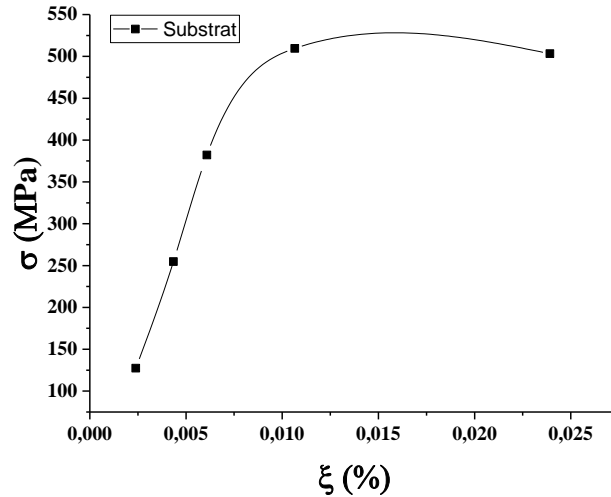


Figure III.6 graphique essai de traction substrat.

Calcul de la déformation unitaire (ϵ) : La déformation unitaire peut être calculée en utilisant la formule : $\epsilon = (L - L_0) / L_0$, où L_0 est la longueur initiale et L est la longueur finale. Dans notre cas, $L_0 = 46$ mm et $L = 47$ mm. Ainsi, la déformation unitaire peut être calculée comme suit :

Pour le point 1 : $\epsilon_1 = (47 - 46) / 46 = 0,0217$.

Pour le point 2 : $\epsilon_2 = (47 - 46) / 46 = 0,0217$.

Pour le point 3 : $\epsilon_3 = (47 - 46) / 46 = 0,0217$.

Pour le point 4 : $\epsilon_4 = (47 - 46) / 46 = 0,0217$.

Pour le point 5 : $\epsilon_5 = (47 - 46) / 46 = 0,0217$.

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

Calcul de la contrainte normale (σ) : La contrainte normale peut être calculée en utilisant la formule : $\sigma = F / A$, où F est la force appliquée et A est la section transversale de l'échantillon. La section transversale peut être calculée à partir du diamètre (D) en utilisant la formule : $A = \pi \times (D/2)^2$. Dans notre cas, $D_0 = 5 \text{ mm}$ et $D = 4,5 \text{ mm}$.

Pour le point 1 : $A_1 = \pi \times (5/2)^2 = 19,63 \text{ mm}^2$

$$\sigma_1 = 127,388535031847 / 19,63 = 6,49 \text{ MPa.}$$

Pour le point 2 : $A_2 = \pi \times (4,5/2)^2 = 15,90 \text{ mm}^2$

$$\sigma_2 = 254,777070063694 / 15,90 = 16,00 \text{ MPa.}$$

Pour le point 3 : $A_3 = \pi \times (4,5/2)^2 = 15,90 \text{ mm}^2$

$$\sigma_3 = 382,165605095541 / 15,90 = 24,03 \text{ MPa.}$$

Pour le point 4 : $A_4 = \pi \times (4,5/2)^2 = 15,90 \text{ mm}^2$

$$\sigma_4 = 509,554140127389 / 15,90 = 32,03 \text{ MPa.}$$

Pour le point 5 : $A_5 = \pi \times (4,5/2)^2 = 15,90 \text{ mm}^2$

$$\sigma_5 = 503,263348273964 / 15,90 = 31,65 \text{ MPa.}$$

Interprétation des résultats :

Les valeurs de déformation unitaire (ϵ) sont identiques pour tous les points, ce qui indique une déformation uniforme de l'échantillon.

Les valeurs de contrainte normale (σ) augmentent de manière progressive, indiquant une augmentation de la résistance du matériau.

Le point 4 (ϵ_4, σ_4) représente la contrainte maximale (R_m) de 32,03 MPa avant la rupture de l'échantillon.

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

Pour calculer l'allongement à la rupture de l'échantillon, nous utiliserons ces valeurs:

L_0 représente la longueur initiale de l'échantillon, soit 46 mm.

L représente la longueur finale de l'échantillon au point de rupture, soit 47 mm.

Pour calculer l'allongement à la rupture en pourcentage, nous utilisons la formule suivante :

$$\text{Allongement à la rupture (\%)} = [(L - L_0) / L_0] \times 100$$

$$\text{Allongement à la rupture (\%)} = [(47 - 46) / 46] \times 100$$

$$= (1 / 46) \times 100$$

$$= 2.17\%$$

L'allongement à la rupture de l'échantillon de substrat est d'environ 2,17%. Cela indique que l'échantillon a subi une déformation très limitée avant de se rompre, ce qui suggère une faible ductilité du matériau.

La figure III.7 montre le graphique d'un essai de traction sur un échantillon avec revêtement cuivre.

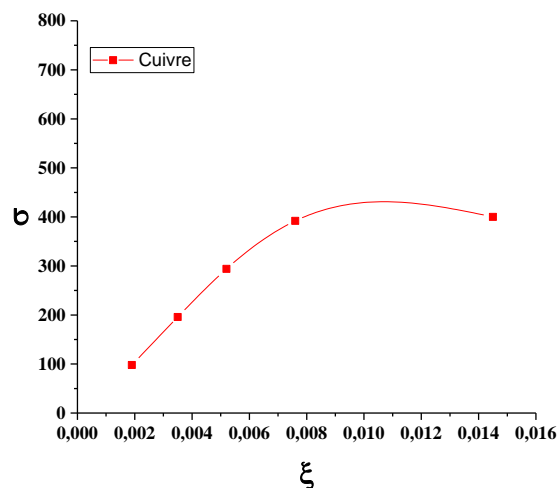


Figure III.7 graphique essai de traction avec revêtement.

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

Calcul de la déformation unitaire (ϵ) : La déformation unitaire peut être calculée en utilisant la formule : $\epsilon = (L - L_0) / L_0$, où L_0 est la longueur initiale et L est la longueur finale. Dans notre cas, $L_0 = 5,46$ mm et $L = 6,44$ mm. Ainsi, la déformation unitaire peut être calculée comme suit :

$$\text{Pour le point 1 : } \epsilon_1 = (6,44 - 5,46) / 5,46 = 0,1795$$

$$\text{Pour le point 2 : } \epsilon_2 = (6,44 - 5,46) / 5,46 = 0,1795$$

$$\text{Pour le point 3 : } \epsilon_3 = (6,44 - 5,46) / 5,46 = 0,1795$$

$$\text{Pour le point 4 : } \epsilon_4 = (6,44 - 5,46) / 5,46 = 0,1795$$

Calcul de la contrainte normale (σ) : La contrainte normale peut être calculée en utilisant la formule : $\sigma = F / A$, où F est la force appliquée et A est la section transversale de l'échantillon. La section transversale peut être calculée à partir du diamètre (D) en utilisant la formule : $A = \pi \times (D/2)^2$. Dans notre cas, $D_0 = 5,70$ mm et $D = 4$ mm.

$$\text{Pour le point 1 : } A_1 = \pi \times (5,70/2)^2 = 25,52 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_1 = 97,97 / 25,52 = 3,84 \text{ MPa}$$

$$\text{Pour le point 2 : } A_2 = \pi \times (4/2)^2 = 12,57 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_2 = 195,94 / 12,57 = 15,60 \text{ MPa}$$

$$\text{Pour le point 3 : } A_3 = \pi \times (4/2)^2 = 12,57 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_3 = 293,91 / 12,57 = 23,39 \text{ MPa}$$

$$\text{Pour le point 4 : } A_4 = \pi \times (4/2)^2 = 12,57 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_4 = 420 / 12,57 = 33,47 \text{ MPa}$$

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

Interprétation des résultats :

Les valeurs de déformation unitaire (ϵ) sont constantes pour tous les points, indiquant une déformation uniforme de l'échantillon.

Les valeurs de contrainte normale (σ) augmentent progressivement, ce qui montre une augmentation de la résistance du matériau avec l'application de la force.

Le point 4 (ϵ_4 , σ_4) représente la contrainte maximale atteinte avant la rupture de l'échantillon, avec une valeur de contrainte de 33,47 MPa.

L'allongement à la rupture : L_0 représente la longueur initiale de l'échantillon, soit 5,46 mm.

L représente la longueur finale de l'échantillon au point de rupture, soit 6,44 mm.

Pour calculer l'allongement à la rupture en pourcentage, nous utilisons la formule suivante :

$$\text{Allongement à la rupture (\%)} = [(L - L_0) / L_0] \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{Allongement à la rupture (\%)} &= [(6,44 - 5,46) / 5,46] \times 100 \\ &= (0,98 / 5,46) \times 100 \\ &= 17,94\% \end{aligned}$$

L'allongement à la rupture de l'échantillon avec revêtement cuivre est d'environ 17,94%. Cela signifie que l'échantillon peut subir une déformation considérable avant de se rompre, ce qui indique une bonne ductilité du matériau.

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

La figure III.8 montre le graphique comparatif d'un essai de traction sur un échantillon avec revêtements cuivre et substrat.

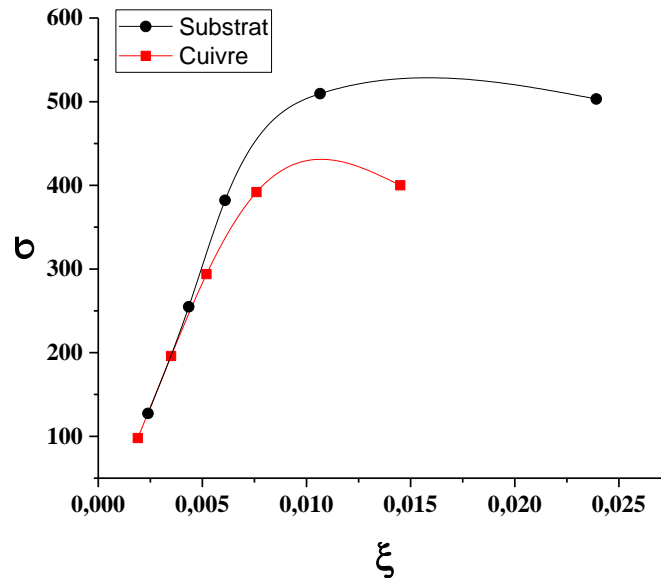


Figure III.8 graphique comparatif essai de traction.

Échantillon de substrat : Les points du graphique pour l'échantillon de substrat sont (0,0019 ; 127,39), (0,0035 ; 254,78), (0,0052 ; 382,17), (0,0076 ; 509,55), et (0,0145 ; 503,26).

La contrainte normale (σ) augmente progressivement à mesure que la déformation unitaire (ϵ) augmente.

Le point de rupture est atteint près de 503,26 MPa.

Les valeurs de déformation unitaire augmentent progressivement, suggérant une déformation plastique progressive avant la rupture.

Échantillon avec revêtement cuivre : Les points du graphique pour l'échantillon avec revêtement cuivre sont (0,0019 ; 97,97), (0,0035 ; 195,94), (0,0052 ; 293,91), (0,0076 ; 391,88), et (0,0145 ; 400).

La contrainte normale (σ) augmente également progressivement avec l'augmentation de la déformation unitaire (ϵ).

Le point de rupture est atteint près de 400 MPa.

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

Les valeurs de déformation unitaire augmentent progressivement, indiquant une déformation plastique progressive avant la rupture.

Comparativement leurs allongements à la rupture :

Pour l'échantillon de substrat :

$$\begin{aligned}\text{Allongement à la rupture} &= (L - L_0) / L_0 \times 100 \\ &= (47 - 46) / 46 \times 100 \\ &= 2.17\%\end{aligned}$$

Pour l'échantillon avec revêtement cuivre :

$$\begin{aligned}\text{Allongement à la rupture} &= (L - L_0) / L_0 \times 100 \\ &= (6.44 - 5.46) / 5.46 \times 100 \\ &= 17.95\%\end{aligned}$$

Comparaison : Les deux graphiques présentent une augmentation progressive de la contrainte normale (σ) avec l'augmentation de la déformation unitaire (ϵ).

L'échantillon de substrat atteint une contrainte maximale plus élevée (503,26 MPa) par rapport à l'échantillon avec revêtement cuivre (400 MPa).

L'échantillon de substrat présente une déformation plus importante avant la rupture par rapport à l'échantillon avec revêtement cuivre ; Cependant pour ce qui est de l'allongement à la rupture l'échantillon avec revêtement cuivre présente un allongement à la rupture plus élevé (17.95%) par rapport à l'échantillon de substrat (2.17%). Cela suggère que l'échantillon avec revêtement cuivre est plus ductile et capable de subir une plus grande déformation avant la rupture par rapport à l'échantillon de substrat.

III.3 Caractérisation électrochimiques

III.3.1 Courbe anodique et cathodiques

La Figure III.9 montre les Courbes de polarisation cathodique (a) et anodique (b) des deux électrodes acier nu et acier revêtu en Cu

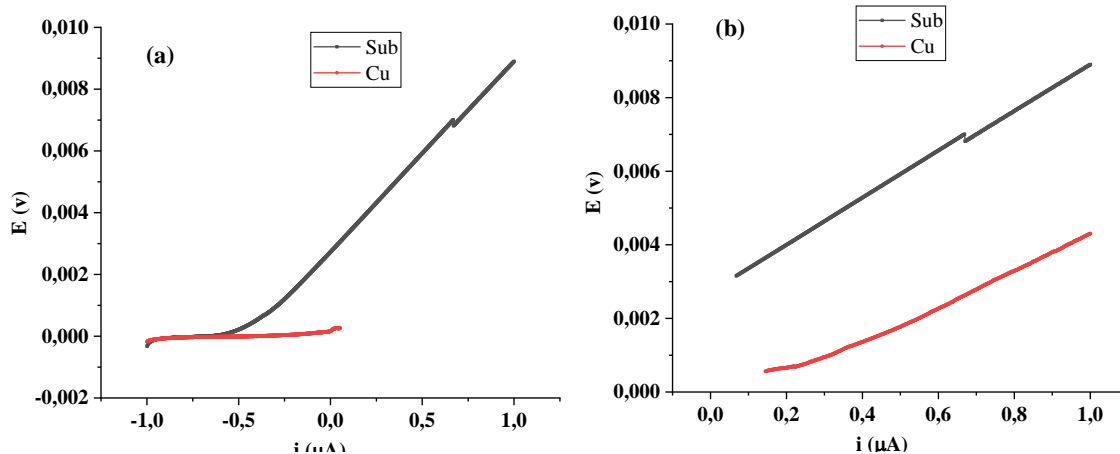


Figure III.9 Courbes de polarisation cathodique (a) et anodique (b) des deux électrodes acier nu et acier revêtu en Cu

Le comportement électrochimique des deux matériaux, le substrat d'acier E335 (substrat) et l'acier revêtu en Cu dans le milieu corrosif marin de 3.5% de NaCl est traduit par les tracés des courbes i-E. La courbe relative au comportement de l'acier, caractérise l'allure générale d'une courbe de polarisation obtenue dans une solution de chlorure de sodium à 3% en poids, dans les conditions expérimentales suivantes : temps d'immersion temps = 1 h, vitesse de balayage $V_b = 0.1 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$, température ambiante et milieu aéré. Le tracé des courbes de polarisation est réalisé en partant du potentiel de corrosion en se déplaçant, soit vers des valeurs de potentiel plus positives pour les tracés anodiques, soit vers des valeurs de potentiel plus négative pour les tracés cathodiques.

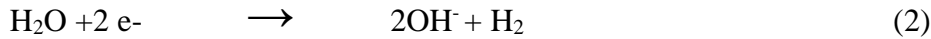
Domaine cathodique : Dans la zone cathodique, la réaction de réduction du moteur de corrosion a été mise en évidence par la réalisation d'un test de polarisation cathodique des deux électrodes de l'acier nu et l'acier revêtu en Cu dans la solution aérée de 3.5% de NaCl (figure III.9. b).

Le test des courbes cathodiques obtenues dans le milieu aéré montre l'existence d'un palier de courant de diffusion limite relatif à la réaction de réduction de l'oxygène dissous suivant la réaction suivante :

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

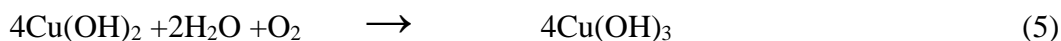
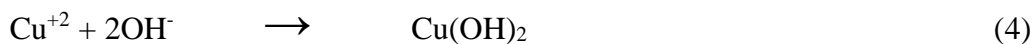


Au-delà du $i = -0.75 \mu\text{A}$, la contribution de la décharge de l'eau pour donner de l'hydrogène selon l'équation (2) :



Nous remarquons le courant cathodique enregistré sur l'acier nu est plus important. Cela veut dire que le dégagement de l'hydrogène est plus important sur la surface de l'acier nu que sur la surface de dépôt en Cu.

Domaine anodique : La figure III.9 (a) présente les courbes de polarisation tracées dans le domaine anodique. L'étude comparative de ces deux courbes montre que l'échantillon revêtu en Cu la dissolution de Cu dans le milieu de 3.5% de NaCl termine bien avant l'acier nu, cependant les courants anodiques enregistrés par ce dernier sont plus élevés comparativement à ceux de l'échantillon en Cu. La dissolution du cuivre dans la solution NaCl engendre la formation de la rouille selon les étapes suivantes :



La réaction d'oxydation du Cu domaine dans une gamme qui s'étale de 0.2 à $1 \mu\text{A}$, correspondant à la gamme de potentiel de corrosion de 0.0005 à 0.004v

III.3.2 Courbe de Tafel

La figure III.10 représente les courbes relatives au comportement de l'acier E335 non revêtu (substrat) et de dépôt Cu, elle caractérise l'allure générale d'une courbe de polarisation obtenue dans une solution de chlorure de sodium à 3.5% en poids, dans les conditions expérimentales citées dans la section précédente. Observant la figure on peut constater que le potentiel de corrosion de dépôt Cu tend vers des valeurs plus positive il enregistre une valeur de -411.3 mv, tandis que le substrat enregistre une valeur de -689.7 mv. Il est remarquable

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

aussi que la densité de courant de corrosion de substrat est plus élevée, elle est de 5.1578 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, comparativement à celle de dépôt de Cu (2.0873 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), la diminution de la densité de courant après dépôt de Cu signifie l'excellente résistance du dépôt Cu par rapport au substrat.

	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Substrat (E335)	-689.7	5.1578
Dépôt (Cu)	-411.3	2.0873

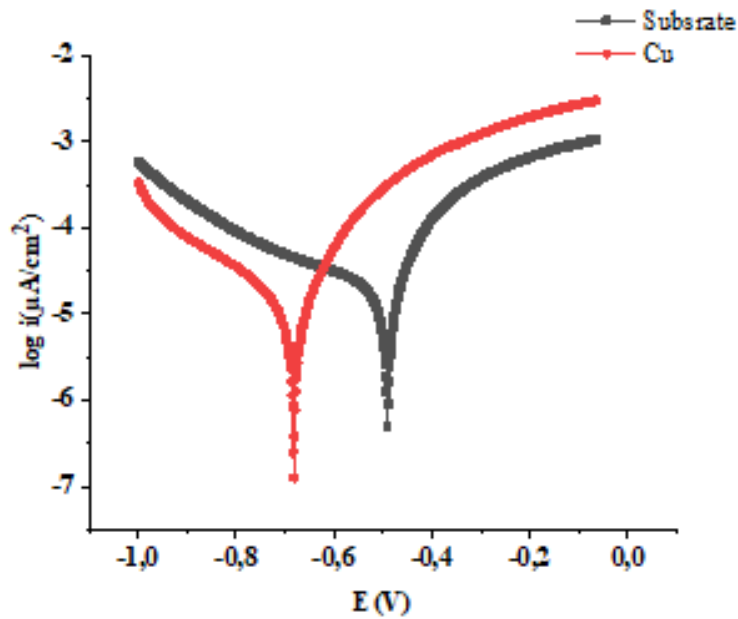


Figure III.10 Courbe de Tafel.

III.3.3 Courbe perte de masses

La figure III.11 montre un histogramme de perte de masse pour un échantillon avec revêtements

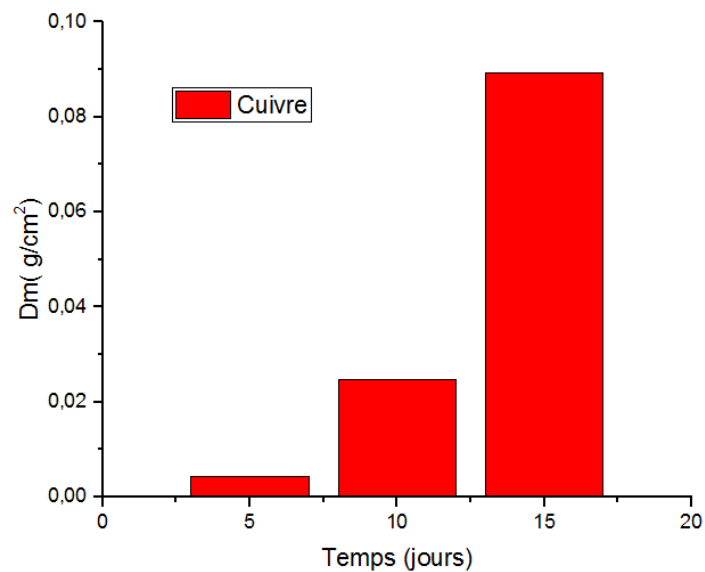


Figure III.11 histogramme perte de masse avec revêtements.

La perte de masse affichée dans l'histogramme indique la quantité de matière perdue de la surface de l'échantillon revêtu au fil du temps. Les interprétations possibles pour chaque pic sont :

Pic 1 (5 jours, 0,0044 g/cm²) : Ce pic représente la perte de masse après 5 jours d'exposition, et la perte de masse relativement faible indiquée par une valeur de 0,0044 g/cm² indique que le revêtement est initialement efficace pour protéger l'échantillon de la dégradation et de la corrosion.

Pic 2 (10 jours, 0,0248 g/cm²) : Le pic 2 montre une perte de masse après 10 jours. Une valeur élevée de 0,0248 g/cm² indique une augmentation significative de la perte de masse par rapport au premier pic. Cela peut indiquer une détérioration progressive du revêtement due à des facteurs tels que des conditions environnementales difficiles, des contraintes mécaniques ou chimiques ou des défauts dans le revêtement lui-même.

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

Pic 3 (15 jours, 0,0894 g/cm²) : Le pic 3 représente la perte de masse après 15 jours d'exposition, avec une valeur élevée de 0,0894 g/cm² indiquant une augmentation significative de la perte de masse par rapport au pic précédent. Une telle augmentation indique une dégradation avancée du revêtement, ce qui peut être préoccupant car la dégradation et la corrosion de l'échantillon peuvent être plus importantes.

La figure III.12 montre un histogramme de perte de masse pour un échantillon de substrat

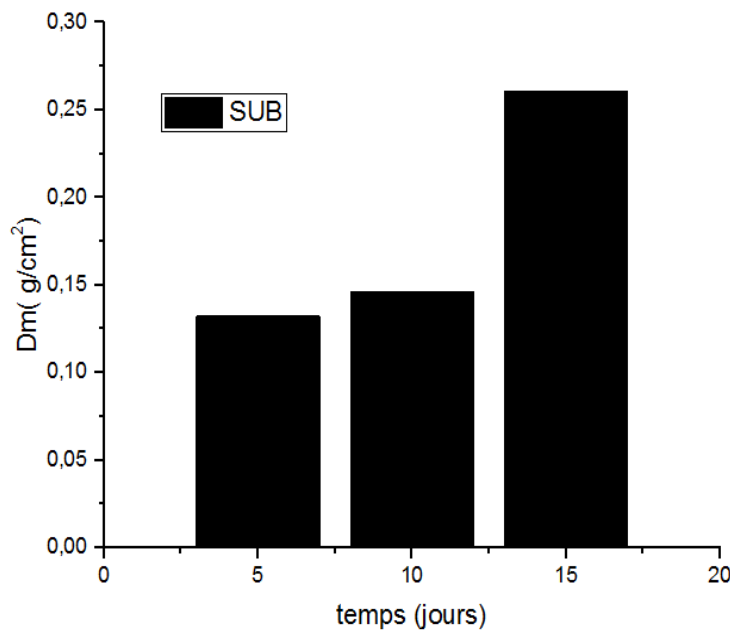


Figure III.12 histogramme perte de masse substrat.

La perte de masse affichée dans l'histogramme indique la quantité de matière perdue de la surface de l'échantillon de substrat au fil du temps. Une interprétation détaillée de chaque pic suit.

Pic 1 (5 jours, 0,1323 g/cm²) : Ce pic représente la perte de masse après 5 jours d'exposition, avec une valeur de perte de masse de 0,1323 g/cm² indiquant une diminution significative de la masse de l'échantillon. Cela peut être attribué à des processus tels que l'oxydation, la corrosion ou l'interaction avec l'environnement dans lequel l'échantillon est placé. Cette perte de masse relativement importante après seulement 5 jours suggère que le substrat est sensible aux conditions environnementales ou aux réactions chimiques.

Pic 2 (10 jours, 0,1463 g/cm²) : Le pic 2 montre une perte de masse après 10 jours d'exposition. Une valeur de perte de masse de 0,1463 g/cm² indique une augmentation

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

continue de la perte de masse par rapport au pic précédent. Cela indique que les réactions chimiques ou les processus de décomposition se sont intensifiés au fil du temps. L'augmentation de la perte de masse peut être due à des facteurs tels que la formation de produits de corrosion, l'érosion ou la dégradation progressive de la surface du substrat.

Pic 3 (15 jours, 0,2605 g/cm²) : Le pic 3 représente la perte de masse après 15 jours d'exposition. La valeur de perte de masse de 0,2605 g/cm² est la plus élevée des pics jusqu'à présent. Cela indique que les processus de dégradation et de corrosion se sont intensifiés durant cette période. Une perte de masse accrue peut indiquer une dégradation significative de la surface du substrat, ce qui peut compromettre l'intégrité structurelle et les performances du substrat.

La figure III.13 montre un histogramme comparatif de perte de masse.

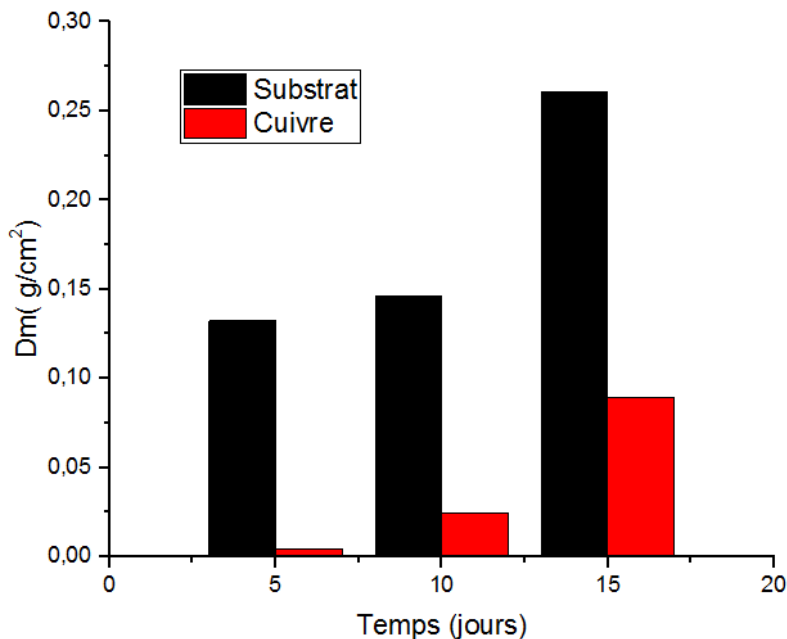


Figure III.13 histogramme comparatif de perte de masse.

Comparaison

Dans l'ensemble, on peut voir que les échantillons revêtus de cuivre ont une perte de masse inférieure à celle des échantillons de substrat non revêtus. Cela met en évidence l'efficacité du revêtement de cuivre dans la protection de la carte contre la dégradation.

CHAPITRE III: Résultats et Discussions

Les pics d'histogramme pour les échantillons recouverts de cuivre sont faibles et proches les uns des autres. Cela indique une plus grande stabilité et une dégradation plus lente par rapport aux échantillons de substrat.

L'échantillon de substrat présente une perte de masse initiale plus élevée, indiquant qu'il est susceptible de se dégrader sans revêtement protecteur.

La tendance à la hausse de la perte de masse était plus prononcée dans les échantillons de substrat, indiquant une dégradation plus rapide et continue du matériau par rapport aux échantillons recouverts de cuivre. Il ressort clairement de cette comparaison que le revêtement de cuivre joue un rôle important dans la protection du substrat contre la dégradation. L'utilisation du bon revêtement peut grandement améliorer la durabilité et les performances des matériaux en les protégeant des réactions chimiques et des effets environnementaux néfastes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif d'étudier le comportement électrochimique d'un dépôt de CUIVRE obtenu par projection thermique arc électrique. Ce travail a été principalement consacré à la caractérisation d'un dépôt en cuivre pure sur un acier de construction mécanique. Les différentes analyses microstructurales basée sur l'observation métallographique en microscope optique.

Les observations obtenus montre que :

- Les microstructures du dépôt a révèle une structure dense et homogène, des phases avec différent niveau de gris, des oxydes, particules non fondus.

Les mesures de duretés Rockwell relevées sur des surfaces polies ont révélé que :

- La diffraction des rayons X du dépôt a confirmé la présence de la phase du cuivre à plusieurs angles ainsi que la présence de quelque oxyde type CuO.

- L'essai de traction montrent que le dépôt cuivre est plus résistant par rapport au substrat.

- La caractérisation électrochimique nous a révéler que le dépôt présente un comportement protecteur dans le milieu de l'eau de mer, ce qui prouve que le revêtement est de type anodique.

Références

Références

- [1] M.A. Bradai, rénovation de pièces mécaniques usées par la technique de projection thermique, caractérisation structurale et mécanique de deux types de revêtement métallique. Thèse de doctorat ,Université de Bejaia (2007).
- [2] C. Dahmas, étude de l'influence des post-traitements sur l'adhérence et le comportement mécanique d'un multi matériau réaliser par projection thermique. Projet de fin d'études ,E.N. Polytechnique d'Alger (1993).
- [3] Sokolov D.E. Thèse contribution au développement projection thermique a très faibles pression.
- [4] [9] [10] [11] [12] D. Doyen, Méthodes numériques pour des problèmes dynamiques de contact et de fissuration. Thèse de doctorat ,Université Paris-Est ,France (1998).
- [5] Ourak billal,Zouaoui bilal, Caractérisation électrochimique d'un dépôt à base de fer obtenu par projection flamme-poudre sur un substrat en acier, MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER (2016-2017).
- [6] HAFED Aimadedine ,Synthèse et caractérisation des nanomatériaux en couches minces de ZnO élaborées par procédé d'évaporation thermique, MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER (2013 – 2014).
- [7] Chiboune Kamel,l'Analyse de l'effet de l'essai de traction sur la déformation de l'acier, MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER (2020-2021).
- [8] Bouzidi M'henni,GHEBRIOUA Massine, Influence des post-traitements sur Le comportement mécanique et électrochimique d'un dépôt en acier inoxydable, MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER (2017-2018).

Résumé

Résumé :

L'objet de cette étude consiste à mettre en évidence le comportement électrochimique des dépôts de cuivre produits par projection thermique. La cristallinité, les propriétés électriques, mécaniques et chimiques du cuivre ont été étudiées en mettant l'accent sur la pulvérisation à l'arc électrique. Les effets de l'environnement, notamment de l'eau de mer, sur les revêtements de cuivre ont également été étudiés. L'analyse expérimentale comprend des techniques de caractérisation telles que la microscopie optique, la diffraction des rayons X et les tests électrochimiques.

Abstract:

The purpose of this study is to highlight the electrochemical behavior of copper deposits produced by thermal spraying. The crystallinity, electrical, mechanical and chemical properties of copper have been studied with emphasis on electric arc spraying. The effects of the environment, especially seawater, on the copper coatings have also been studied. Experimental analysis includes characterization techniques such as optical microscopy, X-ray diffraction, and electrochemical testing.

ملخص

الغرض من هذه الدراسة هو تسليط الضوء على السلوك الكهروكيميائي لرواسب النحاس الناتجة عن الرش الحراري. تمت دراسة التبلور والخواص الكهربائية والميكانيكية والكيميائية للنحاس مع التركيز على الرش بالقوس الكهربائي. كما تمت دراسة تأثيرات البيئة، وخاصة مياه البحر، على الطلاءات النحاسية. يشمل التحليل التجريبي تقنيات التوصيف مثل الفحص المجهرى البصري، حيود الأشعة السينية، والاختبار الكهروكيميائي.