

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

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : GENIE DES MATERIAUX

PAR :

BOUZIDI M'HENNI

GHEBRIOUA MASSINE

Thème

**Influence des post-traitements sur
Le comportement mécanique et électrochimique d'un dépôt en
acier inoxydable**

Soutenu le 26/06 /2018 devant le jury composé de:

Pr. KERKER. Moussa

Président

Dr. YOUNES Rassim

Rapporteur

Pr. BRADAIA M^{ed} Amokrane

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2017-2018

REMERCIEMENTS

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

Nos remerciements vont au Docteur R.YOUNES, notre 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.

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail. Professeur. M.KERKAR en tant que président de jury et Professeur. A.BRADAI en tant que examinateur.

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 gratitudees.

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

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes chers parents,

À mes frères,

À la mémoire de mon frère Abdelmoumen,

Ainsi qu'à toute ma famille,

Et tous mes amis et collègues.

Massine

Dédicaces

Je dédie ce travail

À mes chers parents,

*À ma sœur Amel et mon
frère Bouzid,*

À la mémoire de ma grande mère,

Ainsi qu'à toute ma famille,

Et tous mes amis et collègues.

M'henni

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau1.1 : Variétés allotropiques du fer et structures correspondantes.....	16
Tableau I. 2 : Principales applications des aciers inoxydables.....	20
Tableau I. 3 : Les principaux facteurs de la corrosion.....	30
Tableau II.1: Analyse du substrat par la fluorescence des rayons X.....	35
Tableau II.2: Composition chimique (en % massique) de l'acier inoxydable X30Cr13.....	37
Tableau II.3: Propriétés thermo physiques et mécaniques de l'acier inoxydable X30Cr13.....	37
Tableau II.4: paramètres de projection à flamme fil utilisé par l'entreprise Algérie métallisation.....	39

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1: Schéma simplifié du principe de la projection thermique	4
Figure I.2 : Schéma de principe de la projection à l'arc électrique.....	5
Figure I.3 : projection flamme.....	6
Figure I.4 : schéma de principe de la projection à la flamme poudre	6
Figure I.5 : principe de la projection à la flamme fil.....	7
Figure I.6 : Schéma de principe du canon à détonation.....	8
Figure I.7 : Schéma de principe de la projection HVOF.....	8
Figure I.8 : Schéma de principe de la projection par troche plasma.....	9
Figure I.9 : Torche plasma à arc transféré.....	10
Figure I.10 schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique.....	10
Figure I.11 : Résultats des interactions des particules avec le substrat.....	11
Figure I.12: Diagramme d'équilibre de phases du système fer-chrome.....	17
Figure I.13: Diagramme de phases pseudo-binaires fer-carbone à 13 % de chrome.....	21
Figure I.14 : schéma de principe de corrosion sèche.....	24
Figure I.15 : Schéma de principe de corrosion électrochimique.....	25
Figure I.16 : L'allure générale de la courbe voltampérométrique et ses grandeurs..... Caractéristiques.....	27
Figure I.17: Schéma théorique de la courbe courant-temps pour la germination	28
tridimensionnelle.....	28
Figure I. 18: Schéma de base d'une cellule électrochimique.....	29
Figure II.1: mode opératoire d'un traitement thermique.....	34
Figure II.2: Echantillon utilisé pour la projection.....	36
Figure II.3 : Pistolet flamme fil.....	38
Figure II.4: différentes types de polisseuses.....	39
Figure II.5 : Famille de plans cristallins en condition de Bragg.....	41
Figure II.6 : Microscope optique.....	42
Figure II.7 : Dispositif de mesure d'une courbe de polarisation potentiodynamique.....	43
Figure II.8 : Essai de microdureté Vickers.....	45
Figure II.9: balance analytique.....	46
Figure III.1 : Spectre des rayons X des différents dépôts en X30Cr13	47

Figure III.2 : Microstructure des différents échantillons obtenus avant test électrochimique.....	48
Figure III.3 : La perte de masse des échantillons à 5 jours.....	50
Figure III.4 : Microstructure des différents échantillons obtenus après 5 jours.....	51
Figure III.5 : La perte de masse des échantillons à 10 jours.....	52
Figure III.6 : Microstructure des différents échantillons obtenus après 10 jours.....	53
Figure III.7 : La perte de masse des échantillons à 20 jours.....	54
Figure III.8 : variation de la perte de masse relative en fonction du temps.....	55
Figure III.9 : Microstructure des différents échantillons obtenus après 20 jours.....	56
Figure III.10 Polarisation potentiodynamique de l'acier simple A60.....	57
Figure III.11 Polarisation potentiodynamique sans traitement.....	58
Figure III.12 Polarisation potentiodynamique traité à 850°C	59
Figure III.13 Polarisation potentiodynamique traité à 950°C.....	60
Figure III.14 Polarisation potentiodynamique traité à 1100°C.....	61
Figure III.15 Courbe de Tafel de l'acier X30Cr13 en fonction de température pour une période de 1h30min.....	62
Figure III.16 : Variation de potentiel de corrosion thermodynamique.....	64
Figure III.17 : Dureté Vickers des différents échantillons.....	65

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale	1
I.1 PROJECTION THERMIQUE	3
I.1.1 Historique	3
I.1.2 Définition	3
I.1.3 principe de la projection thermique	3
I.1.4 Différents types de procédés de projection thermique	4
I.1.4.1. projection par arc électrique entre deux fils	4
I.1.4.2. Projection flamme	5
I.1.4.2.1. Projection flamme poudre	6
I.1.4.2.2. Projection flamme fil	6
I.1.4.2.3. Projection au canon à détonation	7
I.1.4.2.4 Projection à tir continu	8
I.1.4.3. La troche plasma.....	9
I.1.4.4. Les plasmas à arc soufflé ou à arc non transféré(PTA)	9
I.1.4.5. Les plasmas à arc transféré.....	9
I.1.5. Construction d'un dépôt	10
I.1.6 Paramètres de projection influant sur le dépôt	12
I.1.7. Préparation de surface	13
I.1.7.1. Dégraissage	13
I.1.7.2. Décapage	14
I.1.7.3. Polissage	15
I.1.7.4. Sablage	15
I.1.7.5. Préchauffage	15
I.2. Etat Structural	15
I.3.1 Système fer-chrome	16
I.3.2 Classes des aciers inoxydables.....	18
I.3.2.1 Aciers martensitiques.....	18
I.3.2 Aciers ferritiques.....	18
I.3.2.3 Aciers austénitiques.....	18
I.3.2.4 Aciers austéno-ferritiques.....	19
I.3.3 Acier inoxydable X30Cr13	19
I.3.4 Principales Applications	19
I.3.5 Système ternaire fer-chrome-carbone	21

SOMMAIRE

I.4. Corrosion	22
I.4.1 Introduction.....	22
I.4.2 Définition de corrosion.....	22
I.4.3 Processus de corrosion.....	23
I.4.3.1 Corrosion sèche.....	23
I.4.3.2 Corrosion biochimique.....	24
I.4.3.3 Corrosion humide	24
I.4.7 Techniques électrochimiques.....	26
I.4.7.1 Voltamétrie.....	26
I.4.7.2 Chronoampérométrie.....	27
I.4.8 La cellule électrochimique.....	28
I.4.9 Les facteur de la corrosion.....	29
I.4.10 Importance de l'étude de la corrosion.....	31
I.4.11 Protection contre la corrosion.....	31
I.4.11.1 Agir sur le métal.....	31

MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPEREMENTALES

II. Matériaux et technique expérimentales	35
II.1 Introduction	34
II.2 Matériaux utilisé	35
II.2.1 Le substrat.....	35
II.2.2 Dépôts réalisés.....	35
II.3 Traitements thermiques	35
II.4 Caractéristique des dépôts.....	36
II.5. Présentation des échantillons.....	37
II.5.1 Elaboration des échantillons.....	37
II.5.2 préparation des surfaces à revêtir.....	38
II.5.2.1 Dégraissage.....	38

SOMMAIRE

II.5.2.2 Sablage	38
II.6 Réalisation des dépôts.....	39
II.6.1 Paramètre de projection.....	39
II.6.2 Procédé d'élaboration des revêtements par la projection flamme fil.....	39
II.6.3 Caractérisation microstructurale	40
II.6.4 Le polissage mécanique.....	40
II.6.5 Attaque chimique	40
II.7 Observation métallographique.....	41
II.7.1. Diffraction des rayons X.....	41
II.7.1.1. Production des rayons X.....	42
II.7.1.2. Loi de Bragg.....	42
II.7.2 Le microscope optique	43
II.8 Caractérisation électrochimique	44
II.8.1 L'électrode de travail	44
II.8.2 L'électrode de référence	45
II.8.3 L'électrode auxiliaire	45
II.8.4 Milieu d'essai.....	45
II.9 Méthode d'étude électrochimique.....	46
II.9.1 Polarisation potentiodynamique	46
II.9.2 Essai de microdurte Vickers.....	46
II.10. Procédure d'oxydation.....	47

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III. Introduction.....	49
III.1 Diffraction des rayons x (DRX).....	49
III.2 Métallographie des échantillons utilisés.....	50
III.2.1 Microstructure des dépôts issus de l'acier inoxydable X30Cr13	50
III.2.2 Métallographie des dépôts après 5 jours	51
III.2.3 Métallographie des dépôts après 10 jours.....	52
III.2.4 Métallographie des dépôts après 20 jours.....	54
III.3 Comportement des échantillons dans l'eau de mer	57

SOMMAIRE

Conclusion générale.....	58
---------------------------------	-----------

Introduction

Générale

Introduction Générale

En service les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux, donc le phénomène de corrosion est un problème de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux, comme il a été déjà mentionné ci-dessus le processus de la corrosion entraîne une destruction des matériaux métalliques. Ce phénomène a pris de nos jours une importance considérable, étant donné l'utilisation de plus en plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne.

La corrosion résulte d'une action chimique ou électrochimique d'un environnement sur les métaux et les alliages. Les conséquences sont importantes dans divers domaines et en particulier dans l'industrie: arrêt de production, remplacement des pièces corrodées, accidents et risques de pollution sont des événements fréquents avec parfois de lourdes incidences économiques.

Les installations et les équipements industriels susceptibles de se corroder peuvent être conçus et réalisés en tenant compte des traitements anti-corrosion disponibles. Différents traitements sont déjà connus et applicables à des installations existantes. Cependant, l'utilisation de plusieurs métaux différents (ferreux et non ferreux) et l'interdiction d'inhibiteurs toxiques (chromate, nitrite, etc.) compliquent la mise en œuvre de traitements anti-corrosion efficaces, et justifient donc la recherche de nouveaux moyens de protection.

Notre travail est basé sur l'influence des traitements thermiques sur les propriétés mécanique et électrochimique d'un dépôt réalisé par projection thermique, qui est présenté sur les chapitres suivants :

Dans le chapitre I, on a effectué une étude bibliographique permettant de présenter les différentes techniques de projection thermique, tout en mettant l'accent sur le procédé à flamme fil, et sur les différentes étapes de réalisation des dépôts, par la suite on a présenté des généralités sur la corrosion.

Le chapitre II, décrit les techniques expérimentales et les différents matériaux utilisés pour l'élaboration des dépôts. Ensuite, nous décrirons les méthodes de caractérisation microstructurale des dépôts réalisés et la configuration des tests électrochimiques.

Introduction Générale

Enfin, les résultats expérimentaux sont regroupés dans le troisième chapitre. Ce dernier chapitre expose et commente les résultats de mesures électrochimiques classiques, et d'essais de polarisation et de perte de masse. Ces résultats sont mis à profit pour comprendre les mécanismes d'action de corrosion des dépôts. Ensuite, l'influence des traitements thermique des échantillons sur les caractéristiques électrochimiques et mécaniques de ces dépôts en acier inoxydable.

Chapitre I

Projection Thermique

Projection thermique

I.1. Projection thermique:

I.1.1. Historique:

Parmi les techniques dites (propres) la projection thermique est l'une des plus anciennes. Ce travail concerne un nouveau développement de cette technologie. La projection thermique à plus de 100 ans. Au début du 20^{ème} siècle (1909) un ingénieur suisse Zurich le Docteur max Ulrich Schoop à minutieusement étudié l'impact de balles en plomb sur un mur en béton, Ce qui lui à inspirer de réaliser une invention portant sur l'utilisation de la technique de revêtement en plomb ou en zinc par projection de métal fondu. Dans un premier temps il a utilisé un creuset rempli de métal fondu et de l'air préalablement chauffé par la pulvérisation et la projection de métal [1].

Après différentes évolutions techniques, l'utilisation pistolet comme source de chaleur et d'un métal en poudre a été qualifiée et brevetée en 1911. concernant la source enthalpie la première innovation a été brevetée par Herman Drosse. Il a proposé un appareil de chauffage par arc électrique. Depuis les procédés avec utilisation de l'arc n'ont pas cessé d'évoluer en 1912 Schoop remplace la poudre par un film métallique en créant un véritable pistolet de projection, son inventeur reçoit une récompense de mérite en 1915 et la technologie est mondialement connue depuis sous le nom (schoopage). A robotisation des processus ont assuré un progrès constant de la projection thermique et de son application pour l'élaboration de nouveaux matériaux [1].

I.1.2. Définition :

La projection thermique est un procédé permettant de déposer des revêtements métalliques et non métalliques sur matériaux, principalement des aciers, afin d'améliorer les propriétés anti usure et anticorrosives des pièces produites pour différentes applications, cette technologie a plusieurs avantages. Un des principaux est la grande variété de matériaux qui peuvent être utilisés pour produire les revêtements.

I.1.3. principe de la projection thermique :

Le principe consiste à projeter à l'aide d'un gaz vecteur un matériau dit d'apport chauffé à haute température sur un matériau support pour en modifier ses propriétés (**figure I.1**). En s'agglomérant, les particules forment le revêtement. Les liaisons sont purement mécaniques. L'épaisseur du revêtement est comprise entre 50 microns et quelques millimètres.

Projection thermique

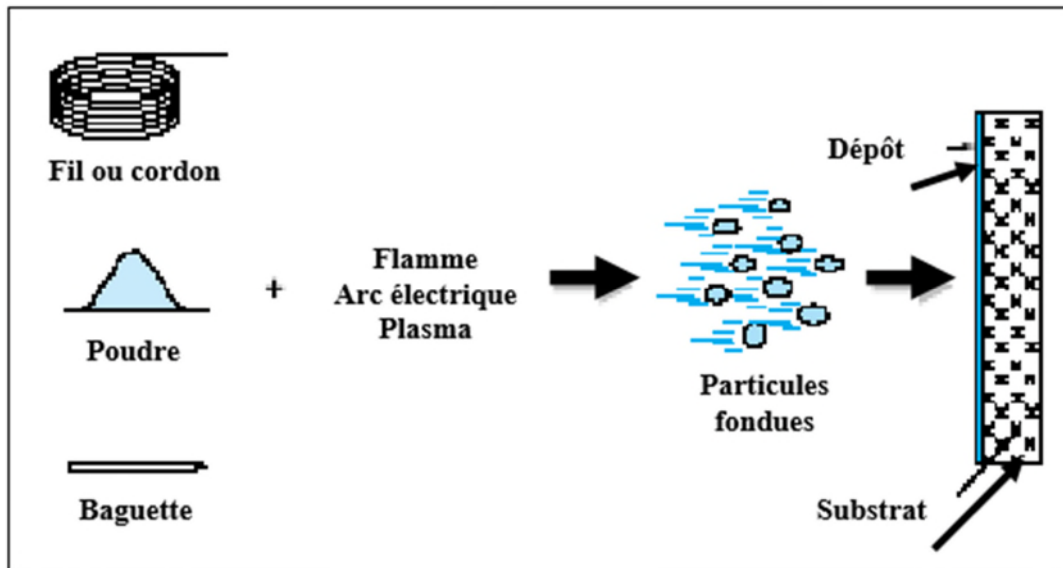


Figure I.1: Schéma simplifié du principe de la projection thermique [2].

Les procédés de projection thermique peuvent être classés en deux catégories :

- Les procédés dont la source de chaleur est un chalumeau oxyacétylénique : procédé flamme-poudre (FP), procédé flamme-fil ou cordon (FF), procédé HVOF (HV) et procédé par canon à détonation (CD).
- Les procédés dont la source de chaleur est un arc électrique : procédé à l'arc électrique (AE) et procédé plasma (PS).

I.1.4. Différents types de procédés de projection thermique :

I.1.4.1. projection par arc électrique entre deux fils :

La projection à l'arc est le premier procédé ayant utilisé l'énergie d'une décharge électrique. Il consiste en un arc électrique créé entre deux fils consommable et un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat.

L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible). Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant (**Figure I.2**).

L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu est

Projection thermique

pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les épaisseurs du dépôt varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à 10 % et une adhérence de 20 à 40 MPA. La technique est simple et peu coûteuse et permet de déposer la matière avec un débit important (de 5 à 30 kg/h). L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt. Des modifications du pistolet et l'emploi d'un second jet de gaz ont permis de concentrer le flux de matière atomisée et de diminuer la porosité des couches [3].

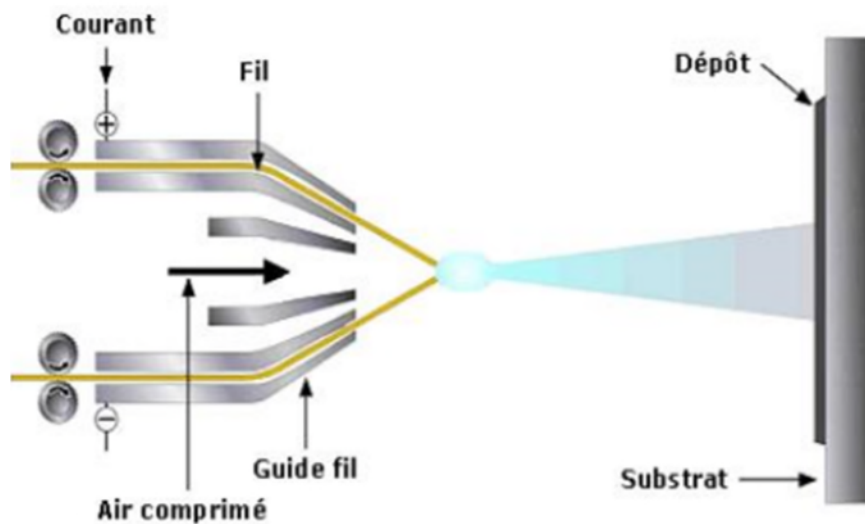


Figure I.2 : Schéma de principe de la projection à l'arc électrique. [4]

Les matériaux projetés sont des métaux conducteurs électriques (aluminium, cuivre, zinc, molybdène), des aciers mais aussi des alliages NiCrAl, NiMoAl.

L'une des limites importantes du procédé est la nature des matériaux (très fiabilité et conductibilité). La gamme des matériaux projetés peut être élargie en utilisant la technologie des fils fourrés qui permet de déposer des carbures (CrC, WC, TiC) et des oxydes ainsi que d'élaborer des couches composites [11].

I.1.4.2. Projection flamme :

Il s'agit du procédé le plus ancien, à l'origine de la projection thermique. Elle est communément appelée (métallisation). Elle est particulièrement adaptée aux matériaux à bas point de fusion. Elle fait appel à une flamme oxyacétylénique comme source de chaleur. La température à l'intérieure de la flamme peut atteindre 3000°C. Le matériau d'apport est véhiculé par l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (**Figure1.3**).

Projection thermique

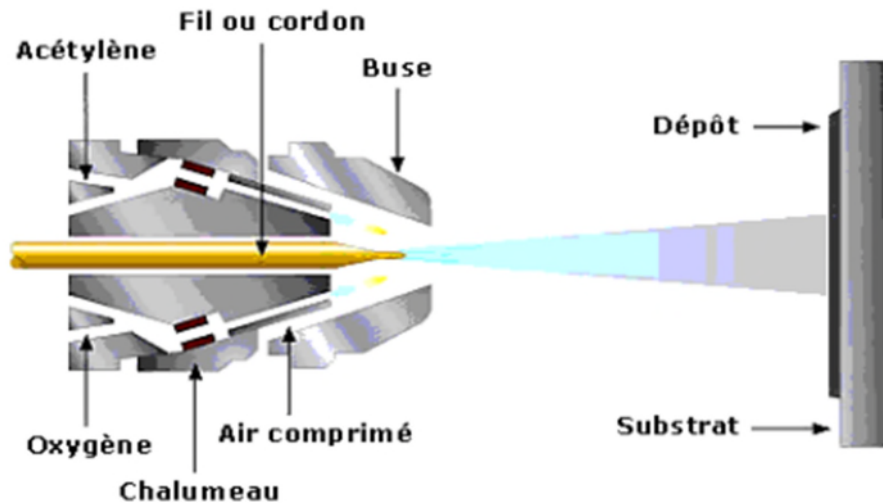


Figure I.3 : projection flamme. [5]

I.1.4.2.1. Projection flamme poudre :

Dans ce cas le matériau d'apport se présente sous forme de poudre. La température des particules atteint 2000°C au sein de la flamme. La vitesse des particules est faible et la distance entre la buse et le support ne doit être que de quelques millimètres. Les matériaux d'apport les plus fréquemment utilisés sont les alliages auto fusibles à base de nickel et le cobalt. Ce procédé est très répandu dans la plupart des industries pour résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique [6].

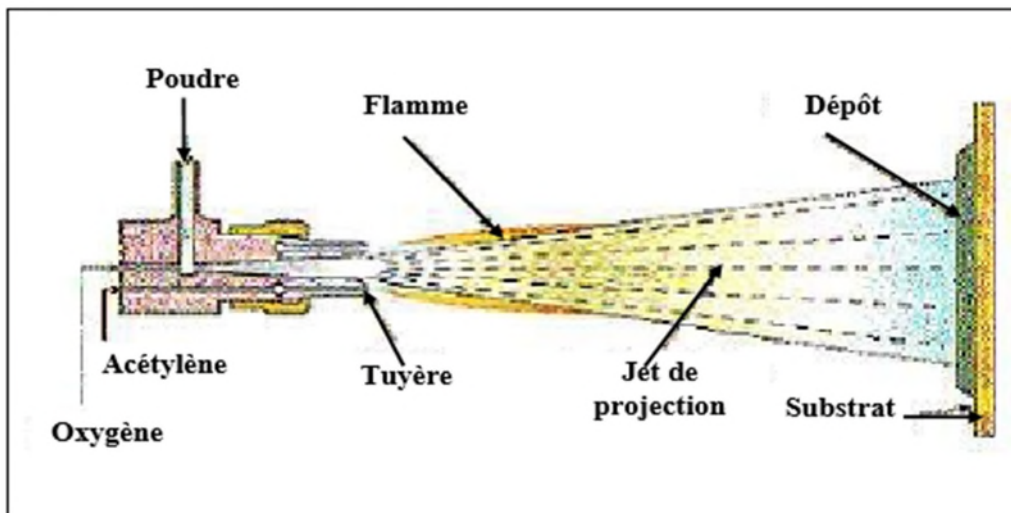


Figure I.4 : schéma de principe de la projection à la flamme poudre. [7]

I.1.4.2.2. Projection flamme fil :

Le matériau d'apport se présente sous forme de fil, de cordon, de baguette ou de fil fourré, la flamme ne sert, dans ce cas qu'à la fonte de matériau. Les particules obtenues seront

Projection thermique

véhiculée par un flux d'air comprimé. Le matériau d'apport les plus fréquemment utilisés sont les métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo), Les aciers inoxydables ou non, Les alliages à base de zinc, de cuivre, de nickel ou d'étain, Les céramique (NiAl, NiCrBSi, Al₂O₃-TiO₃, Cr₂O₃, Cr₂O₃-ZrO₂-CaO). Ces dernières se présentent sous forme de cordon ou de baguettes exclusivement. Ce procédé peut être mis en œuvre dans tous les domaines- aéronautique, automobile, aciéré, sidérurgie, construction d'infrastructures [8].

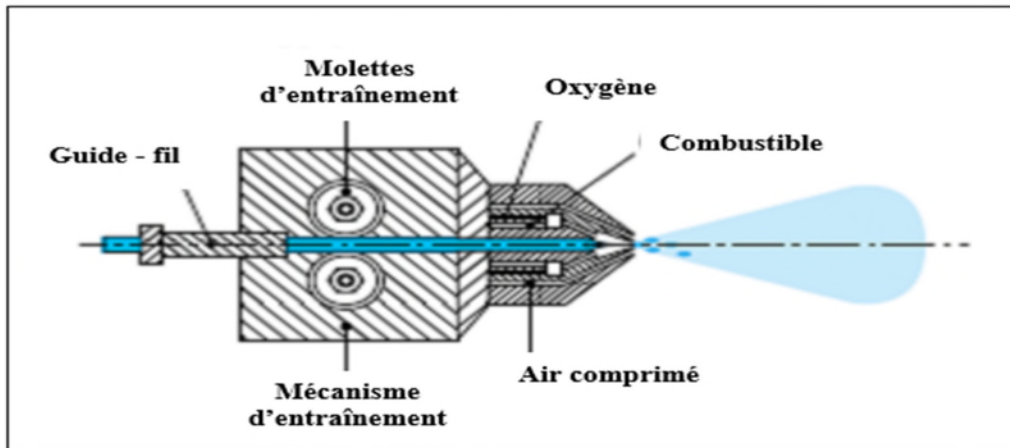


Figure I.5 : principe de la projection à la flamme fil. [9]

I.1.4.2.3. Projection au canon à détonation :

Le matériaux d'apport se présente sous forme de poudre et est chargé dans un tube- le canon détonation –en même temps que le gaz. La détonation est provoquée par l'explosion de ce mélange sous l'action – en même d'une étincelle (**Figure I.6**). Les principaux domaines d'utilisation sont le textile, la sidérurgie, l'aéronautique. [10]

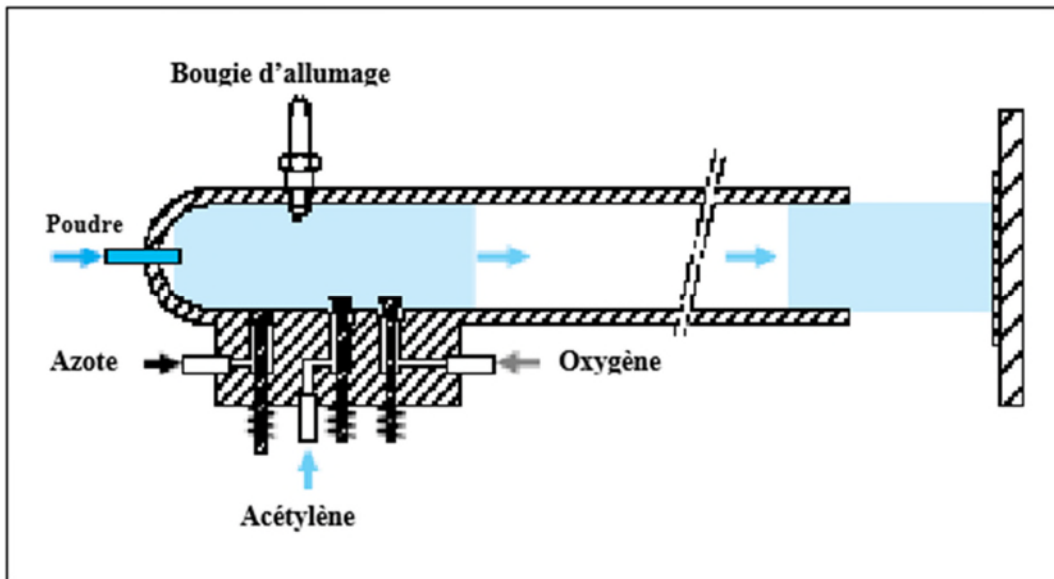


Figure I.6 : Schéma de principe du canon à détonation.

I.1.4.2.4 Projection à tir continu :

Deux procédés peuvent être mis en œuvre : le procédé HVOF (High Velocity Oxy-fuel) et le procédé HVAF (High Velocity Air-fuel) (Figure 1.7). Le choix entre ces deux procédés se fait pour des raisons économiques. Les matériaux d'apport utilisés sont les métaux et les alliages à base de nickel et de cobalt. Les carbures à base de chrome ou de tungstène sont également des matériaux projetables par cette technique. Par contre, les oxydes sont très rarement utilisés. Ce procédé est principalement utilisé dans le traitement anticorrosion dans le secteur aéronautique, l'aciérie [11-12].

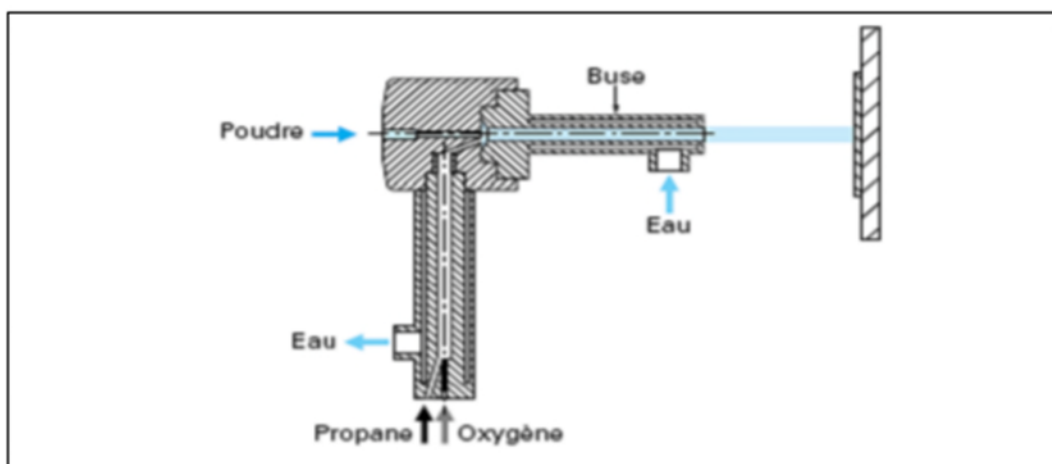


Figure I.7 : Schéma de principe de la projection HVOF. [1]

I.1.4.3. La troche plasma :

Le principe de ce procédé est l'utilisation d'un arc électrique dans un plasma gazeux. Le matériau d'apport sous forme de poudre est introduit dans cette source de chaleur d'une température comprise entre 1500° et 20000°C (**Figure I.8**). Ce procédé est essentiellement mis en œuvre dans l'air ambiant, mais pour obtenir des revêtements plus épais à de plus faibles températures, il peut être mis en œuvre sous atmosphère contrôlée ou sous vide, L'épaisseur du dépôt est variable en fonction des demandes et la porosité est inférieure à 10%.

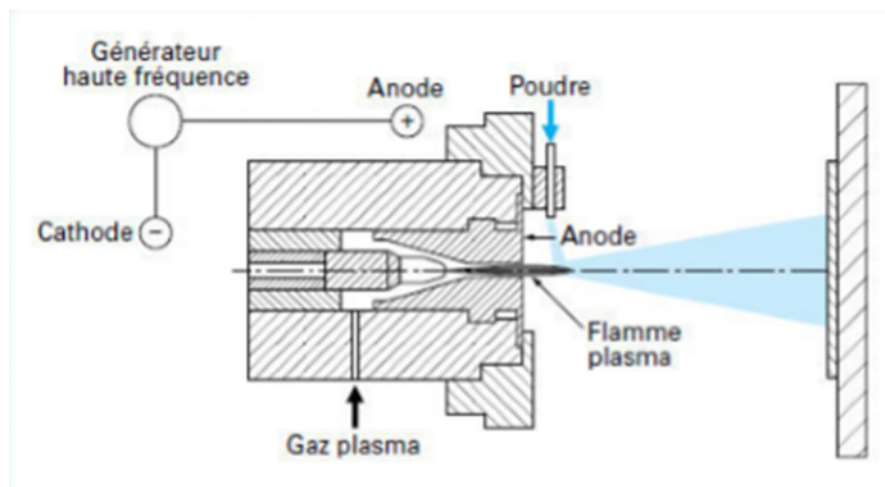


Figure I.8 : Schéma de principe de la projection par troche plasma [13]

Ce procédé peut être facilement mis en œuvre et permet de résoudre des problèmes d'usure, de corrosion, de barrière thermique, de frottement ou d'oxydation, notamment dans les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile [14].

I.1.4.4. Les plasmas à arc soufflé ou à arc non transféré(PTA) :

Comportement deux électrodes (l'anode et la cathode). L'anode est percée d'un trou central servant de tuyère d'éjection de la colonne de plasma. Le gaz est injecté autour de la cathode, traverse l'arc électrique et s'échappe par la tuyère anodique. Ce générateur à arc interne permet d'obtenir une colonne plasma à une température supérieure à 10000° K.

I.1.4.5. Les plasmas à arc transféré :

Elles ne comportent qu'une seule électrode (froide ou chaude). L'arc jaillit entre l'électrode interne et un corps conducteur (généralement le bain) en contact avec une contre électrode

Projection thermique

(Figure 1.9). La résistivité électrique du bain est mise à profit pour y créer une émission complémentaire d'énergie par effet Joule.

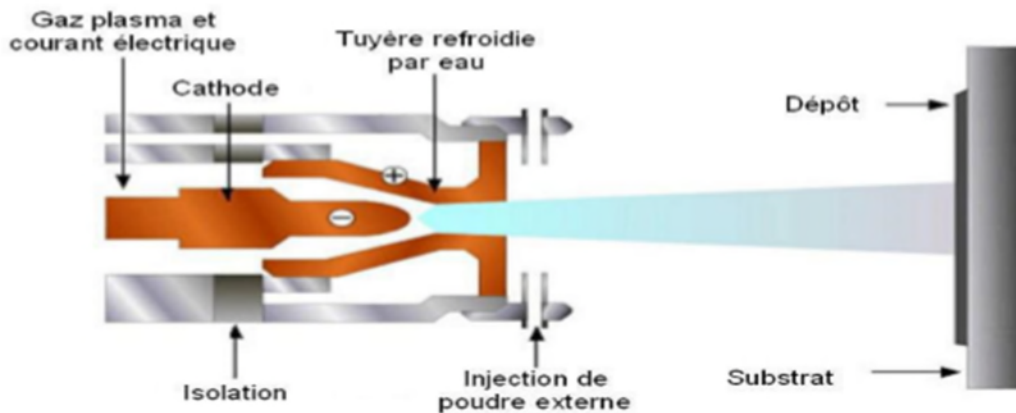


Figure I.9 : Torche plasma à arc transféré.

I.1.5. Construction d'un dépôt :

La construction du revêtement par projection à basse pression est similaire à la construction du revêtement en APS classique. L'aspect typique d'un empilement de particules peut être observé dans la microstructure dans le cas d'une température d'élaboration insuffisante pour la cristallisation du dépôt en cours de la projection. Une structure lamellaire (Figure I.10) obtenue par des écrasements et solidification successive de particules totalement ou partiellement fondues et projetées par le jet de plasma peut contenir les éléments suivants :

- Des particules in fondues
- Des pores
- Des oxydes, dans le cas de présence d'oxygène dans projeté ou dans l'environnement.

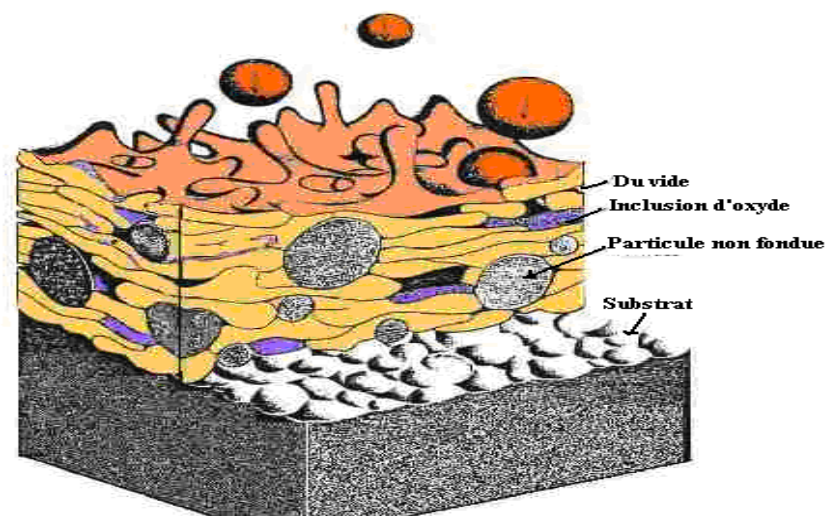


Figure I.10 schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique [15].

Projection thermique

Ces différents éléments ont une forte influence sur les caractéristiques mécaniques du matériau, une cristallisation du dépôt a lieu et les frontières entre lamelles sont moins présentes ou disparaissent complètement, avec observation de grains. Le temps de traitement de la particule dans le jet de plasma est de l'ordre de la milliseconde.

Le processus d'écrasement de la particule est très rapide, la durée entre l'impact et l'étalement d'une gouttelette est de l'ordre d'une microseconde [16]. Le mécanisme d'étalement et de solidification d'une gouttelette est et fondamental pour la projection thermique car c'est une clef de la construction du dépôt. Ce processus est dépendant de plusieurs paramètres :

- Nature et forme du matériau,
- Température et vitesse de la particule à l'impact,
- Tension superficielle de la gouttelette,
- Nature de substrat,
- Température, rugosité, mouillabilité du substrat,

Les interactions possible avec le substrat ont été étudiées et classées par Kudinov [22]. La **(Figure I.11)** représente les résultats des écrasements en fonction du type de particule, de sa température, de sa vitesse et des conditions de mouillabilité à la surface du substrat.

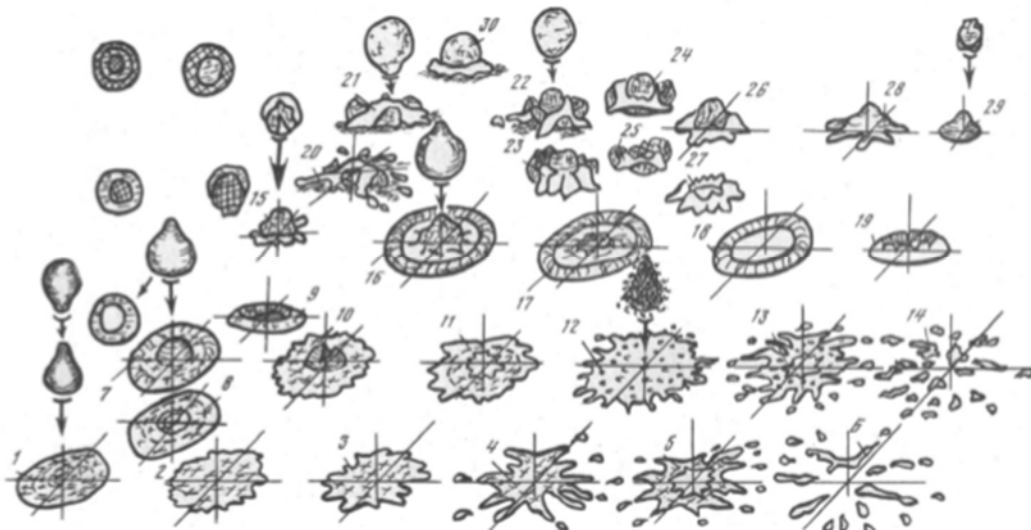


Figure I.11 : Résultats des interactions des particules avec le substrat. [17]

Projection thermique

Les numéros dans la (**Figure I.11**) correspondent aux différents états de la particule : la particule est complètement fondue (1-6), la particule est complètement fondue avec une cavité remplie de gaz (7-11), la particule est surchauffée avec un début d'évaporation (12-4), la particule est fondue en surface (15), partiellement fondue avec un noyau solide (16-19), la particule est ré-solidifiée en surface et possède un noyau fondu (20,21,30), la particule est ré-solidifiée en surface et possède une couche intermédiaire fondue et un noyau solide (22-30), la particule est solide et accélérée (28,29). L'éclaboussement de la particule dépend fortement de la température et de l'état de surface du substrat.

I.1.6 Paramètres de projection influant sur le dépôt :

a)-Débit de gaz : Un excès d'oxygène (flamme oxydante) augmente l'oxydation de dépôt, donc sa dureté est réduite sa résistance mécanique.

Le dépôt devient fragile et difficile à usiner. Un excès du taux d'acétylène (flamme carburante) entraîne un charbonnage de revêtement. Dans les deux cas, on note l'usure prématurée des buses.

b)-Pression de gaz : Une pression trop forte de gaz augmente les pertes de métal donc toutes les consommations (Dissipation d'énergie).

c)-Diamètre du fil ou du cordon : Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente le grain du dépôt et les pertes.

d)-Vitesse du fil ou du cordon : trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur du grain, trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.

e)-Pression de l'air :(air comprimé vecteur de la projection). Son accroissement diminue la grosseur du grain mais augmente l'oxydation du dépôt.

f)-Distance de projection : trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence et surchauffe du dépôt trop grande, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence.

Projection thermique

g)-Angle de projection : En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.

h)-Vitesse de balayage : Trop rapide, elle augmente les pertes de métal et donne des épaisseurs de dépôt trop lente, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulières et élève la température du support.

i)-Vitesse de rotation : Trop rapide elle entraîne un rebondissement des particules et une pollution du dépôt trop lente, elle entraîne une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.

j)-Refroidissement : Trop rapide, il génère le délaminage des couches trop lent, il entraîne une surchauffe et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt.

I.1.7. Préparation de surface :

La qualité d'un revêtement dépend énormément de la préparation préalable de la surface. De façon générale, le but de la préparation de la surface est l'augmentation de l'adhérence. Pour qu'il y ait adhérence, il faut avoir des liaisons directes entre le substrat et le revêtement donc il faut éliminer l'agent étranger déposé sur la surface, essentiellement les graisses. On produit chimiquement l'absence d'une rugosité qui facilite l'accrochage. Préalable, on peut faire une opération de sablage (écrouissage superficielle) pour créer une certaine rugosité.

Il y a trois opérations de préparation des surfaces : dégraissage, décapage et polissage.

I.1.7.1. Dégraissage :

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 ou autres).

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 à l'adhérence du métal d'apport. Cette propreté sera obtenue, suivant le type de polluant de surface, soit par dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le cas d'opération de protection anticorrosion.

Projection thermique

I.1.7.2. Décapage :

Opération qui consiste à se débarrasser des oxydes formés naturellement ou lors de formages à haute température. Il existe 3 types de décapage : décapage chimique, décapage mécanique, décapage électrolytique.

a)-Décapage chimique :

Action d'un réactif chimique qui va dissoudre l'oxyde. On utilise des acide : HCL, H₂SO₂, il faut dissoudre le moins possible le métal. On adjoint un inhibiteur de corrosion qui ralentit beaucoup la vitesse de corrosion. Il intervient par un mécanisme d'adsorption sur le métal et bloque les sites réactifs, le décapage à la soude existe aussi.

b)-Décapage mécanique :

Se fait par voie abrasive. Il faut dégraisser au préalable. Exemple : grattage, brossage. Industriellement, on réalise une projection d'abrasif : sablage (projection de sable avec une lance à la pression de 2à5kg, ce qui entraîne l'enlèvement de la rouille et des oxydes).La méthode est simple, bon marché mais dangereuse. On peut aussi faire un grenailage (sable remplacé par de petites billes d'acier).

c)-Décapage électrolyte :

On utilise la turbulence du dégagement gazeux obtenu par électrolyse, ce qui facilite le décollement des couches s'oxyde. Cette méthode est très utilisée pour éliminer les couches minces.

d)-Inconvénients :

- Si le métal consiste la cathode, le dégagement de l'hydrogène fragilise la pièce.
- Si le métal est anode, l'oxygène dégagé entraîne la passivation.

On enlève l'oxyde mais risque d'en former un autre. On peut travailler en courant alternatif pour diminuer les inconvénients.

I.1.7.3. Polissage :

A pour but s'obtenir le polie spéculaire (élimination de toute l'imperfection au niveau de la surface géométrique et microscopique afin de pouvoir observer au microscope les constituants de l'alliage).

Projection thermique

Il existe trois types de polissage :

- Mécanique (disque abrasif).
- Chimique : trempe de la pièce dans un bain chimique de façon à enlever les irrégularités.
- Electrolytique : dissolution anodique des irrégularités de la surface.

I.1.7.4. Sablage :

C'est une technique de nettoyage des grandes surfaces en utilisant un abrasif projeté à grande vitesse à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse, sur le matériau à décaper.

Quand l'abrasif est constitué de billes, On parle aussi ou plutôt de grenailage. Il permet de décaper, désoxyde, enlève une couche superficielle fragile, il crée rugosité qui facilite l'accrochage d'un revêtement.

A forte puissance les impacts provoquent une déformation plastique et modifient la surface.

A faible puissance avec des abrasifs de gommage, on peut nettoyer sans abimer le substrat.

I.1.7.5. Préchauffage :

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 matériaux plastique qui ne sont pas conductrice de chaleur.

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

I.2. Définition des aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base de fer carbone, qui doivent contenir au moins 13% de chrome et souvent d'autres éléments d'addition tels que le nickel et, dans une moindre mesure, le molybdène. Avant d'examiner les différents équilibres, il est utile de rappeler les variétés allotropiques du fer. Les aciers inoxydables présentent une grande variété de structures et donc de propriétés physiques, mécaniques et surtout chimiques. L'une des principales raisons est le fait que l'élément majoritaire, le fer, présente trois variétés

Projection thermique

allotropiques de structures cristallines différentes entre les basses températures et sa température de transformation :

- en-dessous de 910 °C, le fer a une structure cubique centrée, c'est le fer α ou ferrite.
- de 910 °C à 1400 °C, le fer se transforme en fer γ ou austénite dont la structure est cubique à faces centrées.
- une nouvelle transformation intervient de 1400 °C à 1538 °C pour donner la ferrite α dont la structure est à nouveau cubique centrée.

Ces transformations qui sont réversibles peuvent se résumer suivant le tableau 1.

Tableau1.1 : Variétés allotropiques du fer et structures correspondantes.

Fer α (ferrite) ($\theta < 910$ °C)	Fer γ (austénite) (910 °C < $\theta < 1400$ °C)	Fer δ (forme haute température) ($\theta > 1400$ °C)
Structure cubique centrée	Structure cubique à faces centrées	Structure cubique centrée

Les éléments d'addition présents dans les aciers inoxydables ont tendance à favoriser une structure aux dépens d'une autre, suivant leur concentration. Ces éléments sont ajoutés à l'acier inoxydable de base afin d'en modifier ou d'en d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et mécaniques.

I.3.1 Système fer-chrome :

Le diagramme binaire complet à l'équilibre fer-chrome [figure I-12] montre que l'existence de la phase γ est limitée à l'intérieur d'un domaine appelé « boucle γ » ; cette situation étant due au chrome qui, compte tenu de sa structure cristallographique (cubique centrée), favorise le développement du domaine α .

Projection thermique

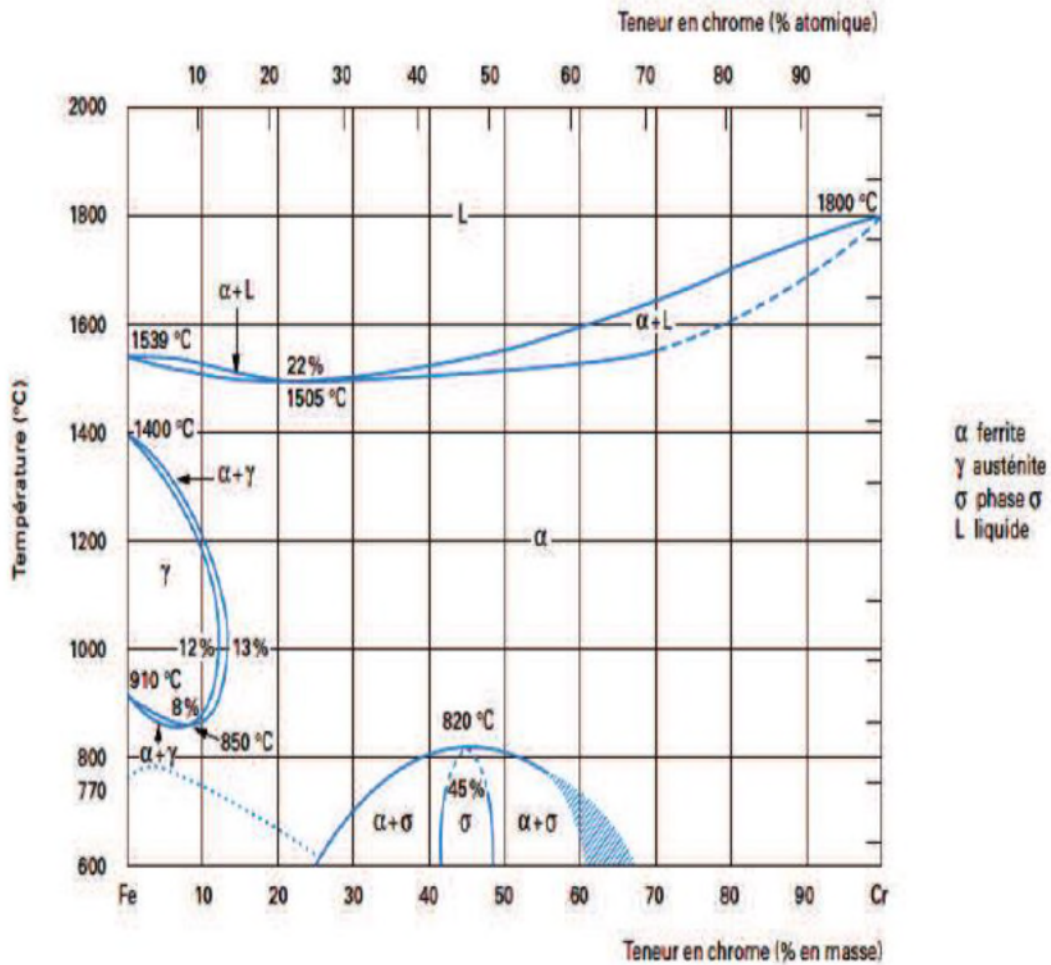


Figure I.12: Diagramme d'équilibre de phases du système fer-chrome

L'étendue du domaine γ va être très fortement influencée par d'autres éléments d'addition. Certains auront tendance à favoriser l'existence de la phase α (structure ferritique) ; ce sont les éléments dits α -gènes qui sont le chrome, le bore ou le molybdène. D'autres, à l'opposé, auront tendance à favoriser l'existence de la phase γ (structure austénitique) ; ce sont les éléments dits γ -gènes parmi lesquels on trouve le carbone ou l'azote et le Nickel.

Suivant l'équilibre entre ces différents éléments, les alliages Fe-Cr-C peuvent avoir les structures suivantes :

- martensitique, après trempé (c'est-à-dire chauffage et maintien au-dessus de 950 °C suivi d'un refroidissement rapide) d'un alliage se situant à l'intérieur de la boucle γ . L'alliage à 13% de chrome et 0,3 % de carbone (X30Cr13) est représentatif de cette famille.

Projection thermique

- semi-ferritique, après chauffage puis refroidissement d'un alliage se situant dans la zone biphasée ($\alpha+\gamma$). L'alliage à 17 % de chrome et 0,06 % de carbone (X6Cr17) est le plus représentatif de cette famille.
- ferritique, après traitement thermique d'un alliage se situant à droite de la boucle γ . Il s'agit d'une addition de titane afin de prévenir le risque de précipitation de carbures de chrome. d'un alliage à teneurs élevées en chrome et en molybdène du type X3CrTiMo17 stabilisé par une addition de titane afin de prévenir le risque de précipitation de carbures de chrome.

I.3.2 Classes des aciers inoxydables :

I.3.2.1 Aciers martensitiques :

Pour obtenir un acier inoxydable de structure martensitique, deux conditions indispensables doivent être satisfaites :

- présence d'une teneur en chrome supérieure à 11 % pour assurer l'inoxidabilité.
- existence d'un domaine de température où l'acier prend la structure austénitique.

L'obtention d'une structure entièrement martensitique, après trempe, confère à ces aciers inoxydables une limite d'élasticité, une résistance à la rupture et une dureté élevées, conjuguées à une résistance à la corrosion. De tels aciers inoxydables sont utilisés pour les instruments chirurgicaux et en coutellerie.

I.3.2.2 Aciers inoxydables ferritiques :

Les aciers inoxydables ferritiques sont caractérisés par le fait que leur structure reste ferritique dans tout l'intervalle de température, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de transformation $\alpha\leftrightarrow\gamma$. Avec les aciers ferritiques, plus la teneur en chrome sera élevée et plus le risque dit de « fragilisation à 475 °C » sera grand. Ce phénomène se caractérise par une augmentation de la dureté accompagnée d'une diminution de la ténacité par suite du maintien durant plusieurs centaines d'heures à des températures comprises entre 400 et 500 °C.

I.3.2.3 Aciers inoxydables austénitiques :

Les aciers inoxydables austénitiques de composition Fe-Cr-Ni ont leur structure cristallographique de type cubique à faces centrées qui leur confère une ductilité et une ténacité exceptionnelles. Il faut ajouter également une excellente soudabilité métallurgique, ce

Projection thermique

qui facilite leur mise en œuvre. Ce sont les aciers inoxydables les plus utilisés, dans les industries chimiques et agro-alimentaires, pour fabriquer les couverts de table, etc.

Dans les aciers inoxydables austénitiques fer-chrome-manganèse-nickel, le rôle du manganèse est fondamentalement différent de celui du nickel car il n'élargit pas le domaine d'existence de la phase γ aux températures élevées. Autrement dit, le manganèse stabilise l'austénite formée à haute température mais ne contribue pas à sa formation.

Les aciers inoxydables super austénitiques résistent à des milieux particulièrement agressifs. Leurs compositions chimiques sont adaptées pour optimiser la résistance à la corrosion vis-à-vis de milieux spécifiques. Outre le chrome et le nickel, ces aciers contiennent du molybdène et de l'azote.

I.3.2.4 Aciers inoxydables austéno-ferritiques :

Un alliage contenant environ 25 % de chrome et 5 % de nickel aura à la température ambiante, et après avoir subi un traitement thermique approprié, une structure formée de ferrite et d'austénite. Pour améliorer leur résistance à la corrosion, on ajoute fréquemment du molybdène ce qui conduit, corrélativement, à baisser la teneur en chrome à un niveau de l'ordre de 20 %. Ainsi, une structure de 50 % de ferrite α et 50 % d'austénite γ est formée, d'où le nom de structure duplex.

Les aciers inoxydables austéno-ferritiques présentent d'excellentes performances (ductilité, ténacité, résistance à la corrosion entre - 40 et 75 °C).

I.3.3 Acier inoxydable X30Cr13 :

Cet acier contient 0,3 % de carbone et 13 % de chrome en masse fait partie de la famille des aciers inoxydables ferrito-martensitiques [32]. Nous décrirons successivement les caractéristiques métallurgiques des ferrito-martensitiques et l'influence des traitements thermiques sur cette famille d'aciers inoxydables. Puis, nous indiquerons les principales propriétés physiques et mécaniques de l'acier X30Cr13 et citerons quelques-unes de ses applications.

I.3.4 Principales Applications :

De ces différents critères et de l'agressivité des milieux avec lequel l'acier inoxydable sera en contact et donc de la résistance à la corrosion attendue, le tableau 2 donne un résumé des principales situations rencontrées.

Projection thermique

Plusieurs diagrammes ont été proposés, partant du constat que certains éléments d'alliages ont un effet α -gène et d'autres un effet γ -gène, pour déterminer la structure des aciers inoxydables.

Tableau I.2 : Principales applications des aciers inoxydables

Application	Famille de nuances	R L C	C M	F E C	Soudage
Industrie alimentaire, le stockage du vin	Austénitiques : Fe-Cr-Ni (Mo)	***	*	*	**
Ustensiles ménagers	Austénitiques : Fe-Cr-Ni	***	*	***	*
Echappement automobile	Férritiques Fe-Cr-(Ti/Nb)	**	**	***	*
Appareils électroménagers	Austénitiques : Fe-Cr-Ni Férritiques Fe-Cr-(Ti)	**	*	***	**
Matériels de sports	Austénitiques : Fe-Cr-Ni(N) Férritiques Fe-Cr	**	***	**	**
Coteaux, instruments chirurgicaux	Martensitiques Fe-Cr-(Ni-Mo)	**	***		
Industries chimique et papetières	Austénitiques : Fe-Cr-Ni-Mo Austénoférritiques Fe-Cr-Ni-Mo	***	**	*	***
***: très élevées ** : élevées * : moyenne					

RLC : Résistance à la corrosion

CM : Caractéristiques mécaniques

FEC : Formage, emboutissage, Cintrage

Projection thermique

I.3.5 Système ternaire fer-chrome-carbone :

Vis-à-vis de l'allotropie du fer, le chrome et le carbone jouent le rôle d'élément d'addition α -gène et γ -gène respectivement.

Le diagramme d'équilibre de phases du système Fe-Cr-C à 13 % de chrome est représenté (figure I.13).

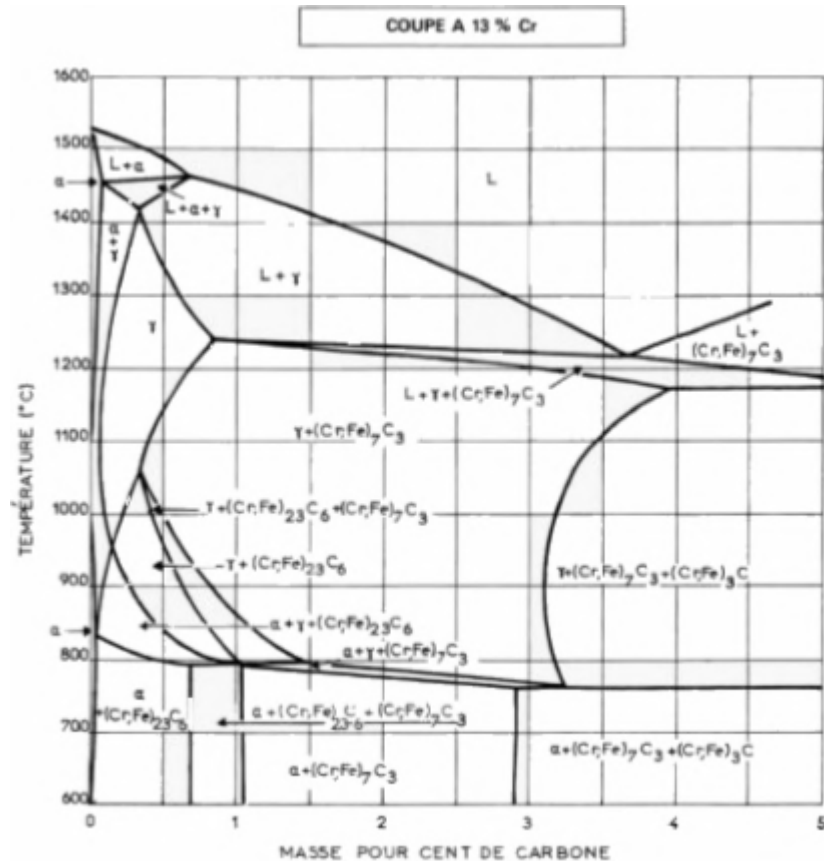


Figure I.13: Diagramme de phases pseudo-binaire fer-carbone à 13 % de chrome

Deux conditions sont nécessaires pour obtenir un acier inoxydable martensitique :

- Une teneur en chrome supérieure à 11 % pour assurer l'inoxidabilité.
- L'existence d'un domaine de température où l'acier prend la structure austénitique (cubique à faces centrées). Lors du refroidissement rapide de l'acier X30Cr13 après une austénitisation à 1 060°C, température en-dessous de laquelle commence la transformation martensitique, l'acier austénitique (structure cubique à faces centrées) devient ferrito-martensitique. En effet, selon la teneur en carbone, la structure peut être soit sensiblement cubique centrée (ferritique), soit tétraogonale centrée (martensitique). La place disponible théorique dans les interstices octaédriques de la structure cubique centrée est de 0,038 nm le long de l'axe [001] et de 0,159 nm dans le

Projection thermique

plan (001), tandis que le diamètre des atomes de carbone est de 0,154 nm. Deux scénarios peuvent alors se produire :

- Si peu de sites octaédriques sont occupés par des atomes de carbone (cas des aciers inoxydables martensitiques à basse concentration en carbone ($< 0,18\%$)), une relaxation s'effectue sur les sites non occupés, globalement la maille est peu déformée et reste sensiblement cubique centrée (structure ferritique).
- Si de nombreux sites sont occupés par des atomes de carbone (cas des aciers inoxydables à forte concentration en carbone ($> 0,18\%$)), la relaxation est alors impossible et la maille se déforme pour devenir tétragonale (structure martensitique).

I.4. Corrosion

I.4.1 Introduction

L'importance considérable de la corrosion dans la vie quotidienne (domestique ou industrielle) n'est plus à démontrer. En effet, ce phénomène touche pratiquement toutes les réalisations de l'ingénieur, des plus grandes au plus petites : production de l'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, etc. Dans les pays industrialisés les conséquences de la corrosion ne résident pas seulement dans le coût économique (gaspillage de matière première, énergie et temps) mais également dans les accidents que peut provoquer (sécurité public en jeu) ainsi que le mauvais impact sur l'environnement. [23].

I.4.2 Définition de corrosion

Selon le point de vue de l'ingénieur constructeur, norme AFNOR NF EN ISO 8044
« La corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction chimique avec l'environnement ». Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible : elle détruit le matériau ou réduit ses propriétés, le rendant inutilisable pour une application prévue. Un autre phénomène dégrade le matériau : l'usure, perte progressive de matière de la surface d'un solide, due au frottement ou à l'impact. Un phénomène principalement mécanique où, cependant, les interactions chimiques entre le matériau et l'environnement jouent parfois un rôle emportant en accélérant ou en ralentissant la dégradation.

L'étude de la corrosion et protection des métaux englobe donc aussi les phénomènes de dégradation dus aux sollicitations mécaniques et chimiques combinées. Parfois la corrosion est un phénomène bienvenu, voire souhaité. Elle détruit et élimine un grand nombre d'objets

Projection thermique

abandonnés dans la nature. Certains procédés industriels font également appel à la corrosion. Par exemple l'anodisation de l'aluminium est une oxydation de la surface du métal pour former un film d'oxyde décoratif qui protège de la corrosion atmosphérique. Le polissage chimique ou électrochimique des métaux permet, par dissolution (corrosion) du métal, d'obtenir une surface lisse et brillante.

Nous pouvons donc donner une définition plus générale de la corrosion : la corrosion est une réaction inter faciale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement. Cette définition inclut les effets positifs de la corrosion ainsi que l'absorption d'une composante de l'environnement sans consommation du matériau. L'absorption de l'hydrogène par l'acier est, considéré comme une réaction de corrosion. [24].

I.4.3 Processus de corrosion

L'attaque, ou corrosion de l'acier, a comme conséquence une destruction plus ou moins rapide et accentuée du matériau et se manifeste par la transformation en divers oxydes hydratés, ou carbonates, de l'élément fer. Ces oxydes constituent la rouille qui est une substance poreuse, friable, peu adhérente et foisonnante. Par sa porosité la rouille n'est pas susceptible de protéger les couches sous-jacentes et à terme on peut arriver à la ruine du matériau acier.

Très sommairement, on distingue deux processus de corrosion de l'acier. [25].

I.4.3.1 Corrosion sèche

Elle est due à l'action de l'oxygène de l'air en présence d'eau. Le gaz carbonique et l'anhydride. Sulfureux, présents dans l'air et dans les gaz d'échappement accélèrent les réactions. La couche d'oxyde n'étant pas protectrice, le processus de corrosion continue tant qu'il y a présence d'oxygène et d'humidité. [26].

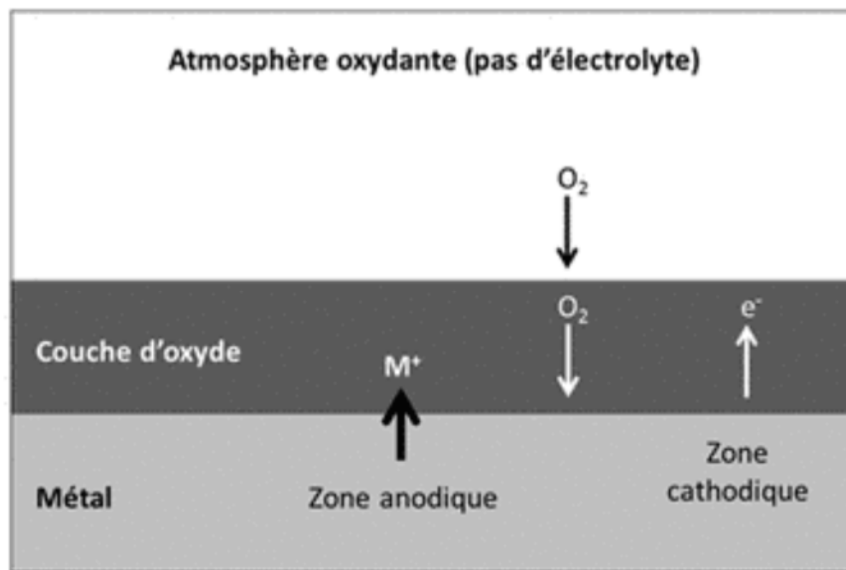


Figure I-14 : Schéma de principe de corrosion sèche.

I.4.3.2 Corrosion biochimique :

Il est généralement spécifique pour les matériaux enterrés tels que les canalisations. Il se résume dans l'attaque de telles structures par certains types de bactéries. Ces dernières utilisent quelque élément chimique se trouvant dans le matériau pour leurs transformations métaboliques ou revêtent des produits chimiques, de nature agressive et qui attaquent les zones de voisinage. [26].

I.4.3.3 Corrosion humide :

La corrosion humide est la plus rencontrée dans l'industrie du gaz et du pétrole ainsi que dans l'industrie pétrochimique. Elle est responsable de la dégradation des structures métalliques en contact avec tout milieu susceptible de contenir de l'eau. La corrosion humide fonctionne comme une pile électrochimique et doit donc réunir simultanément quatre facteurs pour pouvoir se déclencher [27].

- **Une anode** : c'est la partie du métal où se développe la réaction d'oxydation entraînant une dissolution de cette partie sous forme de cations positifs dans le milieu aqueux.
- **Une cathode** : c'est la partie du métal où se développe la réaction de réduction d'une espèce contenue dans l'électrolyte (dégagement d'hydrogène par réduction d'ions H^+ , formation d'eau par réduction de l'oxygène en milieu acide, formation d'ions OH^- par

Projection thermique

réduction de l'oxygène en milieu basique, dépôt d'un métal par réduction d'un de ses cations...).

- **Un conducteur électrique** : qui puisse véhiculer les électrons libérés de l'anode vers la cathode. Ce rôle est assuré par le métal lui-même.
 - **Un conducteur ionique** : qui puisse permettre la migration des cations libérés de l'anode vers les anions libérés à la cathode pour assurer la neutralité électrique et fermer le circuit électrique. Ce rôle est joué par le milieu électrolytique lui-même.
- [27]

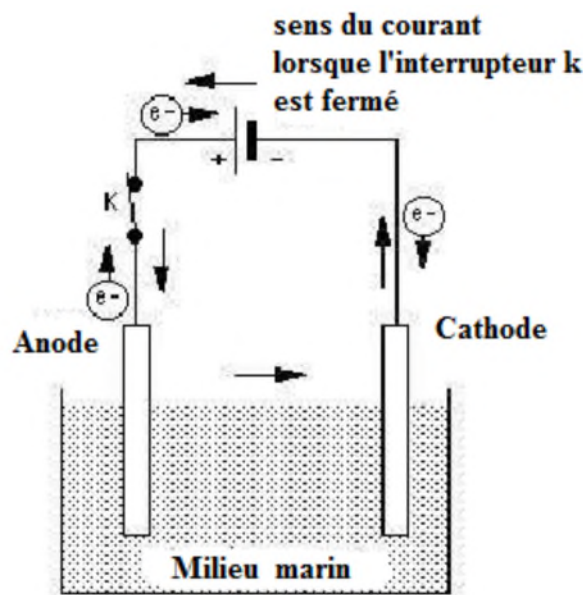
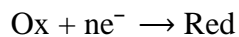


Figure I-15 : Schéma de principe de corrosion électrochimique.

- **Le potentiel d'électrode**

Le phénomène de base des réactions électrochimiques est un échange d'électrons entre ions.

La notion d'oxydation a été généralisée et interprétée aujourd'hui comme une perte d'électrons, et la réduction comme un gain d'électrons :



Avec :

Ox : forme oxydée.

Red : forme réduite.

Ainsi, lorsqu'un métal est mis en contact avec une solution liquide conductrice, il est susceptible de se dissocier spontanément en ions, il se trouve porté à un potentiel correspondant à l'équilibre de dissolution. Ce potentiel de dissolution dépend :

Projection thermique

- de la nature du métal, de son état métallurgique, de son état de surface,
- de la nature de la solution, et en particulier de la concentration du soluté,
- de la température.

Si l'on prend la précaution d'utiliser une solution d'un sel du métal à une concentration et une température définies, la valeur obtenue est caractéristique du métal. Si la solution à une concentration normale, le potentiel est appelé potentiel normal d'électrode. [27].

- **Processus électrochimique**

L'étude des processus électrochimiques nécessite un appareillage capable de contrôler et mesurer les potentiels et/ou les courants électriques sur une interface électrochimique. On utilise une cellule électrochimique à trois électrodes: électrode de travail, électrode de référence et contre électrode (ou électrode auxiliaire). [28].

I.4.7 Techniques électrochimiques

Nous allons au cours de cette section présenter un certain nombre de techniques électrochimiques. Elles peuvent être utilisées autant pour l'étude des mécanismes réactionnels mis en jeu lors d'un processus d'électrodéposition que pour la formation du dépôt lui-même. Les méthodes principalement utilisées sont la voltamètre cyclique, la chronoampérométrie et l'impédance électrochimique. [29].

I.4.7.1 Voltamétrie

La voltamétrie est une technique d'électro analyse basée sur la mesure du flux de courant résultant des phénomènes électrochimiques qui se produisent à la surface de l'électrode sous l'effet d'une variation contrôlée de la différence de potentiel entre deux électrodes spécifiques. La voltamétrie repose sur un balayage linéaire aller-retour du potentiel, permettant la mesure des courbes $i = f(E)$ pour l'oxydation et la réduction du composé. Cette technique permet de calculer le potentiel de corrosion (E_{corr}), le courant de corrosion (I_{corr}) et la résistance à la polarisation (R_p). Ces trois grandeurs sont déterminées en utilisant la méthode de polarisation linéaire à partir des courbes de voltamétrie (courbes densité de courant – potentiel) à l'aide d'un montage potention-dynamique à trois électrodes.

E_{corr} correspond au potentiel à partir duquel le film de passivation s'altère et de ce fait la corrosion du biomatériau permet de déterminer l'intensité de courant critique (I_c) ou la

Projection thermique

densité de courant critique (i_c) qui est les valeurs à atteindre pour passiver le matériau. [29]. Les principales grandeurs caractéristiques d'un voltampérogramme sont données sur la Figure (I.16)

Avec :

I_{pa} , I_{pc} : Courants de pic anodique et cathodique

E_{pa} , E_{pc} : Potentiels de pic anodique et cathodique

$E_{pa/2}$, $E_{pc/2}$: Les potentiels à mi-hauteur des pics anodiques et cathodiques

ΔE_p : Différence de potentiel entre E_{pa} et E_{pc} .

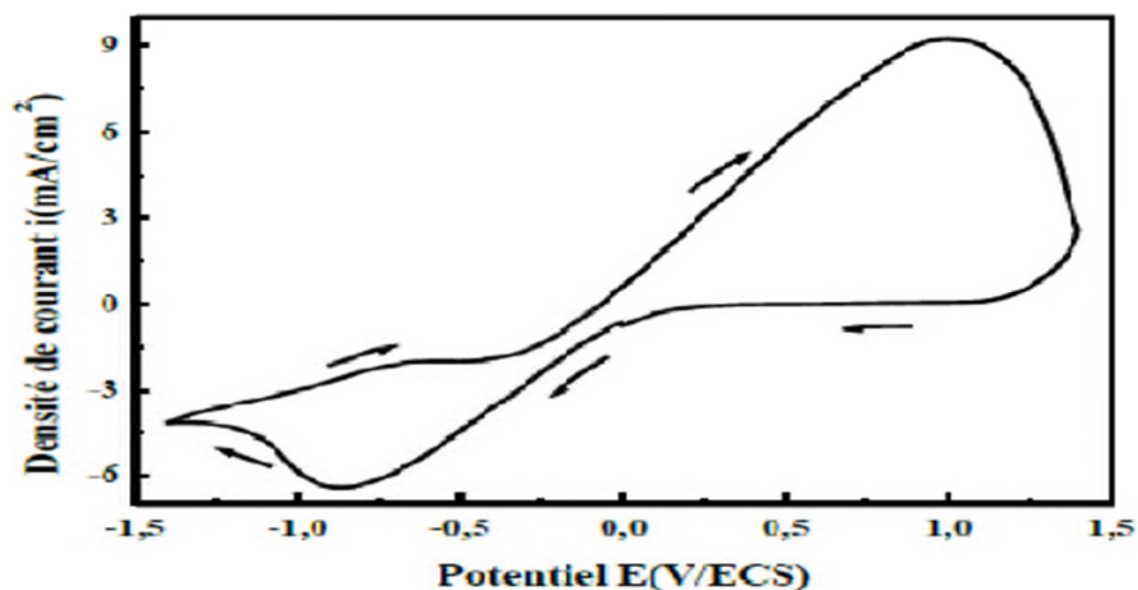


Figure I-16 : L'allure générale de la courbe voltampérométrique et ses grandeurs Caractéristiques

I.4.7.2 Chronoampérométrie

La chronoampérométrie est une méthode électrochimique qui consiste à imposer ou fixer un potentiel et faire varier le courant on fonction du temps. Cette méthode présente un intérêt principal dans le cas des processus avec formation d'une phase nouvelle, et notamment dans le cas des dépôts métalliques, Elle permet alors de mettre clairement en évidence quantitativement (à l'aide des modèles théoriques) les phénomènes (transitoires) de nucléation, puis de croissance cristalline. Dans le cas d'un système rapide contrôlé par la diffusion, l'expression du courant en fonction du temps est donnée par l'équation de Cottrel comme suit :

$$i = n \cdot F \cdot C (D/\pi t)^{1/2}$$

Projection thermique

Où :

i : densité du courant, n : nombre d'électrons échangés, F : constante de Faraday.

D : coefficient de diffusion, C : concentration, t : temps.

Le schéma théorique (Figure I-17) de la courbe courant-temps pour la germination tridimensionnelle comprend trois zones distinctes :

- Zone I : Correspond à la zone de la double couche et au temps nécessaire pour former les germes.
- Zone II : Correspond à la croissance des germes donc à l'augmentation de la surface active sur l'électrode.
- Zone III : Traduit le fait que la diffusion des ions dans la solution devient l'étape limitant pour la réaction de croissance du film déposé. [30].

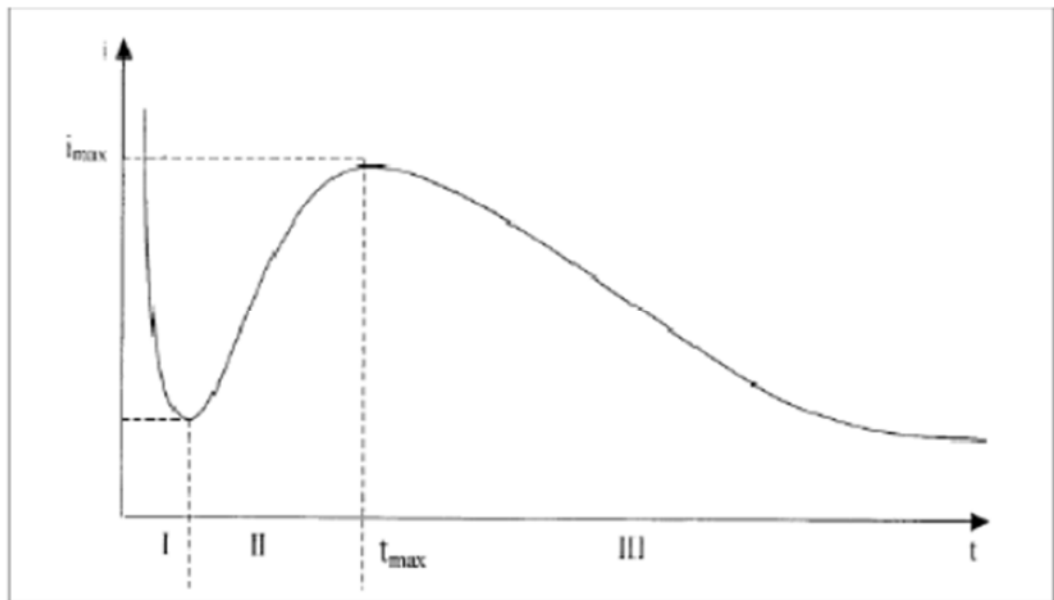


Figure I-17 : Schéma théorique de la courbe courant-temps pour la germination tridimensionnelle.

I.4.8 La cellule électrochimique

Une électrode est un système constitué de deux phases en contact (Figure. I-18), un conducteur majoritairement électronique et un conducteur majoritairement ionique, dont l'interface est le lieu de transfert de charges entre les constituants des deux phases. L'association d'au moins deux électrodes constitue une cellule électrochimique. Les composants d'une cellule de corrosion sont :

Projection thermique

- L'anode : c'est la partie de l'électrode dans laquelle l'oxydation a lieu et à partir de laquelle les électrons sont générés (perte d'électrons).
- La cathode : c'est la partie de l'électrode qui ne se corrode pas, les électrons qui arrivent de l'anode sont déchargés dans la cathode (gain d'électrons).
- L'électrolyte : c'est le milieu aqueux (conducteur ionique).
- La liaison électrique : l'anode et la cathode doivent être connectées électriquement pour permettre au courant électrique de passer dans la cellule de corrosion. [31].

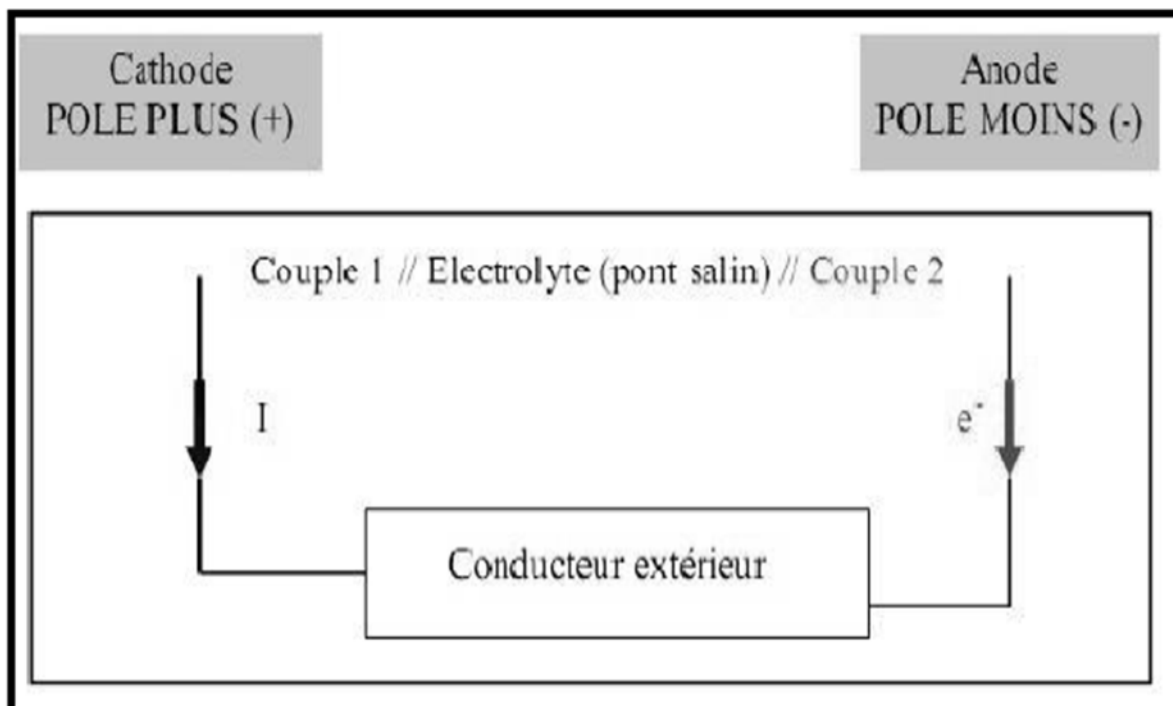


Figure I-18 : Schéma de base d'une cellule électrochimique

I.4.9 Les facteurs de la corrosion

On peut classer les facteurs qui influent ou favorisent la corrosion selon l'action du milieu, la microstructure des matériaux et d'autres facteurs sont classifiés dans le tableau suivant:

Projection thermique

Tableau I.3 : Les principaux facteurs de la corrosion [31].

Facteurs du milieu corrosif	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendants du temps
-Concentration du réactif -Teneur en oxygène -PH du milieu -Température -Pression	-Composition de l'alliage -Procédés d'élaboration -Impuretés -Traitement thermique -Traitement Mécanique	-Etat de surface -Forme des pièces -Emploi d'inhibiteur -Procédés d'assemblage	-vieillessement -Tensions mécaniques -Modification des revêtements protecteurs

La vitesse de corrosion d'un métal dans un milieu corrosif dépend à la fois des deux paramètres: la température et le pH qui influent directement sur la vitesse de corrosion, et ont une influence indirecte à travers la phase aqueuse (eau de condensation, eau de production). [31].

- **Effet de la température** : Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de la corrosion, car elle diminue le domaine de stabilité des métaux et accélère la cinétique des réactions.
- **Effet d'acidité** : La susceptibilité du matériau à la corrosion est en fonction du pH de l'électrolyte. Une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui modifie les équilibres des réactions chimiques et électrochimiques. La corrosion augmente avec la diminution du pH du milieu
- **Régime hydrodynamique** : Le transport des réactifs vers l'interface et des produits de réaction vers l'électrolyte a modifié la cinétique des réactions électrochimiques en changeant la concentration des espèces et donc le potentiel d'équilibre. Les conditions hydrodynamiques fixent les vitesses de réactions en contrôlant le transport de matière par l'établissement d'une couche de limite de diffusion des espèces, appelée couche de Nernst, ce qui explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte lors des essais de corrosion en laboratoire. [31].

I.4.10 Importance de l'étude de la corrosion

L'importance de l'étude de la corrosion est double .La première est économique, elle concerne la réduction des pertes de matériel qui résultent de détérioration ou des ruptures soudaines de tubulures, de réservoirs, de pièces métalliques de machines, de coques des navires, des structures marines etc. la seconde est la conservation appliquée premièrement aux ressources de métal dont les réserves mondiales sont limitées et dont la destruction implique des pertes correspondantes d'énergie et de réserves d'eau accompagnant la production et la fabrication des structures métalliques. [32].

I.4.11 Protection contre la corrosion

La corrosion étant la dans un milieu ambiant, par conséquent pour lutter contre ce phénomène, il faut agir soit sur le métal lui-même [33].

I.4.11.1 Agir sur le métal

Dans ce cas, on peut appliquer une protection cathodique ou anodique ou bien un revêtement.

- **Protection cathodique**

La protection cathodique est une technique électrochimique de réhabilitation qui est utilisée afin de réduire maximum la corrosion des structures métalliques. Son principe de fonctionnement est d'imposer un courant à la structure qui empêche le phénomène de corrosion d'avoir lieu. La protection cathodique peut être utilisée selon deux méthodes qui sont, la protection cathodique à courant imposé ou la protection cathodique par anodes sacrificielles. [33].

- **Protection anodique**

Le principe de cette méthode consiste à ramener le potentiel de la structure à protéger à une valeur située dans le palier de passivation, elle est réalisée par potentiel imposé. Cette méthode ne peut concerner que les métaux passivables. [33].

- **Protection par revêtement**

On distingue les revêtements métalliques et les revêtements non métalliques.

- Les revêtements métalliques réalisés par immersion ou électrodéposition peuvent être anodique (si le revêtement est moins noble que la structure de base), ou cathodique (si le revêtement est plus noble que la structure de base).

Projection thermique

- Les revêtements non métalliques sont divers, on peut citer les peintures, les plastiques, les bitumes (goudrons), ainsi que la phosphatation. [33].

Chapitre II

Matériaux et technique expérimentales

II. Matériaux et technique expérimentales

II.1 Introduction

L'objectif de notre travail est de réaliser des dépôts en alliage à base d'acier Inoxydable sur un substrat en acier A60 par projection thermique. Le procédé utilisé est celui de la projection flamme fil. Le matériau d'apport déposé est sous forme de fil en alliage d'acier inoxydable. Dans une deuxième étape, on présentera les différentes techniques de caractérisation : L'analyse microstructurale, morphologique et la caractérisation basée sur les tests d'électrochimiques et les tests de micro-duretés. Notons que les revêtements ont été réalisés au sein de l'entreprise privée « SNC ATRA » spécialisée dans la rénovation et la récupération des pièces mécaniques usinée (vilebrequins, tambours, vérins, essieux, bloc moteurs).

II.2 Matériaux utilisé

II.2.1 Le substrat

Le substrat utilisé pour réaliser les dépôts est un acier de construction mécanique d'usage général de type A60. C'est un acier doux ordinaire hypoeutectoïde qui présente une bonne ductilité. Sa composition chimique est représentée dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Analyse du substrat par la fluorescence des rayons X

	Fe	Ni	C	Mn	Cu	Si
Acier A60	Bal	< 0.03	0.1	0.231	0.119	0.044

II.2.2 Dépôts réalisés

Le matériau de projection utilisé est un alliage à base, qui se présente sous forme de fil. Cette alliage est conçue pour produire un dépôt et utilisée généralement sur les surfaces d'appui résistant et une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion et aux températures élevées.

II.3 Traitements thermiques

Le but des traitements thermiques appliqués aux aciers inoxydables est d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques ou leur résistance à la corrosion. Si la qualité première des aciers inoxydables est leur tenue à la corrosion, il convient de rappeler qu'ils peuvent par traitement

thermique approprié acquérir des caractéristiques mécaniques supérieures dont une grande dureté, ce qui permet des économies de matière et un allègement des structures.

La structure totalement martensitique confère aux aciers inoxydables une limite d'élasticité, une résistance mécanique et une dureté élevées. Leur ductilité est par contre moindre que celle des aciers inoxydables ferritiques ou austénitiques. Afin de l'améliorer, les aciers inoxydables martensitiques subissent en général un traitement de revenu plus ou moins prononcé, afin d'obtenir une structure ferrito-martensitique.

Les traitements thermiques qu'on a effectués pour nos échantillons avec des différentes températures :

- Traitement thermique à 850 C°
- Traitement thermique à 950 C°
- Traitement thermique à 1100 C°

Est on laisse les échantillons refroidir à l'air ambiant.

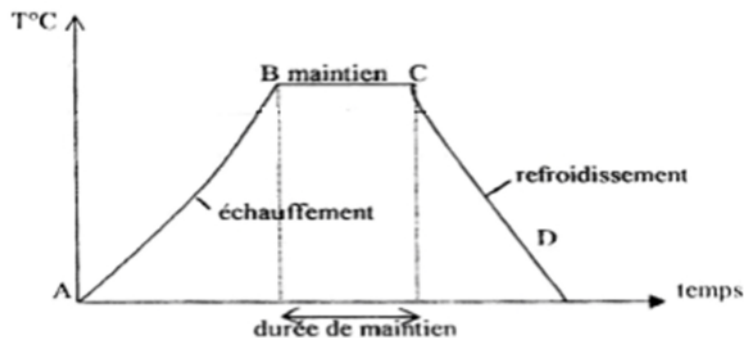


Figure II.1: mode opératoire d'un traitement thermique

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation.
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse lente (à l'air).

II.4 Caractéristique des dépôts

La composition chimique, et les différentes applications et caractéristiques de fil qu'on a utilisé pour nos dépôts est représenté dans le tableau II.2 :

Tableau II.2 : Composition chimique (en % massique) de l'acier inoxydable X30Cr13

Eléments	Fe	Cr	C	Si	Ni	Mn	P
Pourcentage massique (%)	Balance	12.62	0.30	0.63	0.11	0.41	0.011

Tableau II.3 : Propriétés thermo physiques et mécaniques de l'acier inoxydable X30Cr13

Point de transformation allotropique $\alpha \longrightarrow \gamma$	~1041 °c
Point de fusion	~1500 °c
Point de vaporisation	~3000 °c
Densité	7,7
Capacité thermique	460J.kg ⁻¹ .k ⁻¹
Conductivité thermique	30W.m ⁻¹ .k ⁻¹
Diffusivité thermique	8,5 .10 ⁻⁶ m ² .s ⁻¹
structure cristalline : - forme α : - forme γ	Cubique centrée Cubique a face centrée
Coefficient de dilatation thermique entre 293 et 373 K	10 ,8.10 ⁻⁶ K ⁻¹
Module de Young	206Gpa
Dureté	4Gpa
Limite d'élasticité	850Mpa
Coefficient de poisson	0,28

II.5 Présentation des échantillons

II.5.1 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.
- Un épaulement, dans le but de fixer les pièces, lors de la projection.
- Un chanfreinage, dans le but d'avoir un contact parfait entre le revêtement et la surface antagoniste.

- Les échantillons élaborés présentent la forme de pions et sont représentés dans la (figure II.2)

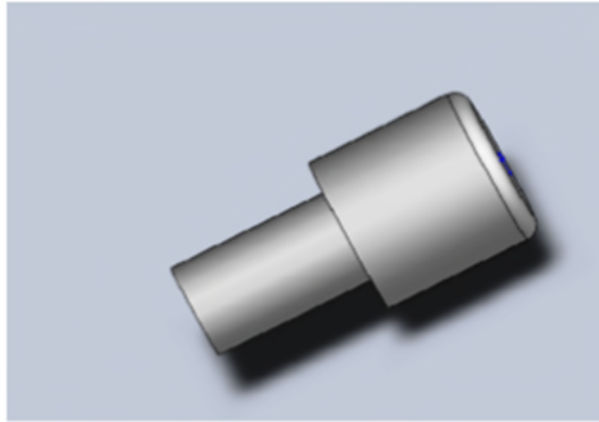


Figure II.2 : Echantillon utilisé pour la projection

II.5.2 préparation des surfaces à revêtir

Après avoir élaboré les échantillons, on a effectué les différentes opérations de préparation de surface suivante :

II.5.2.1 Dégraissage

Ce traitement est d'importance capitale, dont le but est d'éliminer de la surface, toutes traces de substances organiques, huiles, produit gras, pâtes qui sont dues aux différentes manipulations que le matériau a subi auparavant (emballage, déchargement, accrochage, etc.....). Les échantillons sont dégraissés et nettoyés avec de l'éthanol.

II.5.2.2 Sablage

Parmi les méthodes de rugosification des surfaces, on a opté pour le sablage avec du corindon. Cette méthode a pour but l'obtention d'une surface rugueuse prête à recevoir le revêtement. Le principe du sablage consiste à revêtir par un jet de particules à une pression d'air de 5 bars. Ce prétraitement offre l'avantage simultané de donner à la surface à revêtir une bonne rugosité et d'induire cette même surface de contraintes résiduelles de compression donnant ainsi au métal à projeter une bonne adhérence physique et mécanique.

II.6 Réalisation des dépôts

Afin de bien mener l'opération de projection, il est impératif de respecter certaines étapes telles que la bonne usinabilité des échantillons, qui se représentent sous une forme bien déterminée et une préparation de la surface à savoir le sablage ainsi que les paramètres de projection

II.6.1 Paramètre de projection

Les différents dépôts ont été obtenus selon les paramètres de projection utilisés par l'entreprise, ils sont résumés dans le tableau II.3 suivant :

Tableau II.4 : Paramètres de projection utilisé

Paramètres de projection Matériaux De projection	X30Cr13
Gaz	Acétylène
Pression de l'air	4.5 (bar)
Pression de l'oxygène	4.5 (bar)
Pression du gaz acétylène	0.7 (bar)
Distance de projection	130(mm)
Angle projection	90°
Diamètre des fils	4 mm
Vitesse du cordon	10(mm/s)

II.6.2 Procédé d'élaboration des revêtements par la projection flamme fil

Pour l'élaboration de nos dépôts, le pistolet de projection utilisé à partir de cordons est constitué d'un pistolet Master –Jet 2 (Figure II.3), pourvu d'un moteur électrique à basse vitesse (10mm/s) pour l'entraînement du cordon. Un système de contrôle des gaz, composé de débitmètres à flotteur pour régler le débit d'oxygène et d'acétylène et des manomètres régulant la pression des gaz de la flamme d'air et d'un support échantillon.

Lors de la projection, les échantillons sont mis en rotation et le pistolet est placé perpendiculairement à la surface des substrats à une distance contrôlée manuellement d'environ 130mm. Un jet d'air comprimé placé à environ 80 mm de l'échantillon est dirigé

vers la surface du dépôt après la projection, pour contrôler le refroidissement, avec certain paramètres de projection.

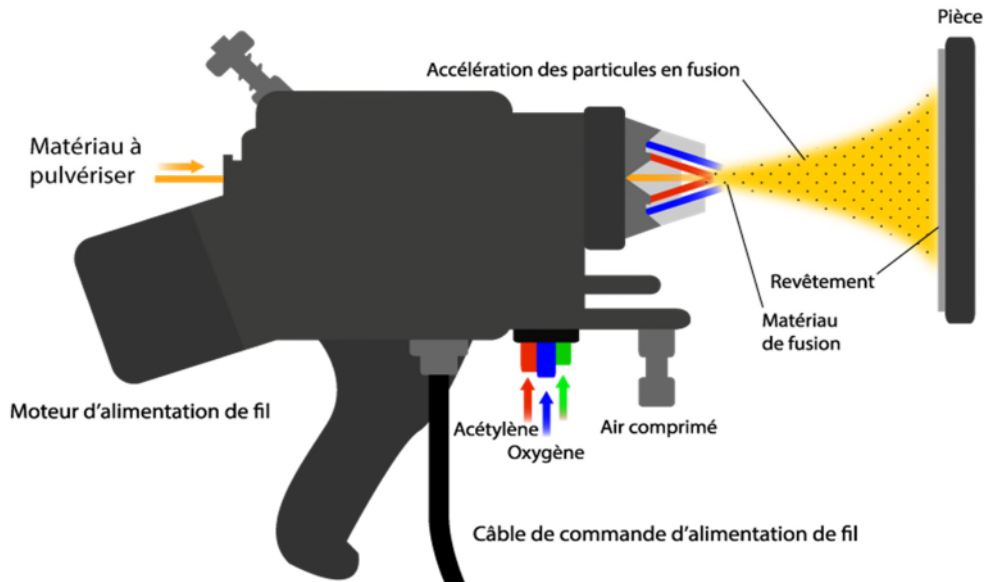


Figure II.3 : Pistolet flamme fil

II.6.3 Caractérisation microstructurale

Elle consiste à prendre les microstructures de dépôt et voir leur morphologie. Dans notre cas, la caractérisation s'est fait à l'aide d'un microscope optique.

II.6.4 Le polissage mécanique

Après les traitements thermiques, polisseuse ont été mise à notre disposition pour élaborer le polissage avec le papier abrasif de plus en plus faible de 400 jusqu'on arrive à utiliser le papier en feutre avec la pâte diamanté pour avoir une surface réfléchissante adéquate pour les essais de dureté comme montrée sur la figure ci-dessous



Figure II.4: la polisseuse

II.6.5 Attaque chimique

L'observation de la microstructure des phases de l'acier inoxydable peut nécessiter la révélation des joints de grains par une attaque chimique, en particulier si le matériau est bien homogène en composition. Le réactif utilisé est l'eau régale dont le mélange est le suivant : 2 volumes d'acide chlorhydrique (HCl – concentration 12 mol/L), 1 volume d'acide nitrique (HNO_3 – concentration 14 mol/L). Cette attaque doit être réalisée à chaud, l'échantillon est maintenu 2 minutes dans l'eau bouillante avant l'étalement de la solution à sa surface. Après 10 secondes, la solution est rincée à l'eau froide, la surface de l'échantillon ayant pris une teinte plus sombre (noircissement des joints de grains).

II.7 Observation métallographique

II.7.1. Diffraction des rayons X

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques de nature ondulatoire. Ils résultent du choc d'électrons rapides contre une cible métallique appelée anticathode mais seulement 1% de l'énergie est transformée en énergie de radiation X, le reste donne naissance à une grande quantité de chaleur. Lorsqu'un faisceau de rayons X tombe sur la matière, une partie de l'énergie est absorbée et l'autre transmise ou diffusée.

La matière va émettre un rayonnement de même longueur d'onde que le rayonnement incident mais dans des directions différentes de celle du faisceau initial. Chaque atome va être la source d'un rayonnement diffusé et l'onde observée dans une direction donnée sera la résultante de la superposition des ondes provenant de chaque atome. L'intensité des ondes

élémentaires émises par chaque atome est très faible. Pour qu'elle soit suffisante, il faut que les ondes diffusées par les atomes d'un même cristal soient en concordance de phase.

II.7.1.1. Production des rayons X

La diffraction des rayons X a été utilisée dans le but d'accéder à des informations sur les différentes phases présentes dans l'acier. La structure cristalline ainsi que l'évaluation des paramètres de mailles sont d'autant d'informations facilement accessibles par cette méthode.

Le rayonnement X monochromatique est produit par une anticathode en cuivre. Le filtre est constitué de nickel et ne laisse passer que la raie $\text{K}\alpha$ ($\lambda = 1.540598 \text{ \AA}$). Les diffractogrammes de nos échantillons sont obtenus par un diffractomètre de type XpertPro Panalytical MPD.

II.7.1.2. Loi de Bragg

On place un cristal sur le trajet d'un faisceau de rayons X parallèles et monochromatiques. Les rayons X diffusés dans toutes les directions de l'espace par les atomes du cristal doivent parcourir des chemins égaux ou qui diffèrent d'un nombre entier de longueurs d'onde (Figure II.5).

D'autre part, ces rayons ne sont en phase que pour $\delta = n\lambda$. Bragg a ainsi montré que pour que l'intensité réfléchie soit maximum, les rayons X incidents doivent rencontrer le plan réticulaire sous l'angle θ .

Les conditions nécessaires à cette interférence constructive sont données par la loi de Bragg :

- $2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$
- n : Ordre de la diffraction,
- λ : Longueur d'onde du faisceau de rayons X,
- $2d_{hkl}$: Distance réticulaire,
- θ : Angle d'incidence des rayons X.

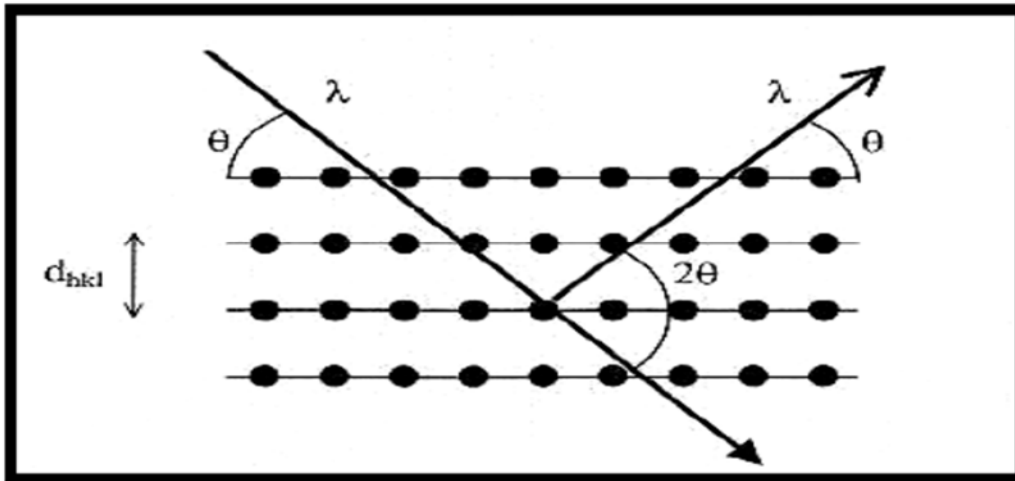


Figure II.5 : Famille de plans cristallins en condition de Bragg.

II.7.2 Métallographique

L'observation de l'acier a été réalisée à l'aide d'un microscope optique de marque «JIOMO » type METAM-P1, avec des grossissements allant de 50 à 1000. Au moyen d'une caméra, le microscope est relié à un ordinateur équipé d'un logiciel de traitement d'image (Matrox Inspector), et transmis instantanément l'image qui s'affiche sur l'écranet qu'on peut stocker dans des fichiers réservés pour chaque type d'échantillons.

Ces fichiers seront par la suite repris pour une éventuelle analyse d'image. Avant d'être vu au repris au microscope optique, l'échantillon a subit les opérations suivantes :

Un polissage en utilisant du papier abrasif de granulométrie allant 320 à 1200 Une finition qui est réalisée avec un feutre imbibé de lubrifiant et de pâte diamantée ($3\mu\text{m}$). Une attaque chimique qui s'effectue par immersion de l'échantillon fraîchement poli et sec dans une solution de Nital 4% (4% col. HNO_3 et 96% vol. Éthanol). L'attaque est arrêtée âpres quelque secondes (10-20 secondes).

L'échantillon est rincé par la suite avec l'eau. Le but de l'attaque chimique est de créer un contraste révélant la microstructure de l'acier étudié. Le but de l'attaque métallographique est de créer un contraste révélant la microstructure de l'acier étudié



Figure II.6 : Microscope optique

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.

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 travail, l'électrode de référence et l'électrode auxiliaire.

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 sature de KCl (ECS). Celle-ci schématisée par la chaîne électrochimique :

$\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}$ saturé. La demi-équation d'oxydoréduction associée au couple $\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{Hg}$ est: $\text{Hg}_2\text{Cl}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg}(\text{l}) + \text{Cl}_2^-$ L'électrode de référence utilisée est de marque Radiometer analytical son potentiel par rapport à l'électrode normale à hydrogène à 25°C est de $E = 0.244\text{v}$.

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.

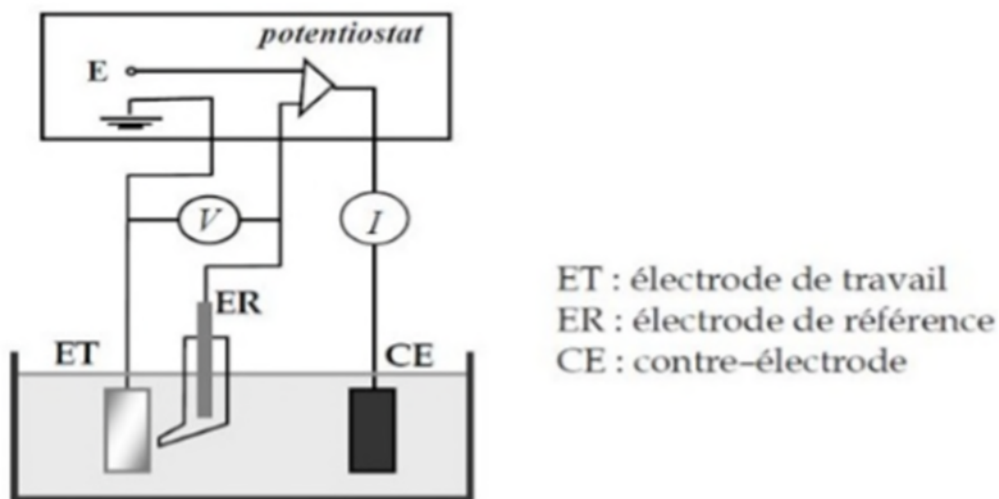


Figure II.7 : Dispositif de mesure d'une courbe de polarisation potentiodynamique

II.8.4 Milieu d'essai

Le milieu est défini par sa nature chimique, sa température et son hydrodynamique. La finalité expérimentale de notre étude a orienté le choix de l'électrolyte vers une solution aqueuse de NaCl à 3.5% qui correspond à la concentration en ions chlorures dans l'eau de mer.

II.9 Méthode d'étude électrochimique

II.9.1 Polarisation potentiodynamique

La méthode de polarisation potentiodynamique consiste à appliquer à une interface métal/solution se trouvant dans un état stationnaire une rampe de potentiel et d'enregistrer la caractéristique $\log(i) = f(E)$, cette dernière nous informe sur l'évolution du comportement électrochimique du matériau au contact du milieu corrosif.

La réaction électrochimique d'une interface métal/solution est régie par la polarisation π qui lui appliquée. La densité du courant généré à l'interface électrode/électrolyte est représentée par une courbe $i = f(\pi)$, ou $\log i = f(\pi)$. Les courbes de polarisation des réactions contrôlée par une cinétique d'activation suivant la loi de Bütler Völmer

$$i = i_{COR} \left[e^{\frac{\alpha_a \cdot n_a \cdot F \cdot \pi}{RT}} - e^{\frac{-\beta_c \cdot n_c \cdot F \cdot \pi}{RT}} \right]$$

Ou i_{COR} est la densité du courant de corrosion, α_a et α_c , les coefficients de transfert de charge anodique et cathodique, π la polarisation de l'électrode.

Le tracé en coordonnées semi logarithmiques laisse apparaitre, loin de corrosion, l'existence de deux branches linéaires, dites droites de Tafel. Les pentes de ces deux droites, ou coefficients de Tafel β_a est β_c , et la densité du courant de corrosion sont représentatives du mécanisme réactionnel et de la vitesse de dissolution du métal, à l'état stationnaire.

Les tests de polarisation potentiodynamique en milieu NaCl ont été effectués avec une vitesse de 0.5 mV/s.

II.9.2 Essai de microdurte Vickers

Il consiste à imprimer dans le métal testé un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidal à base carrée, d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136°, sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur.

L'avantage d'un pénétrateur pyramidal (comme d'un pénétrateur conique) est quand on fait varier la charge, on obtient des empreintes géométriquement semblables entre elles, donc des valeurs identiques pour la dureté. Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. En choisissant la

force donnant une empreinte telle que la diagonale d doit être inférieure aux deux tiers de l'épaisseur.

Le principe de l'essai consiste à appliquer une charge progressive sur la surface polie de l'échantillon, pendant 15 s suivie d'une décharge. La réglette et la forme de l'empreinte imprimée dans l'échantillon après essai sont représentées dans la (figure II.8).



Figure II.8 : Essai de microdureté Vickers

Dans l'essai Vickers, une pyramide à base carrée en diamant est utilisée comme pénétrateur. La dureté Vickers HV est définie par :

$$HV = \frac{\text{La charge appliquée}}{\text{La surface de l'empreinte}}$$

II.10. Procédure d'oxydation

Les échantillons ont été pesés sur une balance de type KERN ayant une précision de 0.1 mg, avant l'immersion dans la solution salée, après une nouvelle pesée permet de noter une variation de masse due au phénomène d'oxydation.



Figure II.9 : balance analytique

Cette opération répétée plusieurs fois nous a permis d'enregistrer la variation relative de masse au cours du temps.

Chapitre III

Résultats

Et

interprétations

III. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons en premier lieu la caractérisation microstructurale des dépôts non traités et traités à différentes températures (850°C, 950°C et 1100°C) moyennant le microscope optique. Ces revêtements déposés sont élaborés par le procédé de projection thermique à flamme-fil, en suite, nous décrivons les résultats obtenus de l'observation métallographique sur les dépôts.

III.1 Diffraction des rayons X (DRX)

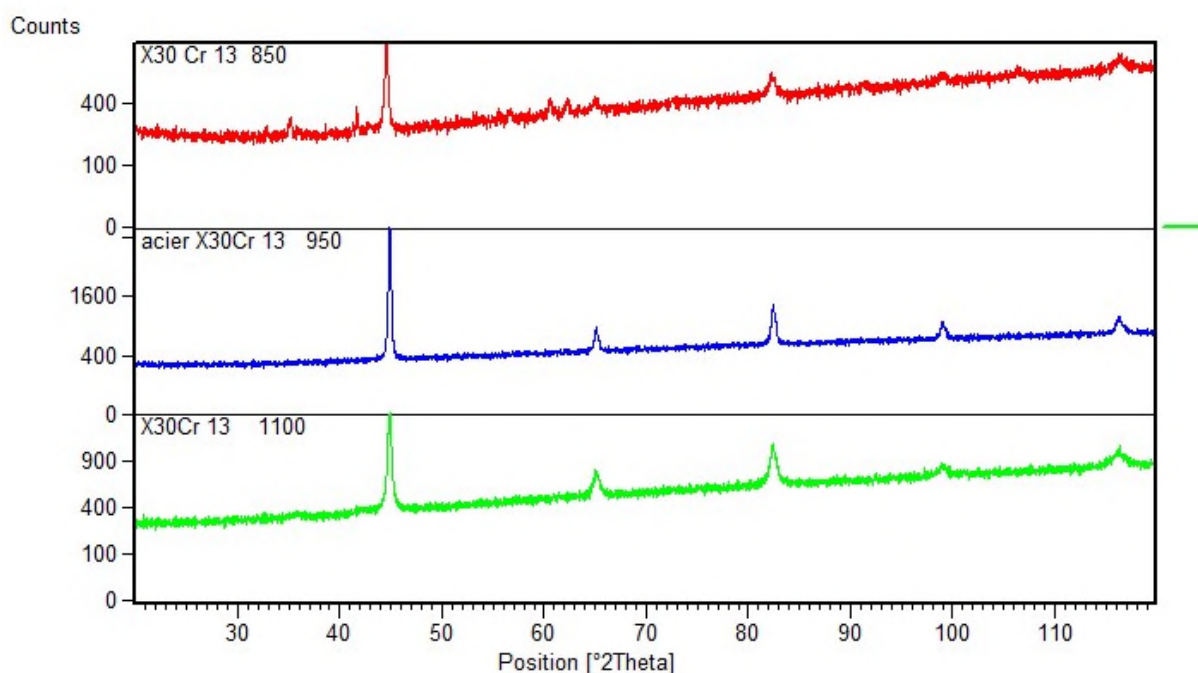


Figure III.1 Spectre des rayons X des différents dépôts en X30Cr13.

D'après le spectre DRX du dépôt réalisé par projection thermique, on distingue la présence de plusieurs phases: une Solution Solide de structure Cubique Centrée (CC) avec un paramètre de maille de $2,8673 \text{ \AA}$ comme phase majoritaire et on remarque aussi la présence de deux types de carbures de chrome CCr et C_7Cr_3 qui se sont formés par la réaction entre le carbone et le chrome. Celle-ci est possible lorsque la température dépasse 1400°C [34, 35]. La température de la particule en fusion est très supérieure à 1200°C pendant le processus de pulvérisation à arc. Cependant, de grandes quantités de Fer réagissent avec l'oxygène pendant le processus de revêtement et forment des oxydes.

III.2 Métallographie des échantillons utilisés

Résultats et interprétations

Les différentes morphologies sur les surfaces transversales observées par un microscope optique au niveau des dépôts.

III.2.1 Microstructure des dépôts issus de l'acier inoxydable X30Cr13 :

L'observation au microscope optique des différents échantillons au niveau des dépôts avant le test d'immersion sont illustrées sur la figure III.2 :

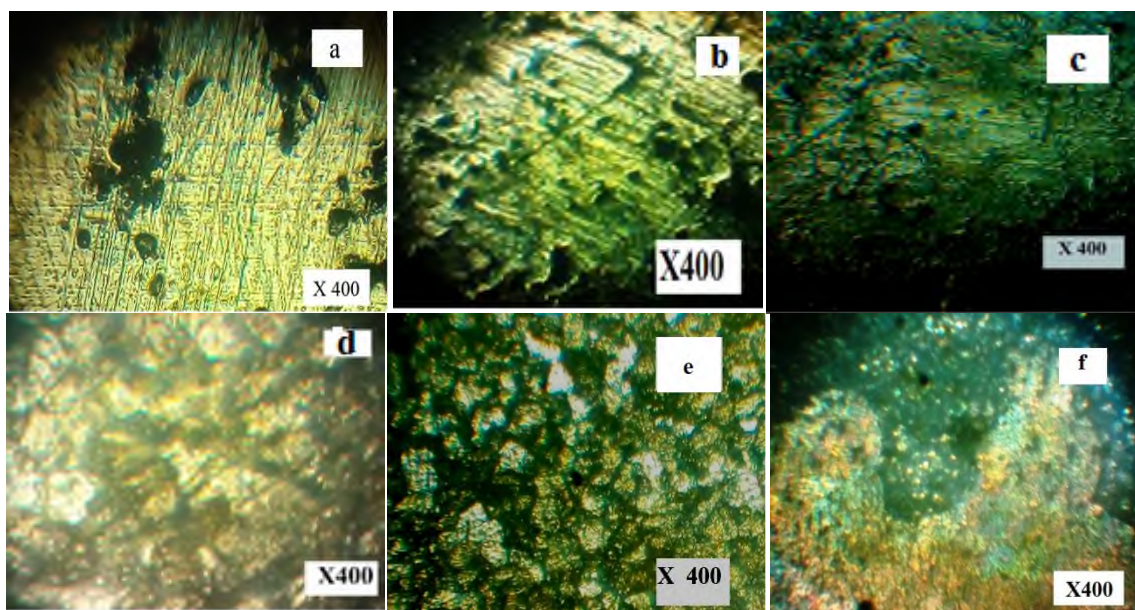


Figure III.2 : Microstructure des différents échantillons obtenus avant test électrochimique
a : E36 **b :** dépôt sans traitement ; **c :** dépôts traité à 850°C ; **d :** dépôts traité à 950°C ;
e : dépôts traité à 1100°C ; **f :** L'interface.

Les observations métallographiques effectuées au niveau des dépôts issus de l'acier inoxydable X30Cr13 non traité et traités à différents post-traitements, nous montre que la morphologie des échantillons (**a**, **b** et **c**) présente seulement des phases noires et des ségrégations qu'on peut dire que leurs origines est due à l'air piégé entre les différentes couches déposées.

On observe sur la morphologie (**d** et **e**) l'apparition martensitique au chrome aux joints de grains de l'acier inoxydable ferritique et sous forme de larges bandes, et sur la morphologie (**f**) montre la différence entre le substrat et le dépôt.

Tous les types de traitements sur les aciers inoxydables assurant une bonne résistance à la corrosion, ont pour but de rendre la répartition en chrome du métal, la plus homogène possible

Résultats et interprétations

en évitant toute précipitation de phases riches en chrome et donc toute diminution de la teneur en chrome dans les zones avoisinantes.

Le carbone (C) Il stabilise la structure austénitique introduit pour accroître les propriétés mécaniques de l'acier (dureté, charge à la rupture, fluage...), particulièrement sous l'effet des traitements thermiques, le carbone joue cependant un rôle néfaste vis-à-vis de la résistance à la corrosion (précipitation de carbures de chrome lorsque la teneur en carbone dépasse 0,030 % conduisant à la corrosion intergranulaire) [36]. Ceci a encouragé le développement de nuances d'aciers inoxydables à très faible teneur en carbone (inférieur à 0,03%) [36]. Alors que le chrome (Cr) qui est considéré comme élément de base de tous les aciers inoxydables qui offre la résistance à la corrosion par la formation d'un film passif en se combinant avec l'oxygène et augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud.

Dans ce qui suit les échantillons ont subi un test d'immersion dans une solution d'eau de mer synthétique d'une concentration en NaCl à 3.5% pendant 5jours, 10 jours et 20 jours, à la fin des immersions, en réalise des caractérisations par microscope optique.

III.2.2 Métallographie des dépôts après 5 jours :

Dans ce qui suit, on présentera la perte de masse relative sous forme d'un histogramme pour les différents échantillons non traité et traité à différents post traitement sont illustrées sur la Figure III.3 :

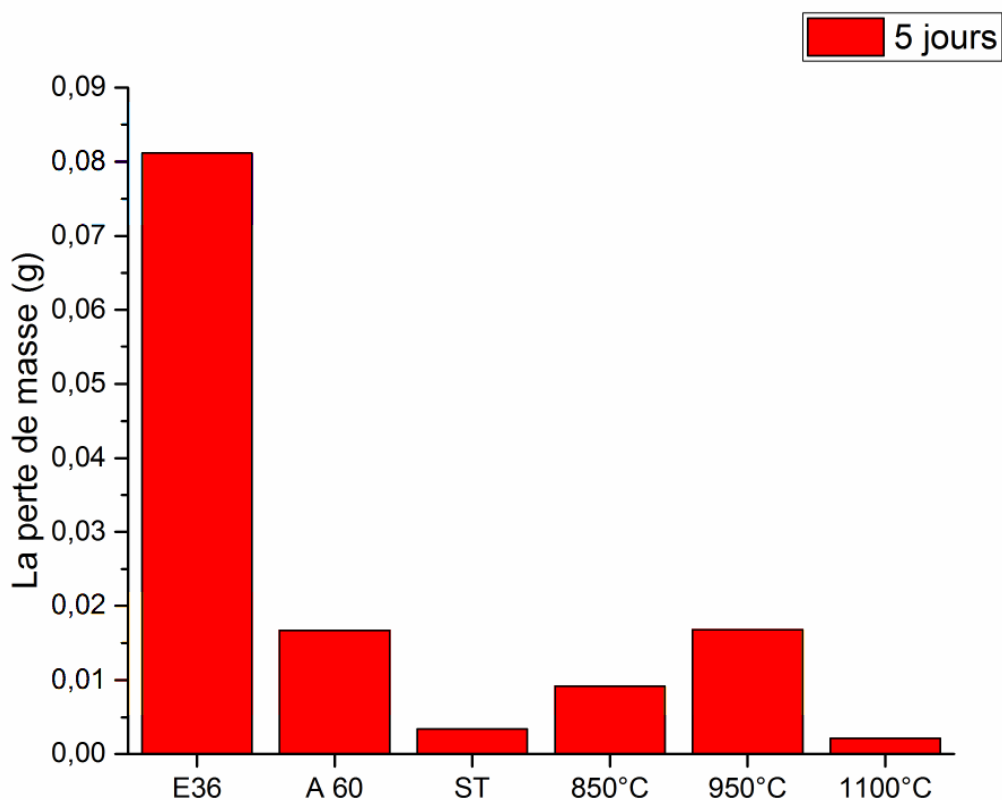


Figure III.3 : La perte de masse des échantillons à 5 jours

Après l'immersion de 5 jours on remarque que l'échantillon non traité E36 à une valeur la plus élevée qui atteint 0.08g, alors que les échantillon non traité A60, ST et traité à (850°C, 950°C et 1100) possède un comportement plus stable et une perte de masse en fonctions du temps qui dépasse pas 0.02g.

Nous avons fait des micrographies sur le microscope optique pour effectuer une meilleur analyse des facieces.

Résultats et interprétations

L'observation au microscope optique des différents échantillons après 5 jours de test d'immersion dans une solution d'eau de mer, nous montre les microstructures suivant :

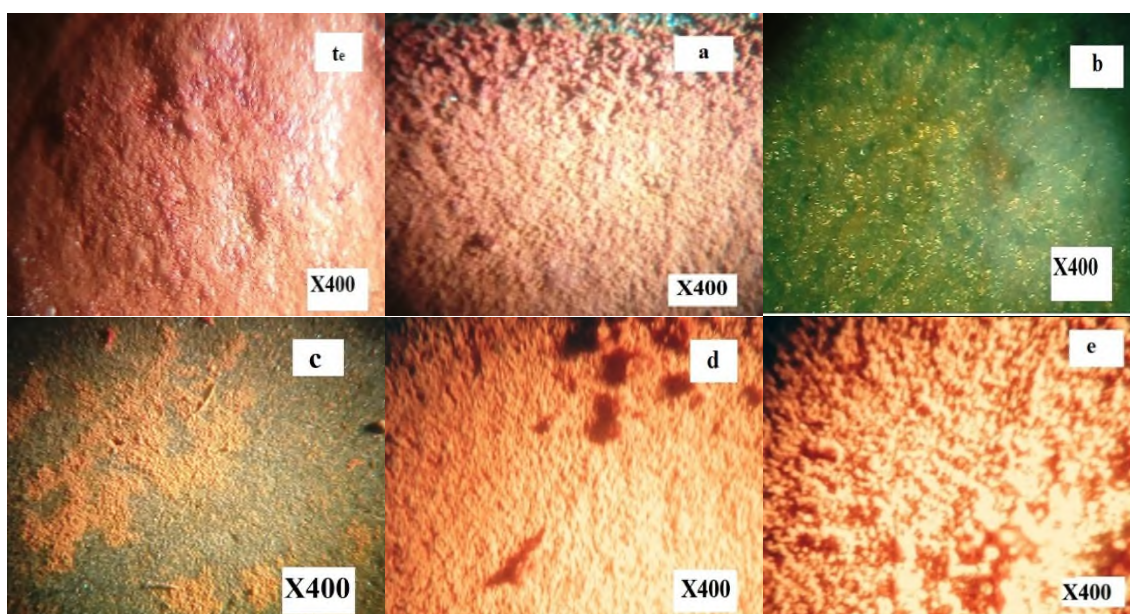


Figure III.4: Microstructure des différents échantillons obtenus après 5 jours

te: A60 ; **a :** E36 **b :** dépôt sans traitement ; **c :** dépôts traité à 850°C ;

d : dépôts traité à 950°C ; **e :** dépôts traité à 1100.

L'observation en microscope optique montre que la morphologie de l'échantillon traité à 1100°C (**e**) est formé d'une couche d'oxydation dense par rapport à l'échantillon type E36 (**a**), et pour l'échantillon traité à 950°C (**d**) a une basse densité d'oxydation, alors que l'échantillon (**te**) est oxydé et formé essentiellement par, tandis que (**a**) est oxydé sous forme de fer, on remarque que l'échantillon traité à 850°C (**c**) est compose d'une couche d'oxyde chrome non homogène, alors que la morphologie de l'échantillon non traité (**b**) présente des zone sombre et des point claire.

La couche d'oxyde qui est formé au niveau des surfaces des échantillons traité, est appelé le film passif et riche en chrome, celle-ci consiste à avoir un rôle protecteur grâce a la formation d'une couche d'oxyde chrome.

III.2.3 Métallographie des dépôts après 10 jours :

Résultats et interprétations

Présentation de la perte de masse relative sur l'histogramme pour les différents échantillons non traité et traité à différents post traitement sont illustrées sur la Figure III.5 :

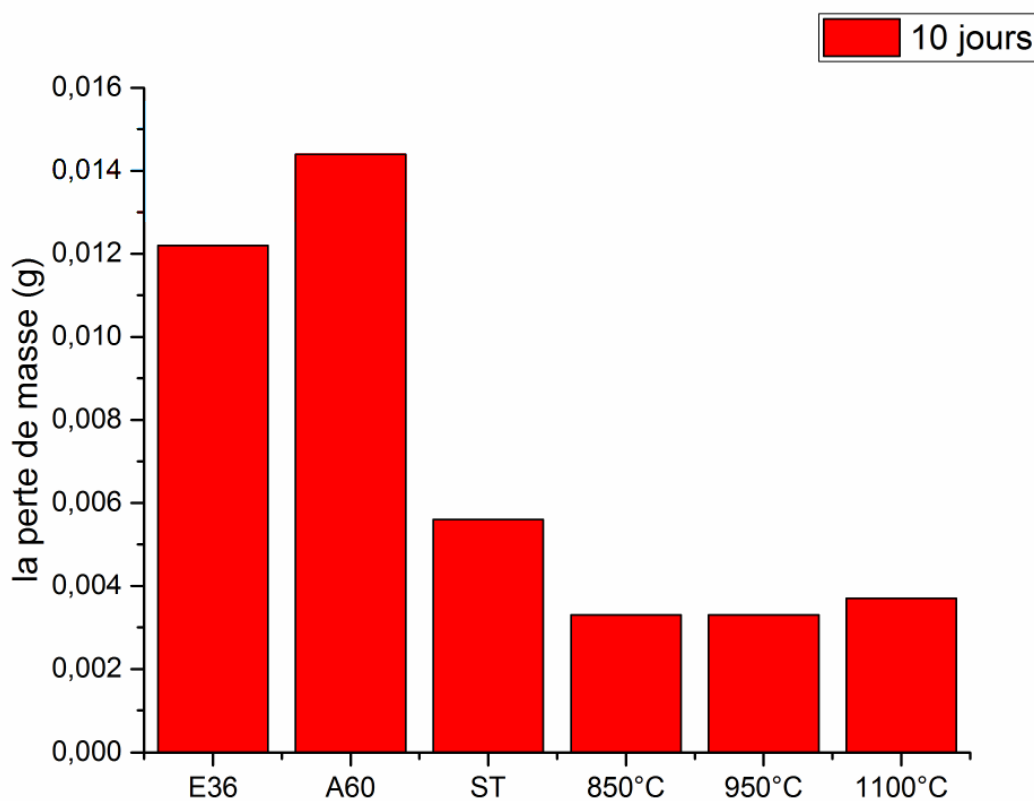


Figure III.5 : La perte de masse des échantillons à 10 jours

Après 10 jours de l'immersion dans la solution salée on remarque la diminution de la perte de masse de l'échantillon E36 de 0,08g jusqu'à 0,012g, et pour échantillon A60, augmente à la valeur plus élevée atteint 0,0144g, et une légère augmentation des échantillons (ST , 850°C, 950°C et 1100°C), par rapport à la perte de masse des échantillons à 5 jours.

L'observation au microscope optique des différents échantillons après 10 jours du test électrochimique, nous montre les microstructures suivant :

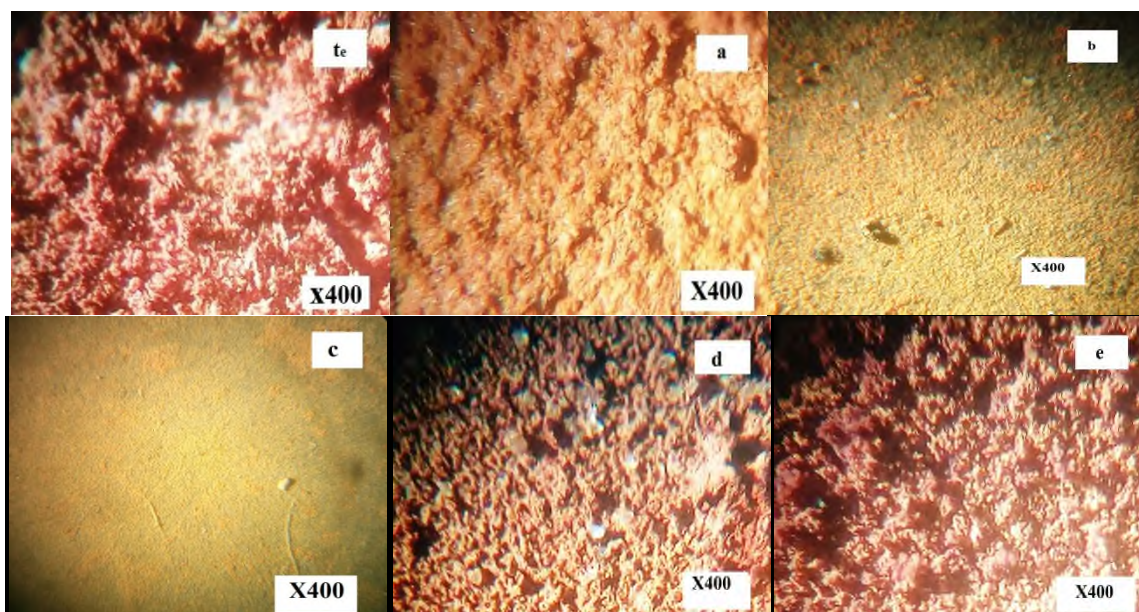


Figure III.6: Microstructure des différents échantillons obtenus après 10 jours

te: A60 ; **a :** E36 ; **b :** dépôt sans traitement ; **c :** dépôts traité à 850°C ;

d : dépôts traité à 950°C ; **e :** dépôts traité à 1100.

D'après cette figure on remarque la morphologie des échantillons A60 et E36 (**te** et **a**) que la densité de la couche d'oxydation est augmenté par rapport au test précédent à 5jour, alors que le film d'oxyde des échantillons traité (**d** et **e**) est plus dense par rapport au test précédent, on observe que l'échantillon sans traitement (**b**) est recouvert d'un film d'oxyde non homogène, alors que la couche d'oxydation de l'échantillon traité à 850°C (**c**) augmente lentement par rapport à 5 jours.

III.2.4 Métallographie des dépôts après 20 jours :

On présentera la perte de masse relative à 20 jours sous forme d'un histogramme pour les différents échantillons non traité et traité a différents post traitement sont illustrées sur la Figure III.7 :

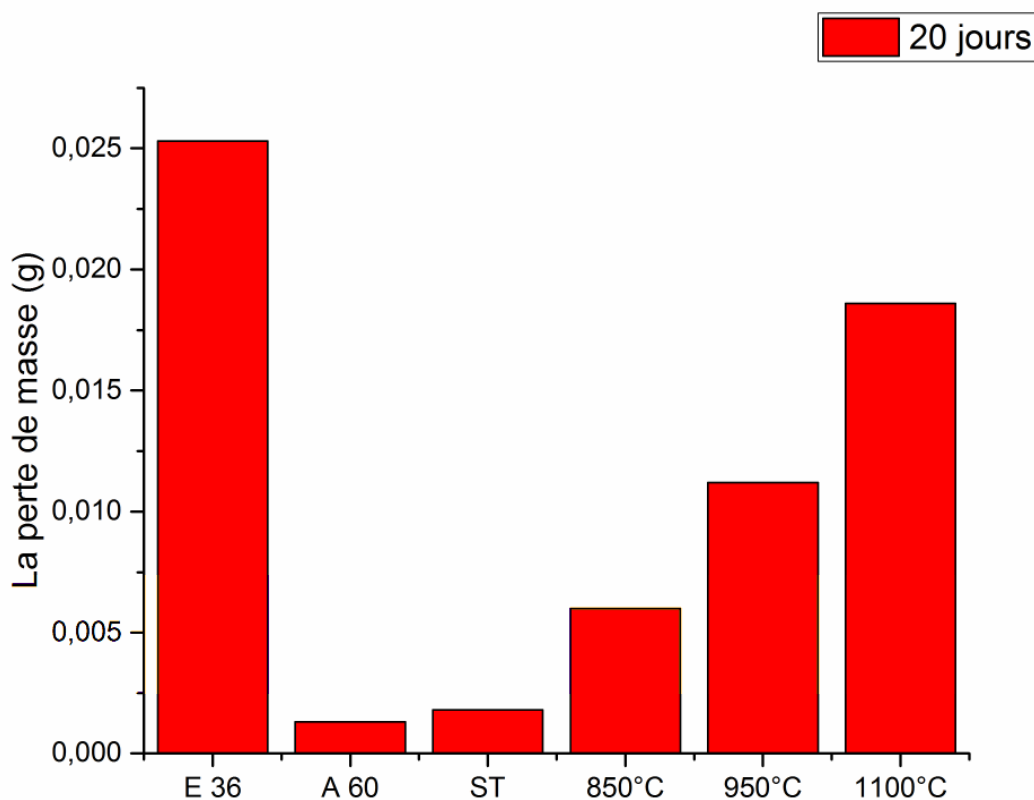


Figure III.7 : La perte de masse des échantillons à 20 jours

On observe sur l'histogramme une grande augmentation de la perte de masse de l'échantillon E36 par rapport au test précédent (à 10 jours) de 0.003g jusqu'à 0.025g, et on remarque que les échantillons A60, ST et l'échantillon traité à 850°C est stabilise en fonction du temps, alors que les échantillons traité à (950°C et 1100°C) augmente légèrement.

Dans la figure suivante, on présentera l'évaluation de la perte de masse relative sous forme de courbes pour les différents échantillons non traité et traité à différents post traitement.

Résultats et interprétations

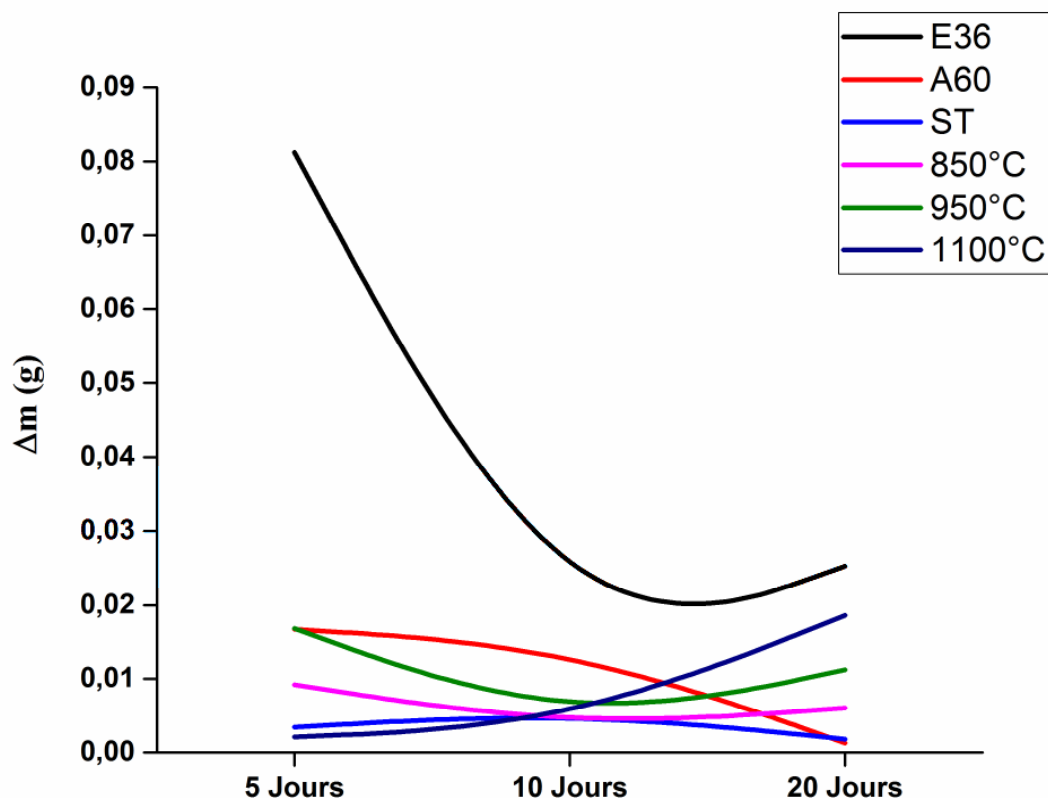


Figure III.8: variation de la perte de masse relative en fonction du temps

L'évaluation de la perte de masse relative en fonction du temps dans la solution d'eau de mer dépend essentiellement de l'échantillon avec ou sans dépôt et non traité ou traité à différent post traitement, on distingue que chaque échantillon à la variation suivante :

- **E36** : la perte de masse relative à 5 jours atteint une valeur plus élevée de 0.08g, et une diminution à 10 jours jusqu'à 0.02g et augmente légèrement à 20 jours jusqu'à 0.03g.
- **A60** : une diminution de la perte de masse relative à partir de 5 jours jusqu'à 20 jours et contrairement à l'échantillon traité à 1100°C, alors que
- **Traité à 950°C et (ST: sans traitement)** : la perte de masse relative est presque stable à partir de 10 jours jusqu'à 20 jours qui dépasse la valeur de 0.18g.
- **Traité à 850°C** : la perte de masse relative est stable de 0.009g à 5 jours jusqu'à 0.006g à 20 jours.

Résultats et interprétations

L'observation au microscope optique des différents échantillons après 20 jours du test électrochimique, nous montre les microstructures sur la figure III.9 :

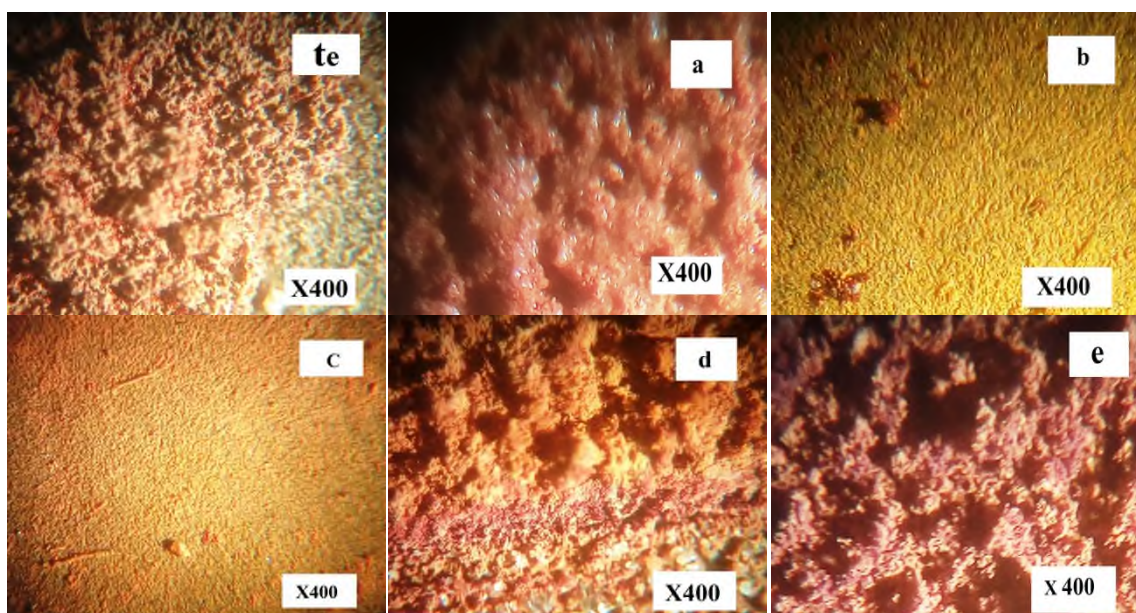


Figure III.9: Microstructure des différents échantillons obtenus après 20 jours

te: A60 ; **a :** E36 ; **b :** dépôt sans traitement ; **c :** dépôts traité à 850°C ;

d : dépôts traité à 950°C ; **e :** dépôts traité à 1100.

Cette figure montre que la couche d'oxyde protectrice des échantillons traité à (950°C (**d**) et 1100°C (**e**)) semblent être très denses ayant une croissance rapide en fonction du temps, tandis que la densité de la couche d'oxydation des échantillons non traité (**te** et **a**) décroît par rapport à 10 jours, et l'échantillon sans traitement (**b**) présente une densité de la couche d'oxyde faible par rapport aux autres échantillon, alors que l'échantillon traité à 850°C (**c**) présente une couche d'oxyde protectrice adhérente et devenue dense et à croissance lente en fonction du temps donc est une protection efficace à la corrosion.

III.3 Courbe de polarisation

Les mesures électrochimiques nécessaires pour tracer les courbes de polarisation sont généralement obtenues avec un potentiostat, on va imposer le potentiel polarisation

En exprimant le logarithme de la densité du courant en fonction du potentiel, on obtient les courbes de Tafel qui permettent de déterminer le potentiel de corrosion et le courant de corrosion.

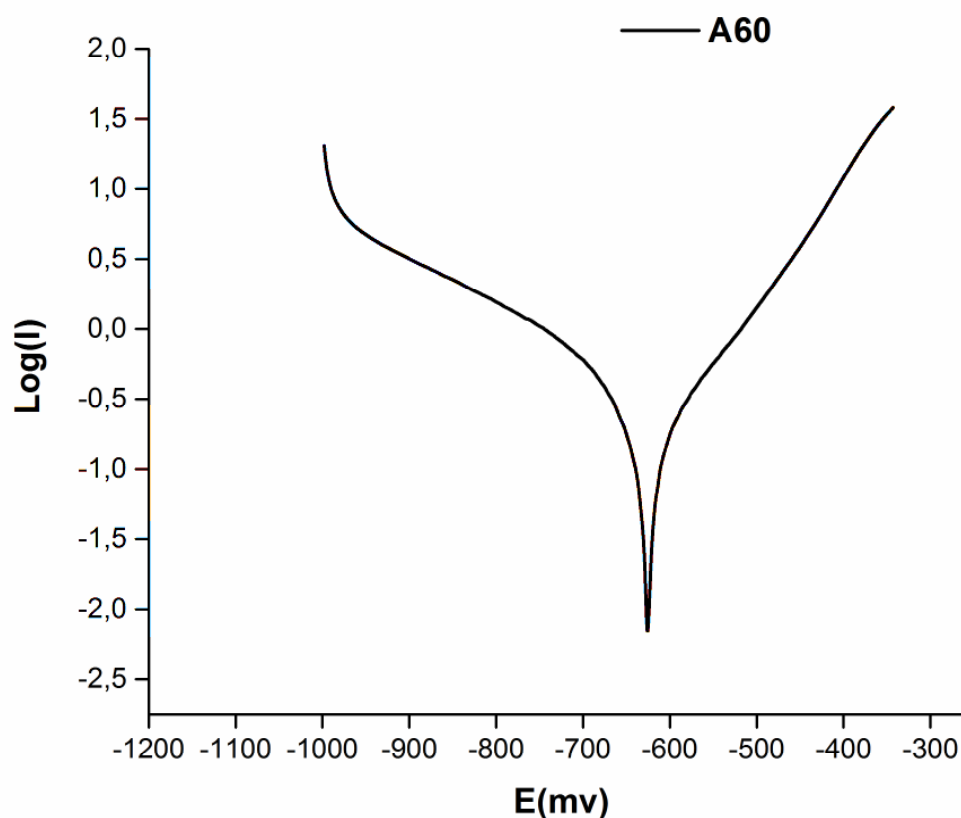


Figure III.10 Polarisation potentiodynamique de l'acier simple A60

Cette figure montre la courbe de polarisation logarithmiques indiquant les domaines de Tafel anodique et cathodique, pour le tracé de la courbe de polarisation, on remarque le potentiel de corrosion est à -625 mv et la densité de courant diminue dans le domaine anodique et augmente au domaine cathodique.

La courbe de polarisation logarithmique du dépôt non traité est présentée sur la figure suivante :

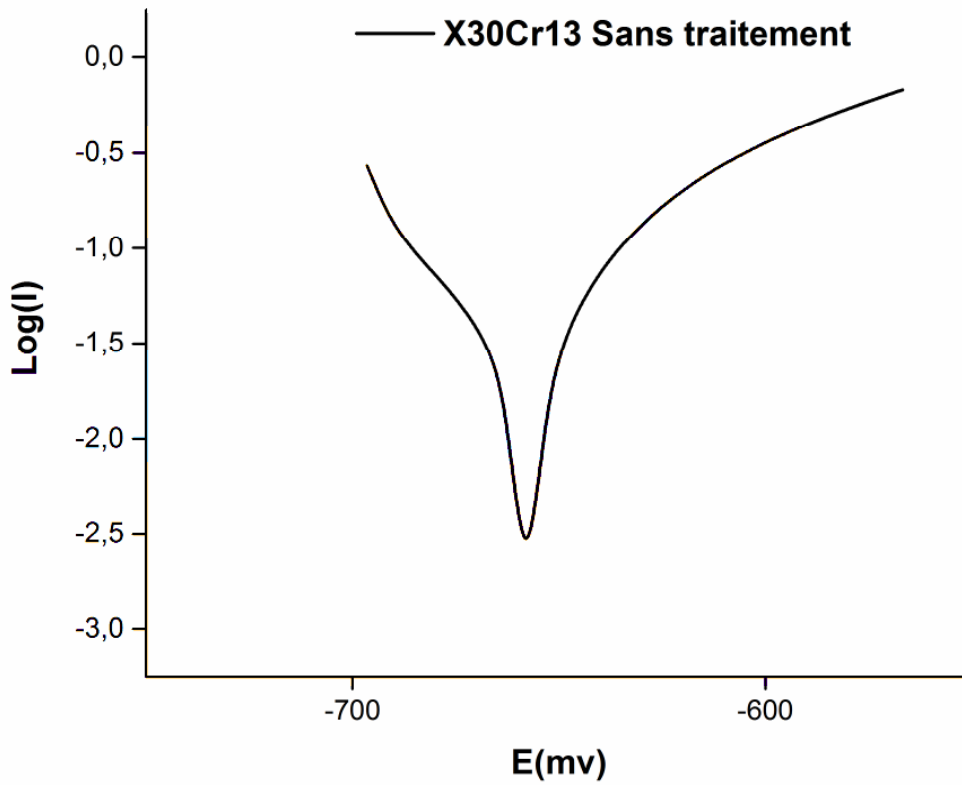


Figure III.11 Polarisation potentiodynamique sans traitement

La figure III.11 montre la courbe de polarisation logarithmiques indiquant les domaines de Tafel anodique et cathodique, pour le tracé de la courbe de polarisation, on remarque le potentiel de corrosion est à -658 mv et la densité de courant diminue dans le domaine anodique est augmenté au domaine cathodique.

Résultats et interprétations

La Figure III.12 représente la polarisation potentiodynamique de l'échantillon traité à 850°C.

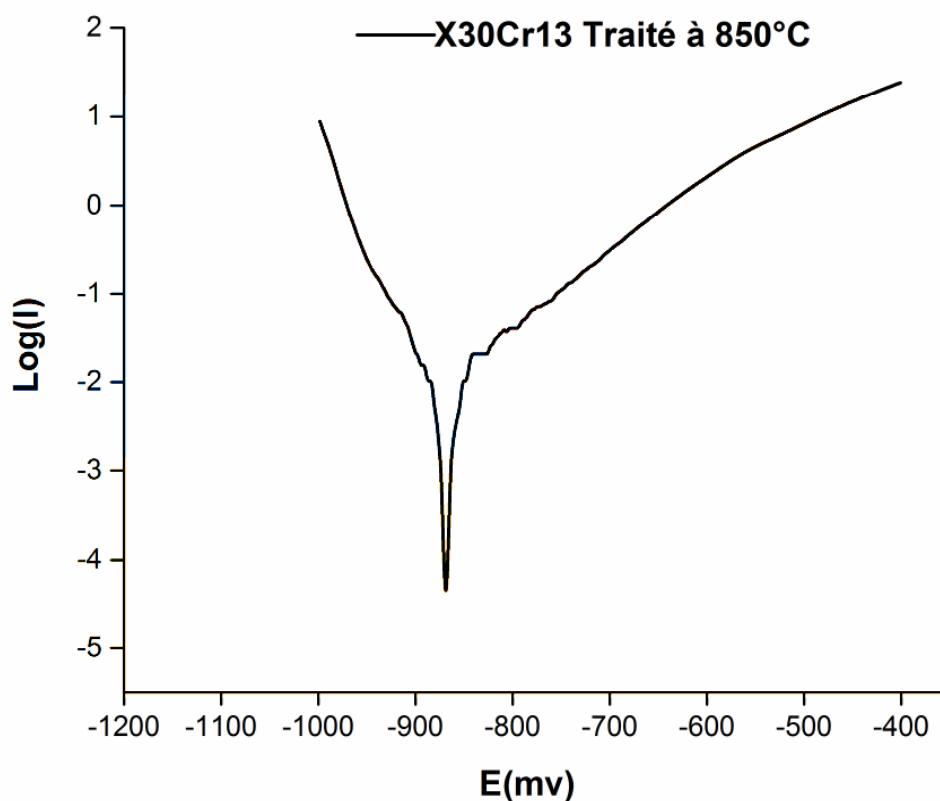


Figure III.12 Polarisation potentiodynamique traité à 850°C

Cette figure montre le tracé de la courbe de polarisation de Tafel anodique et cathodique de l'échantillon traité à 850°C, on remarque une diminution du potentiel de corrosion jusqu'à -868 mv, pour la densité de courant décroît strictement dans le domaine anodique et augmente dans le domaine cathodique.

Présentation de la courbe de polarisation potentiodynamique obtenues pour l'échantillon traité à 950°C.

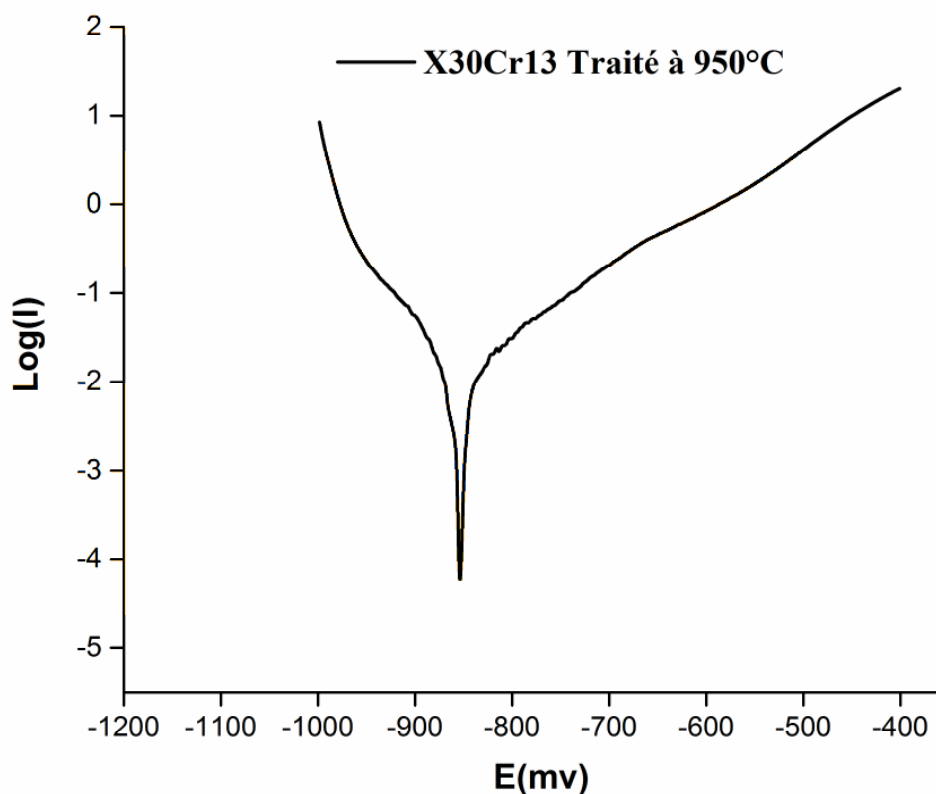


Figure III.13 Polarisation potentiodynamique traité à 950°C

Le tracé de la courbe de polarisation de Tafel anodique et cathodique de l'échantillon traité à 950°C nous montre une légère augmentation du potentiel de corrosion à -854 mV par rapport à l'échantillon précédent traité à 850°C, la densité de courant présente toujours une diminution dans le domaine anodique et augmente dans le domaine cathodique.

Dans ce qui suit on va présenter la courbe de polarisation obtenue pour l'échantillon traité à 1100°C.

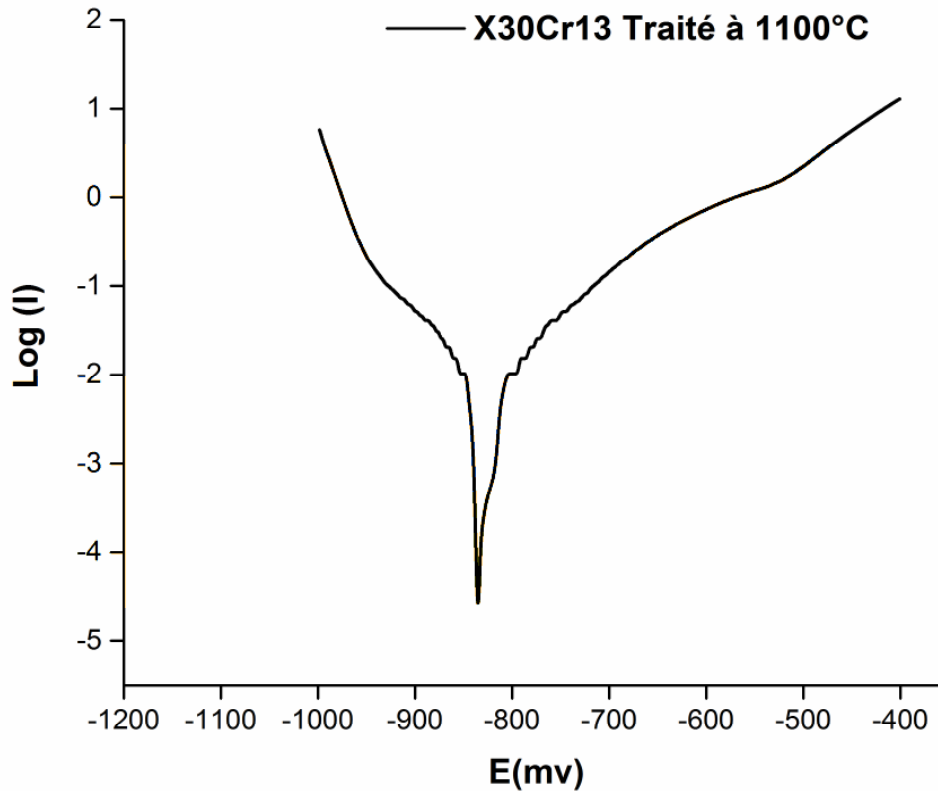


Figure III.14 Polarisation potentiodynamique traité à 1100°C

La figure III.14 montre la courbe de polarisation logarithmiques indiquant les domaines de Tafel anodique et cathodique, pour le tracé de la courbe de polarisation, on remarque le potentiel de corrosion augmente jusqu'à -834 mV par rapport à l'échantillon précédent traité à 950°C et la densité de courant diminue dans le domaine anodique et augmente au domaine cathodique.

Résultats et interprétations

L'examen de ces courbes de polarisation $\log I=f(E)$ de la figure III.15 ci-dessous montre l'évolution du courant en fonction du potentiel.

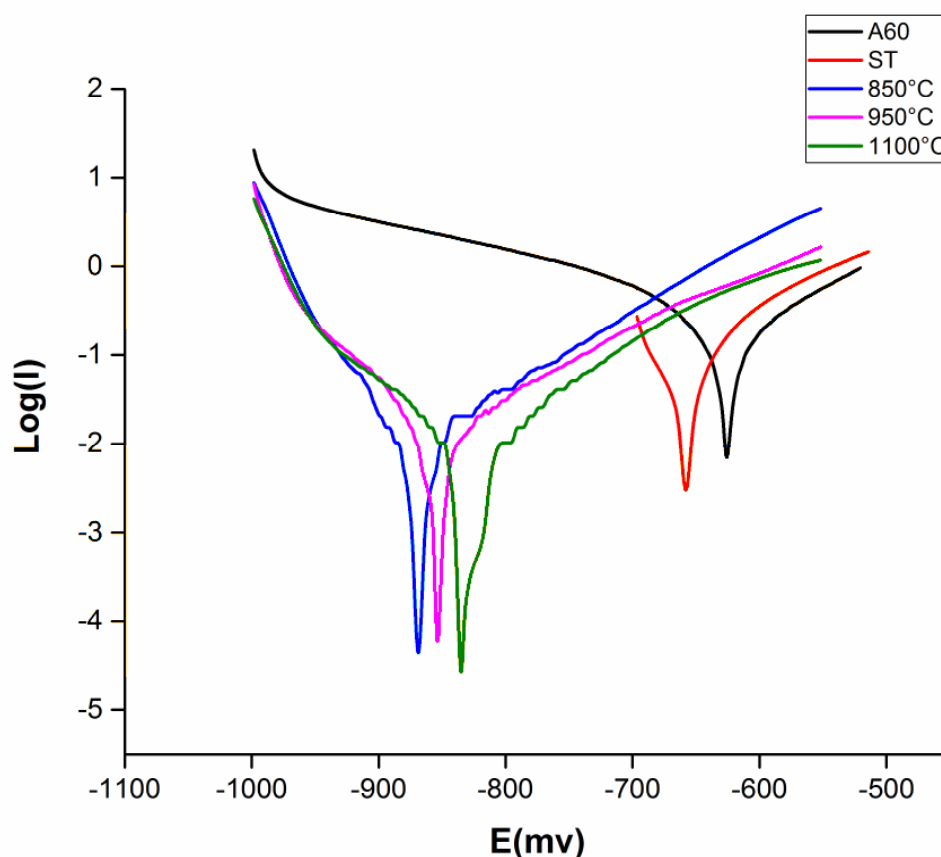


Figure III.15 Courbe de Tafel : regroupent les courbes potentiodynamiques des échantillons étudiés, ST : sans traitement

Le potentiel de corrosion (E_{corr}) des dépôts traité est déplacé vers des valeurs moins négatives, et on observe également, les valeurs de la densité de courant (I_{corr}) des échantillons traité à différents post traitement diminuent par rapport à l'échantillon non traité et l'acier simple A60, la superposition des courbes de polarisation montre un comportement intermédiaire des dépôts traité par rapport au dépôt sans traitement et l'acier simple A60, et on conclue que la polarisation est cathodique.

En comparant les différents post de traitement des dépôts étudiés on trouve que l'échantillon traité à 850°C présente une meilleure tenue à la corrosion.

On peut expliquer ces résultats par les propriétés des films passifs des aciers inoxydables, les films passifs assurent la résistance à la corrosion par l'établissement d'une couche d'oxyde ou

Résultats et interprétations

hydroxyde riche en chrome, qui constitue une barrière de diffusion qui réduit ainsi fortement la conductivité ionique. Le film passif, très adhérent au substrat métallique, empêche ou limite le contact entre l'alliage et les agents agressifs présents dans l'environnement et donc les phénomènes de corrosion.

La protection de l'acier est assurée par la formation après oxydation d'une couche d'oxyde protectrice, adhérente, stable, dense et à croissance lente. Une protection efficace est généralement associée à un oxyde type CrO ou Cr_2O_3 qui croît lentement grâce à un mécanisme contrôlé par la diffusion.

Le potentiel de corrosion dans le tableau III.1, est calculé à l'aide de la courbe précédente de Tafel (figure II.15) : Les droites de Tafel décrivent les limites anodiques et cathodiques de l'équation de Butler-Volmer. Leur intersection correspond à la valeur du potentiel de corrosion.

Tableaux III.1 Le potentiel de corrosion des échantillons

Echantillons	850°C	950°C	1100°C	ST	A 60
E_{corr} (mv)	-868.3652	-854.4345	-834.2795	-657.7747	-625.0228

La figure 16 représente les mesures du potentiel de corrosion en valeur absolue des différents échantillons non traité et traité à différents post traitement.

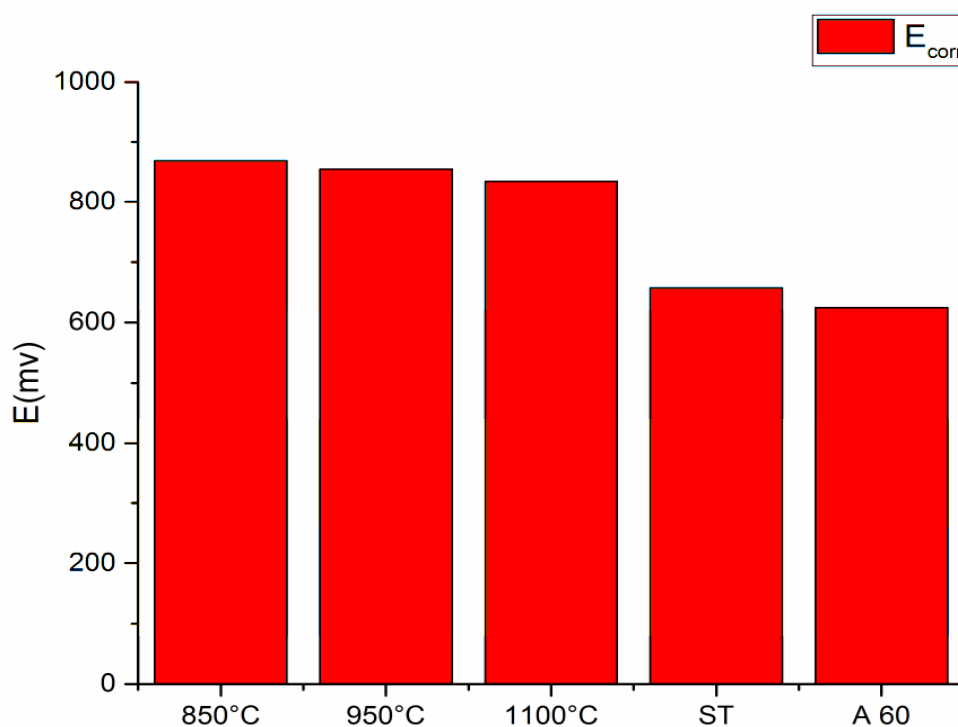


Figure III.16 : Variation de potentiel de corrosion thermodynamique

On remarque une diminution du potentiel de corrosion qui passe de 868 mV jusqu'à 834 mV telle que la température de traitement thermique du dépôt traité augmente de 850°C jusqu'à 1100°C, la valeur la plus élevée est celle de l'échantillon traité à 850°C qui atteint 868 mV, tandis que le potentiel de corrosion le plus bas est celui de substrat A60 par rapport au dépôt (ST : non traité) ou traité.

Le film d'oxyde des aciers inoxydables traités thermiquement se recouvre d'un film d'oxyde protecteur, très mince à la surface de l'alliage métallique leur conférant une bonne résistance à la corrosion. Cette couche passive peut mesurer jusqu'à 3 nanomètres d'épaisseur [37], elle se forme et se renouvelle seul en présence d'oxygène ou d'eau. Elle se compose d'un mélange d'oxyde de fer, oxyde de chrome.

D'après ces constatations on peut conclure que le post de traitement de dépôt varie inversement avec le potentiel de corrosion.

III.4 Dureté des échantillons

Les essais de dureté Vickers sous une charge de 200g ont été effectués sur les dépôts projetés par le procédé flamme-fil traité à différentes températures et sur le substrat. Les mesures de

Résultats et interprétations

duretés ont été effectuées sur des surfaces polies. Les valeurs obtenues représentent la moyenne de trois (03) essais et sont illustrées sur la Figure III.17 :

Tableau III.2 : Dureté des échantillons

Vickers	Test 1	Test 2	Test 3	Dureté HV
ST	201	194	199	198
850°C	210	208	213	210.33
950°C	233	225	233	230.33
1100°C	235	233	238	235.33

On va présenter les valeurs obtenues sur la dureté sous forme d'un histogramme illustré sur la figure III.17.

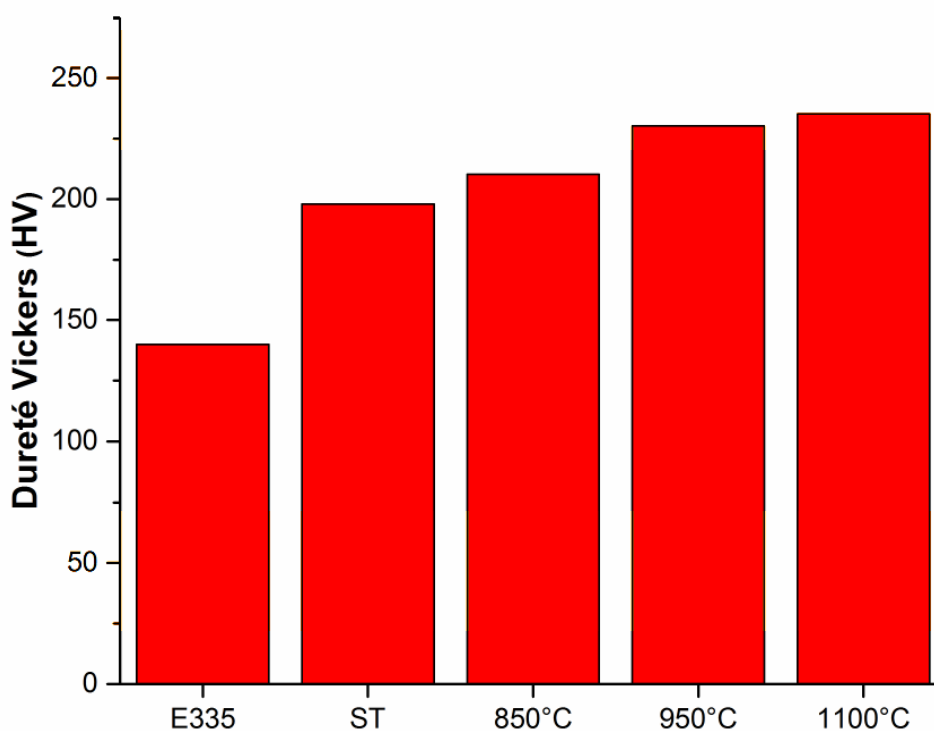


Figure III.17 : Dureté Vickers des différents échantillons

On remarque d'après l'historgramme ci-dessus que la dureté du substrat E335 est nettement inférieure par rapport aux dépôts non traité ou traité, tandis que la dureté augmente de 210 HV jusqu'à 235 HV lorsque la température de traitement thermique du dépôt augmente de 850°C jusqu'à 1100°C, l'échantillon traité à 1100°C donne une meilleure dureté.

Conclusion Générale

Conclusion générale

A travers les différents tests électrochimiques réalisés ainsi que l'observation au microscope optique on a constaté que la projection thermique demeure une technique de pointe dans la réalisation de couches protectrice. La présence d'un revêtement en surface d'une pièce permet bien souvent d'améliorer quelques propriétés comme la protection contre la corrosion.

Dans ce travail, nous avons montré l'influence des traitements thermiques à 850°C, 950°C et 1100°C sur le comportement mécanique et électrochimique d'un dépôt réalisé par projection thermique, un dépôt de X30Cr13 déposé sur un substrat d'un acier de construction mécanique d'usage général de type A60.

A la lumière de ces résultats, il ressort que :

- La caractérisation par microscope optique, a mis en évidence le rôle de la nouvelle morphologie obtenue après projection thermique à flamme-fil dans l'amélioration des propriétés électrochimiques particulièrement la résistance à la corrosion par la formation après oxydation d'une couche d'oxyde qui se compose d'un mélange d'oxyde de fer et l'oxyde de chrome.
- L'étude métallographique nous a permis de visualiser la structure du dépôt. Nous avons remarqué que le dépôt réalisé est homogène, contient de pores et de particules non fondu.
- L'application du post traitement thermique permet également d'améliorer la résistance à la corrosion.
- Les essais électrochimiques réalisés au cours de cette étude ont confirmé l'importance des revêtements à base d'acier inoxydable traité thermiquement sur la résistance à la corrosion. Le dépôt présente un comportement protecteur dans le milieu d'eau de mer, ce qui prouve que le revêtement est de type cathodique.
- Le dépôt réalisé traité à 850°C pendant une heure et 30min présente une meilleure tenue à la résistance à la corrosion par rapport au dépôt non traite et à l'acier de construction naval.
- Les dépôts traités à différent post-traitement présentent une dureté plus grande que celle du substrat.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] D.E. Sokolov, Contribution au développement de la projection thermique a très faible pression, Thèse, Université de Franche-Comté, Belfort, France, 2009.
- [2] A.Proner, Revêtements par projection Thermique, (éd) Techniques de l'ingénieur, M 1645, 1999.
- [3] I. Langmuir « The vapor pressure of metallic tungsten », Physical review, vol. 2, No 5, 1913, pp32 9-342.
- [4] Wear Management, projection thermique, Switzerland, 7 Septembre 2015.
- [5] R. younes, Etude du comportement mécanique et microstructural des revêtements en céramiques Obtenus par projection thermique, Thèse de doctorat, Université de Bejaia, Algérie 2016.
- [6] L. Pawlowski, Dépôt physiques : Technique, microstructures et propriétés, Presses Polytechnique et universitaire Romandes, Lausanne, Suisse, 2003.
- [7] E. Legros, contribution a la modélisation tridimensionnelle procede de projection par plasma et Application a un dispositif a deux torches, thèse de doctorat, université de Limoges, France 2003
- [8] L. Pawlowski, Dépôt Physiques : Technique microstructure et propriétés, Presses polytechniques et Universitaire Romandes, Lausanne, Suisse, 2003.
- [9] Advanced Coating, Projection thermique, Belgique.
- [10] L. Pawlowski, Dépôt Physique : Techniques, microstructures et propriétés, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 2003.
- [11] A. Karimi and C. Verdon, Hydroabrasive Wear Behaviour of High Velocity Oxyfuel Thermally Sprayed WC-M Coating, Surf. Coat .Technol., Vol 62, 1993, p 493-498
- [12] L. Jacobs, M .M. Hyland, and M.D. Bonte, Comparative Studay of WC-CermetCoatings Sprayed Via the HVOF and HVAF Processes. J. Thermal Spray Technol., Vol 7 (No.2), 1998, p 213-218
- [13] Estimating the behavior of particales sprayed by single-cathode plasma torch based on a nonlinear autoregressive exogenous model liu, T, deng, planche, M-P; montavon G. Surface and coatings Technology, 2015, Vol.268, pp284-292.
- [14] Liu,T;Deng,S; Planche, M;P; Montavon,G.surface and coatings Technology,2015, Vol.268,pp 284-29.
- [15] C.Verdy ,”Structures multicouche missen forme par projection thermique : élaboration , caractérisation et application “,Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Sévenans,1998.
- [16] C.Moreau , Cielo P.,La montagne M., ”flattening and solidification of thermally sprayed particles”, Journal of thermal Spray Technology, Vol. 1,No. 4,1992, pp. 317-323.

- [17] V., Kudinov, P. Pekshev, B., Belaschenko, O., Solonenko, V.Safiulin , “ Obtention des revêtements par plasma”, en russe, Moscou, “Nauka”, 1990, p 401.
- [18] A.A. Opalowski, V.E. Fedorovlzv. Akad.Nauk.SSSR Neog.Master., 2-3 (1966),p. 443.
- [19] T. Ya. Velikanova, B. V. Khaenko, V. Z. Kublii, and S. I. Makhovitskaya, in: “Transformations in the carbide W₂C at Low Temperatures,” Inst. Probl. Materials Sci., National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev (1991), pp. 127-132.
- [20] T. Ya. Velikanova, V. Z. Kublii, and B. . khaenko, Transformations in the solid state and phase equilibria in the molybdenum-carbon system,” Poroshk. Metal, No.11,61-67 (1988).
- [21]. C. Chirstian, La lubrification, TPM Attitude, 01 Aout 2011.
- [22] Power Tribology, Laboratory international research and developoment in molecular tribology, Belgique, 2012.
- [23] D. Londolt, Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, Traité de matériaux, Ed Press Polytechnique et universitaire Romandes, Paris, France 1993.
- [24] D. Londolt, Corrosion et chimie de surfaces des métaux, Traité des Matériaux, presses polytechnique et universitaires romandes, 3e édition, Lausanne, Suisse 2003.
- [25] J. Thirion, Protection contre la corrosion, Equipements latéraux des ponts, édition d publications CTOA, Paris NOVEMBRE 1996.
- [26] N. Bernard, P. Nedine, R. Caroline, W. Martine, « Prévention et lutte contre la corrosion» une approche scientifique et technique, INSA Lyon, France 2004.
- [27] G. Kheira, Etude de corrosion et protection des équipements de production du gaz brut à HassiR'mel, Mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie 2015.
- [28] M. Sana, Etude comparative entre deux métaux passifs en milieux neutre, alcalin et acide: un acier inoxydable 304L et un alliage de titane Ti6Al4V, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université Mentouri-Constantine, Algérie 2008.
- [29] S. Derbal, Electrodeposition et caractérisation de couches minces métalliques ternaires CuZnSn, thèse de magistère, Université Ferhat ABBAS- Setif1, Algérie 2014.
- [30] M.C. Nebbar, Etude de la tenue à la corrosion de l'acier N80 et évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université Mohamed Khider–Biskra, Algérie 2010.
- [31] B. Nawel et D. Meriem, Etude du comportement électrochimique d'un acier au carbone sous l'effet de la température en milieu acide, Mémoire de fin d'étude, Université d'El-Oued, Algérie 2014.

[32] H. Uhlig, Corrosion et protection, première ed, Dunod, Paris, France 1970.

[33] B.Anissa et A.Hakima, contribution à l'étude de la corrosion et du comportement électrochimique, anodique et cathodique, du manganèse en milieu phosphorique (H_3PO_4), mémoire de fin d'études, Université A. Mira Bejaia, Algérie 2005.

Annexe

Présentation de l'Entreprise

ERENAV est un Chantier de Réparation Navale, propose des prestations globales de maintenance à tous les types de navires de moyen tonnage : dragues, navires de recherche, vraquiers, navires à passagers, cargos, port conteneurs, remorqueurs, barrages, pétroliers. Dès sa création, ERENAV a eu pour mission d'assurer un rôle de soutien technique aux différents armateurs nationaux et de fournir des prestations aux armateurs étrangers touchant les ports algériens, et cette spécificité fait d'ERENAV une société prestataire de services à part entière, et d'une superficie de 12 000 m² dont 2500 m² couverts et d'une valeur brute des équipements de 1 346 millions dinars.

ERENAV est une EPE-SPA, au capital de 1.550 Millions dinars. Elle fait partie du portefeuille de Groupe Algérien de transport Maritime « G.A.T. MA » sous la tutelle du Ministère des Travaux Publics et des transports, reconnue pour sa réactivité, ses compétences la qualité de ses travaux, le respect de ses engagements. Elle est basée dans 4 des plus grands ports d'Algérie, répartis sur le 1.200 km de côtes Algériennes, son implantation géographique est favorable. Ces ports sont situés en baies relativement abritées contre les perturbations météorologiques. De plus, les tirants d'eau y sont également favorables, dont le siège social est à Alger, opère à travers ses trois unités implantées à Alger, à Bejaia et à Oran. Elle dispose d'un dock flottant de 15000 tonnes (190× 32 m) à Bejaia et utilise deux cales sèches à Alger et d'une cale de halage à Oran, pour les mises à sec, ainsi que d'ateliers dans ces trois sites. Une annexe à l'Unité d'Oran a été créée à Arzew en 2007.

Les métiers d'ERENAV :

1. Les Traitement de surfaces

Lavage haute pression des coques de navires, sablage à l'abrasif des coques et corps métalliques, peinture au pistolet, en respect des normes navales.



Figure 1 : image représentative de traitement de surface d'une coque d'un bateau.

2. Réparation mécanique :

2-1.Mécanique Bord :

Constituée de travaux de mécanique réalisés à bord des navires, tels que le démontage et le remontage des hélices, arbres porte hélice, gouvernails, vannes de coque....etc.

2.2. Mécanique diesel :

L'intervention pour le démontage, l'inspection et expertise suivie de la réparation et des essais de tous les types de moteurs diesels. Les interventions sont réalisées soit à bord pour les moteurs qui ne sont pas déplaçables, ou en raison de l'urgence de la réparation, soit au niveau de l'atelier.

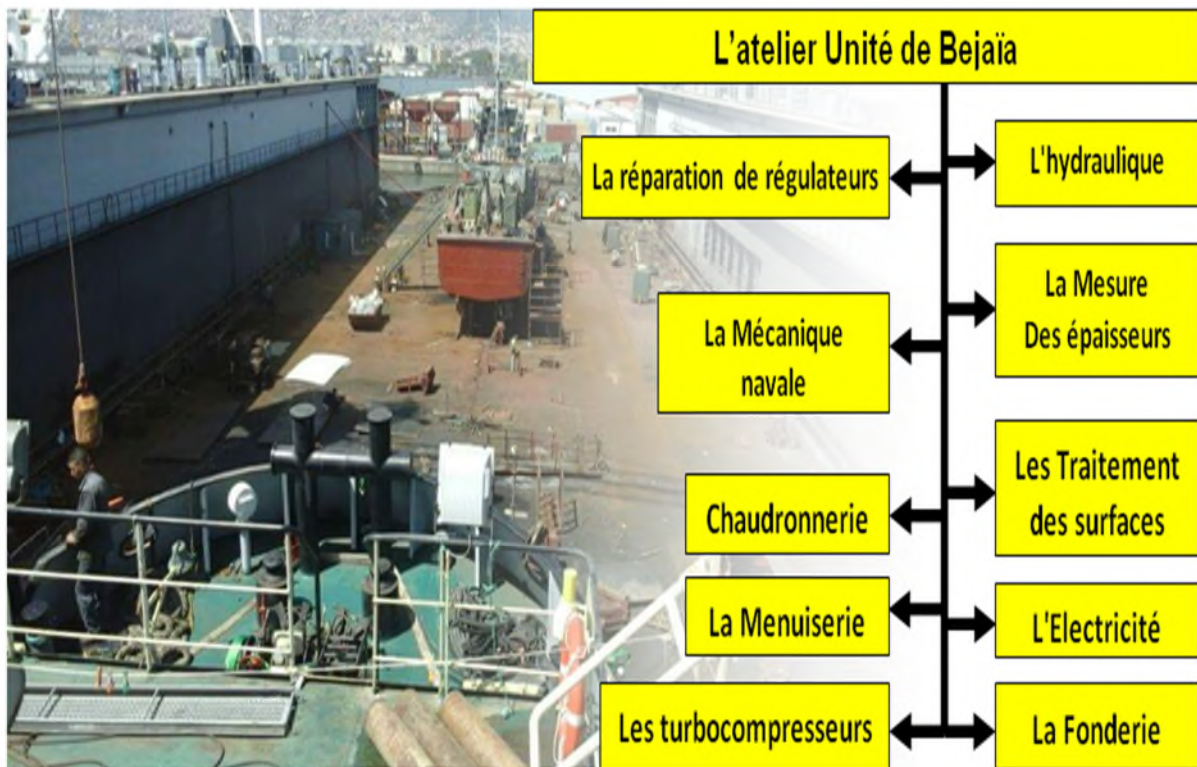


Figure 2 : structure de l'atelier unité de Bejaia.



Figure 3 : Quelques travaux à l'URNAB (unité de Bejaia).

3. Dock flottant :

Fonctionnement comparé d'une forme de radoub et d'un dock flottant. Le dock flottant est une structure particulière servant principalement à la réparation des bateaux. Contrairement à une cale sèche (ou forme de radoub), il s'agit d'une superstructure qu'on immerge pour y faire entrer les bâtiments, puis qu'on élève au-dessus de l'eau pour mettre le navire à sec. Le système repose sur le principe des ballasts. Le dock flottant ne dispose pas de système de propulsion, il peut par contre être déplacé d'un endroit à un autre à l'aide de remorqueur(s). Les sociétés de classification en contrôlent la construction ainsi que le suivi périodique. Inventé dans les années 1840 par les ingénieurs américains Stoddard et Gilbert; ils permettent de réparer des navires dans des lieux ne disposant pas de cale sèche.

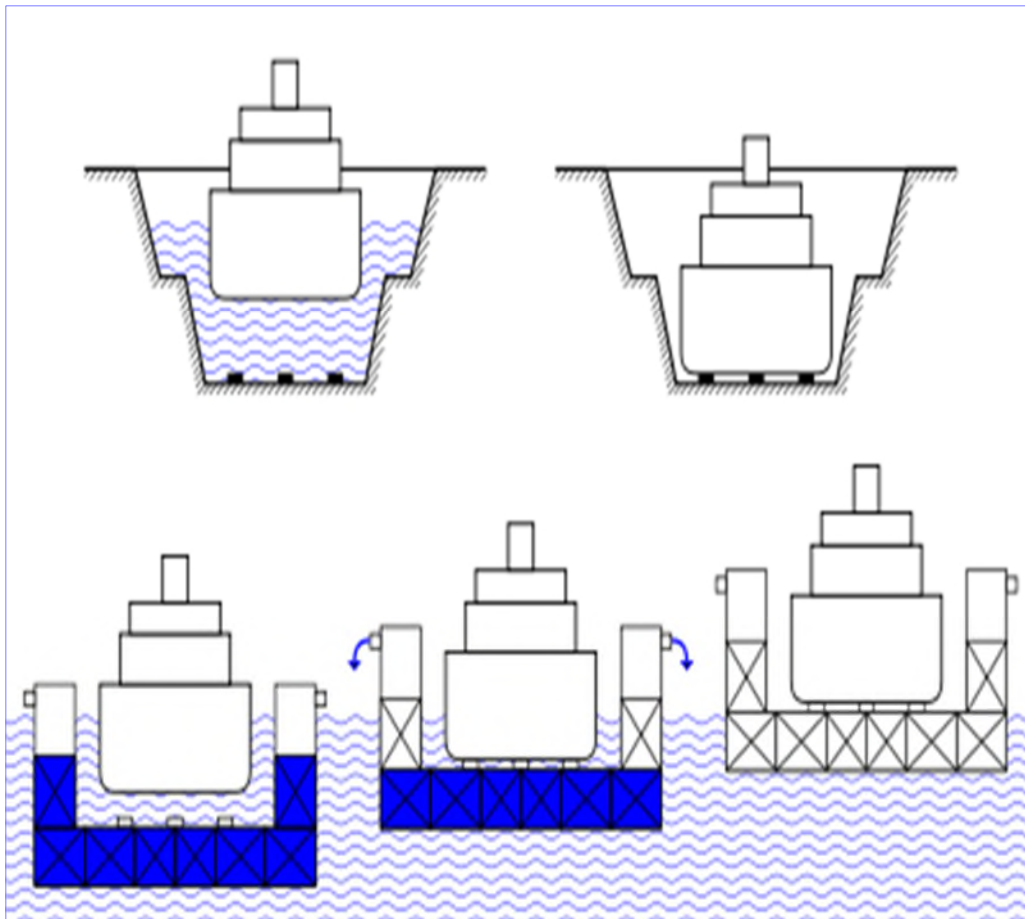


Figure 4: positionnement de Dock flottant

Mais parfois ça tombe malle si on n'a pas respecté les lois de la physique, parce que la stabilisation du dock flottant repose sur le principe des ballasts. Cet exemple est un cas parmi les autres cas de la déstabilisation du dock flottant et le résultat est catastrophique.



Figure 5: image représentatif malle tombe de Dock flottant.

3.1. Le dock flottant de Bejaia :

Aujourd'hui 80 %' des réparations faites sur la flotte algérienne se fait à l'étranger, l'Algérie a payé ainsi 80 millions de \$ de frais de réparation en 2006 (50 millions en 2004). La vieillesse de la flotte nationale alourdit de plus en plus cette facture. Les 20% du marché restant reviennent donc à l'Entreprise Nationale de Réparation Nationale.

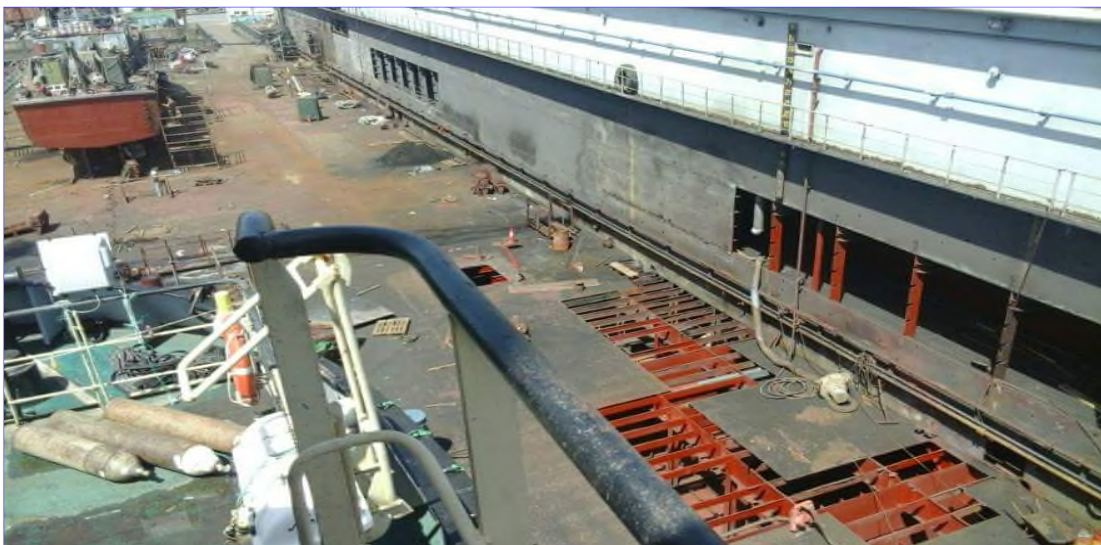


Figure 6: Dock flottant de Bejaia.

3.2 Le triangle du feu :

La réaction chimique de la combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant, une énergie d'activation en quantités suffisantes. C'est pourquoi on parle du « triangle du feu ».

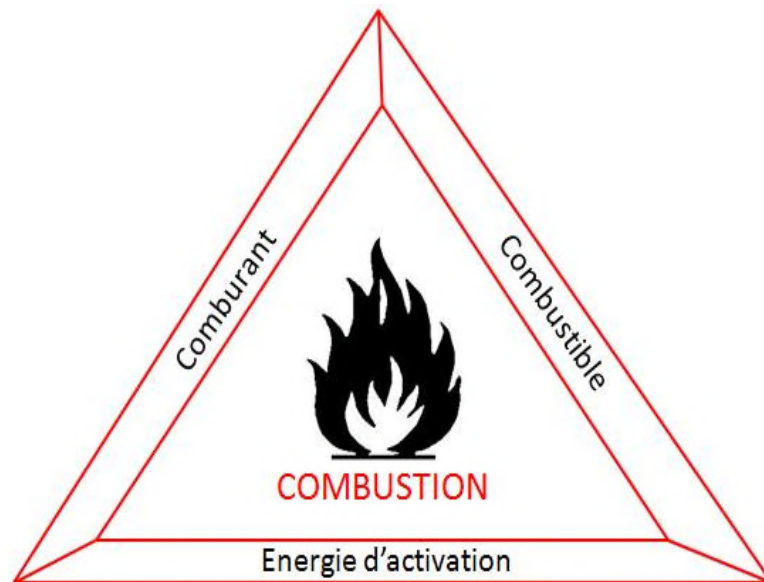


Figure 6 : triangle du feu.

Résultats des tests de perte de masse des échantillons :

Jours T.T(c°)	M₀	M₅	M₁₀	M₂₀
A 36	10.6009	10.6821	10.6943	10.7196
A60	9.2599	9.2766	9.2622	9.2653
S.T	8.5488	8.5522	8.5578	8.5596
850	8.7426	8.7548	8.7485	9.9160
950	9.8847	9.9015	9.9048	9.9160
1100	7.5442	7.5463	7.5500	7.5686

Résumé

L'objectif de l'étude est de réaliser sur un substrat en acier type A60 des dépôts par projection thermique devant conduire à un durcissement superficiel tout en améliorant les propriétés électrochimique, différents post-traitements ont été effectués à des températures de 850°C, 950°C et 1100°C. Dans la présente étude, les dépôts métalliques réalisés sont des alliages en acier inoxydable, ces dépôts traité thermiquement vont être comparé avec un acier utilise dans la construction naval qui est un acier BV Grade A navale plus connu aussi sous la désignation E36 BV, BV: Bureau Veritas, une société de classification, d'essais, d'inspections et de certification.

Les différentes techniques de caractérisation utilisé dans notre étude est l'analyse microstructurale, morphologique et la caractérisation basée sur les tests d'électrochimiques et les tests de micro-duretés. Les tests électrochimiques montrent que notre dépôt à base d'acier inoxydable traite thermiquement joue le rôle d'une anode, ce qui résume que notre revêtement est une protection cathodique par anode sacrificielle en milieu marin.

Abstract

The objective of the study is to produce thermal spray coating on a substrate steel type A60 in order to lead a superficial hardening while improving corrosion properties, several post-treatments was carried out at 850 °C, 950 °C and 1100 °C. In the present study, the metallic coating made are stainless steel alloys which are compared with a steel used in shipbuilding which is steel Grade A naval steel also known under the designation E36 BV, BV: Bureau Veritas, a classification, testing, inspection and certification company.

The different characterization techniques used in our study are microstructural, morphological analysis and characterization based on electrochemical tests and micro-hardness tests. Electrochemical tests show that our thermally treated stainless steel deposit plays the role of an anode, which summarizes our coating as sacrificial anode cathodic protection in the marine environment.