

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 : GÉNIE DES MATÉRIAUX

PAR:

DJEBIRI ABDELMALEK

BOUMESSILA MOHAMED SAID

Thème

Effet des post-traitements sur les propriétés mécaniques et électrochimiques des dépôts en aciers inoxydables obtenus par projection thermique

Soutenu le 07 -07-2022 devant le jury composé de :

Mr. R. Younes	M.C.A	Président
Mr. M.A BRADAI	Professeur	Rapporteur
Mr. A. Idir	M.A.B	Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2021 / 2022

Remerciements

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 vifs remerciements sont destinés à Mr M.A Bradai, 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 ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

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

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

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

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents

A ma sœur

A mes tantes et à mes oncles

A tous les enseignant

A tous mes amis

Boumessila Mohamed Said

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma mère

A mes tantes et à mes oncles

*A la mémoire de mon père et
mes grands-parents*

A toute ma famille

A tous les enseignant

A tous mes amis

Djebiri Abdelmalek

Sommaire

Sommaire

	Introduction générale.....	1
	Chapitre I : Recherche bibliographique sur la projection thermique	
I.1	Projection thermique.....	3
I.1.1	I.1-définition.....	3
I.1.2	1-1-2-Rappels historiques.....	3
I.1.3	1-1-3 Principe général.....	4
I.1.4	1-1-4 Différents types de projection thermique	4
I.1.4.1	1-1-4-1 Projection à flamme-poudre	4
I.1.4.2	1-1-4-2 Projection par flamme-fil.....	6
I.1.4.3	1-1-4-3 Projection plasma	6
I.1.4.4	1-1-4-4 Projection HVOF/HVAF	7
I.1.5	1-1-5 paramètres de projection influant sur la projection	8
I.1.6	1-1-6 Préparation des surfaces	9
I.1.6.1	1-1-6-1 La propreté.....	9
I.1.6.2	1-1-6-2 La rugosité.....	9
I.1.6.3	1-1-6-3 Le préchauffage.....	10
I.1.7	1-1-7 Modes de préparation	10
I.1.7.1	1-1-7-1 Le dégraissage	10
I.1.7.2	1-1-7-2 Le décapage.....	10
I.1.7.3	1-1-7-3 Le sablage	11
I.1.8	1-1-8 Formation et caractéristiques du dépôt.....	11
I.1.8.1	1-1-8-1 Structure du dépôt.....	11
I.1.8.2	1-1-8-2 L'adhérence.....	12
I.1.8.3	1-1-8-3 La dureté.....	12
I.1.8.4	1-1-8-4 La densité.....	12
I.2.	1-2 Traitements thermiques appliqués aux différentes familles d'aciers inoxydables.....	13
I.2.1	1-2-1 Aciers inoxydables martensitiques	13
I.2.2	1-2-2 Aciers inoxydables ferritiques	13

Sommaire

I.2.3	1-2-3 Aciers inoxydables ferrito-martensitiques	14
I.2.4	1-2-4 Aciers inoxydables austénitiques	15
I.2.4.1	1-2-4-1 Traitement d'hypertrempe.....	15
I.3	1-3 La corrosion.....	15
I.3.1	1-3-1 Définition de la corrosion	15
I.3.1.1	1-3-1-1 Les facteurs de la corrosion.....	15
I.3.2	1-3-2 Les types de la corrosion	16
I.3.2.1	1-3-2-1 la corrosion chimique	16
I.3.2.2	1-3-2-2 La corrosion biochimique	16
I.3.2.3	1-3-2-3 La corrosion électrochimique	16
I.3.3	1-3-3 Les différentes formes de corrosion.....	17
I.3.3.1	1-3-3-1 La corrosion uniforme.....	17
I.3.3.2	1-3-3-2 La corrosion par piqure.....	18
I.3.3.3	1-3-3-3 La corrosion inter granulaire	18
I.3.3.4	1-3-3-4 La corrosion sélective.....	19
I.3.3.5	1-3-3-5 La corrosion sous-contrainte	19
I.3.4	1-3-4 Moyens de protection contre la corrosion	20
I.3.4.1	1-3-4-1 Prévention par une forme adaptée des pièces	20
I.3.4.2	1-3-4-2 Protection électrochimique (active)	21
I.3.4.2.1	1-3-4-2-1 Protection cathodique	21
I.3.4.2.2	1-3-4-2-2 Protection anodique	21
I.3.4.3	1-3-4-3 Prévention par un choix judicieux des matériaux	22
I.3.4.4	1-3-4-4 Les Revêtements protecteurs	22
I.3.4.5	1-3-4-5 Protection d'inhibition	23
	Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentales	
II.1	II-1- introduction	25

Sommaire

II.2	II-2 matériaux utilisé	25
II.2.1	II-2-1 le substrat	25
II.3	II-3- préparation des échantillons	25
II.3.1	II-3-1- élaboration des échantillons	25
II.3.2	II-3-2 traitement thermique a 900.....	26
II.3.3	II-3-3 préparation des surfaces à revêtir	26
II.3.3.1	II-3-3-1 polissage.....	26
II.3.3.2	II-3-3-2 dureté HRC	27
II.3.4	II-3-4 microscope métallographique	29
Chapitre III : Résultats et discussions		
III.1	III-1 Introduction	31
III.2	III-2 microscopie optique	31
III.2.1	III-2-1 microscopie optique des échantillons X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8+ X30Cr13 non traités avant le test de corrosion	31
III.2.2	III-2-2 microscopie optique des échantillons X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8+ X30Cr13 traités avant le test de corrosion	33
III.3	III-3 caractérisation mécanique	34
III.3.1	III-3-1 essai de dureté HRC	34
III.4	III-4 perte de masse (corrosion)	35
III.4.1	III-4-1 morphologie de la corrosion	35
III.4.2	III-4-2 variation de la masse des échantillons X6CrNi18/8	36
III.4.3	III-4-3 variation de la masse des échantillons X30Cr13	37
III.4.4	III-4-4 variation de la masse des échantillons X6CrNi18/8 + X30Cr13	38

Sommaire

III.5	III-5 microscopie optique des échantillons X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8+ X30Cr13 traités et non traités après le test de corrosion	39
	Conclusion générale	42
	Bibliographie	

Liste des figures

Liste des figures

	Chapitre I : Recherche bibliographique sur la projection thermique	
Figure I.1	Représentation schématique de la technique de projection thermique.....	04
Figure I.2	Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre.....	05
Figure I.3	Schéma de principe d'une projection flamme-fil.....	06
Figure I.4	Schéma de principe d'une torche a plasma d'arc	07
Figure I.5	Schéma de principe d'une projection HVOF/HVAF.....	07
Figure I.6	Exemple de la corrosion électrochimique	17
Figure I.7	corrosion uniforme	18
Figure I.8	corrosion par pique	18
Figure I.9	corrosion inter granulaire	19
Figure I.10	corrosion sélective	19
Figure I.11	corrosion sous-contrainte	20
Figure I.12	Diminution du risque de corrosion sous contrainte d'un boulon	20
Figure I.13	protection cathodique par courant imposé.....	21
Figure I.14	Protection anodique par courant imposé	22
Figure I.15	Types des revêtements protecteurs	23
Figure I.16	Classification des inhibiteurs.....	24
	Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentales	
Figure II.1	Echantillon utilisé pour la projection.....	26
Figure II.2	Polisseuse a double disque	27
Figure II.3	Un duromètre type Rockwell	29
Figure II.4	Microscope métallographique	30

Liste des figures

Chapitre III		
Résultats et discussions		
Figure III.1	Images microscopiques des échantillons non traités avant le test de corrosion.....	32
Figure III.2	Images microscopiques des échantillons traités avant le test de corrosion.....	33
Figure III.3	Représentation en histogramme des résultats des essais de dureté	34
Figure III.4	Représentation graphique de la variation du Dm en fonction du Temps des échantillons non traités et traités	35
Figure III.5	Représentation graphique de la variation du Dm en fonction du Temps des échantillons X6CrNi18/8 non traités et traités	36
Figure III.6	Représentation graphique de la variation du Dm en fonction du Temps des échantillons X30Cr13 non traités et traités	37
Figure III.7	Représentation graphique de la variation du Dm en fonction du Temps des échantillons X6CrNi18/8 + X30Cr13 non traités et traités	38
Figure III.8	Images microscopiques des échantillons non traités après le test de corrosion	39
Figure III.9	Images microscopiques des échantillons traités après le test de corrosion	40

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1	Les principaux facteurs de la corrosion	15
Tableau II.2	composition chimique des échantillons	25

Introduction générale

Introduction générale

Les processus de corrosion conduisent à la dégradation des matériaux métalliques. De nos jours, ce phénomène est devenu considérablement important, cela est dû à l'utilisation indispensable de ces matériaux dans la vie quotidienne.

Dernièrement, ce problème a fait l'objet de plusieurs études. Plusieurs recherches ont été publiées sur le comportement des matériaux dans l'eau de mer, mais cela ne suffit pas. Des investigations plus approfondies doivent être réalisées pour mieux comprendre le comportement des matériaux vis-à-vis de la corrosion, pour faire face à ce phénomène, ils sont arrivés à l'une des solutions les plus exploitées pour le moment qui est la projection thermique.

Apparue dans le cadre de la protection anti-corrosion, la projection thermique a acquis une place intéressante dans le domaine de la maintenance industrielle à l'aide des performances des pièces revêtues par cette technique. De plus, la projection thermique est une procédure de dépôt consistant à injecter des particules solides dans un gaz à haute température, elles sont chauffées, fondues, accélérées et projetées sur le substrat à une grande vitesse, où bien c'est l'écrasement des gouttelettes qui vont donner le dépôt. Ce dernier est en fait constitué par un empilement de lamelles écrasées.

Notre travail consiste à étudier l'effet des post-traitements sur les propriétés mécaniques et électrochimiques des dépôts à base d'aciers inoxydables (X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8 + X30Cr13) obtenus par la technique de projection thermique à arc électrique.

Pour ce faire, nous avons jugé utile de diviser ce travail en trois chapitres suivants :

Dans le chapitre I, nous avons effectué une étude bibliographique permettant de présenter les différentes techniques de projection thermique, tout en mettant l'accent sur les différentes étapes de réalisation des dépôts ainsi que des généralités sur la corrosion.

Le chapitre II représente les techniques expérimentales et les différents matériaux utilisés pour l'élaboration des dépôts. Puis nous décrirons les méthodes de caractérisation microstructurale et mécanique des dépôts réalisés.

Introduction générale

Dans le troisième chapitre, on exposera les microstructures des dépôts réalisés moyennant la microscopie optique ainsi que les résultats expérimentaux issus des tests de corrosion et de dureté.

Enfin on clôturera ce travail par une conclusion générale émanant des résultats expérimentaux.

Chapitre I :

Étude bibliographiques

I-1 Projection thermique

I-1-1 Définition

La projection thermique est un ensemble de procédés de traitements permettant de changer les propriétés de surface par voie sèche. Elle permet de réaliser des revêtements thermiques pour plusieurs matériaux.

Parmi les techniques les plus accablées nous pouvons citer : l'électro dépôt, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur et la projection thermique.

L'utilisation de ces dépôts concerne la protection contre l'usure et la corrosion, la décoration ou la réalisation de dépôts à propriétés physiques spécifiques (électrique, magnétique, thermique...). [1]

I-1-2 Rappels historiques

La projection thermique est une invention de Max Ulrich Schoop, un concepteur suisse. Son idée était d'apporter des revêtements adhérents à partir d'impacts de particules issus d'une poudre chauffée venant s'écraser sur le substrat, dans le but de réaliser des dépôts métalliques denses. Cette idée lui aurait été inspirée après l'observation de ses petits enfants tirant à la carabine sur le mur de son jardin où les balles formaient des impacts écrasés. [3,4]

Le modèle de projection thermique est définie comme "**une méthode où le métal liquide est pulvérisé sur la surface au moyen d'une substance gazeuse sous pression**". Les brevets de M.U.Schoop décrivent la façon de réaliser des dépôts de cuivre, d'argent, d'étain, de zinc, d'aluminium et d'autres alliages sur la plupart des substrats (métal, bois, verre, papier, tissus) par un apport de poudres finement divisées traitées par une flamme soufflante. Un gaz porteur peut aussi être utilisé pour activer et diriger le jet de poudres. Schoop voit dans son invention un procédé pratique et peu coûteux entre l'utilisation des revêtements antioxydant sur les ponts et les coques des navires.

L'application d'un plasma comme source de chaleur n'apparaît que dans les années 60 dans un contexte d'émulation autour des plasmas thermiques générées par arc électrique. [5] Les initiaux brevets sont des travaux de Gabriel M.Giannini en 1960 (Plasmadyne Corp, Californie, usa) [6] et de Robert M.Gage en 1962 (Union Carbide, Buffalo, NY, usa) [7]. Ils s'inspirent du générateur plasma haute température de H.Gerdien et A.Lotz (1922). [8]

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la projection thermique

Dans les années 1980 est développé en URSS la technique de projection dynamique à froid (cold spray) à partir de l'observation accidentelle de la formation impulsive de dépôts lors de l'érosion de particules rapportés à un écoulement grande vitesse chargé de poudres fines. [9]

I-1-3 Principe général

La projection thermique consiste à faire fondre un matériaux d'apport qui est généralement sous forme de fil-tige ou cordon dans une source de chaleur puis projeter les particules fondues sur un substrat préalablement préparé pour former le dépôt. [1]

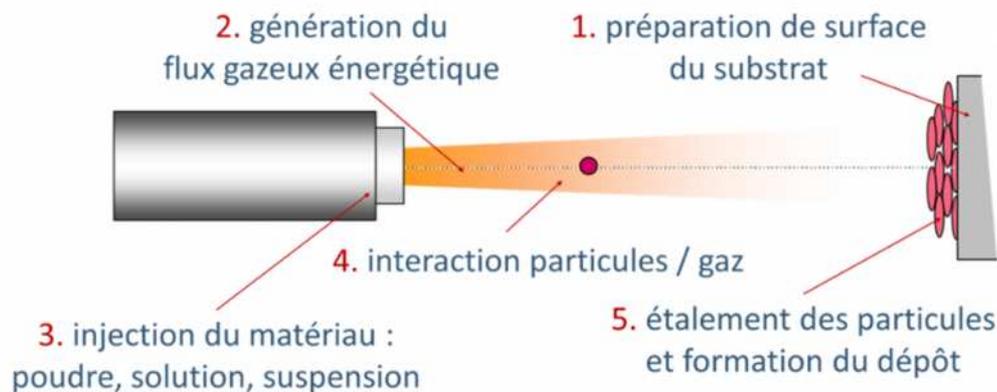


Figure I.1 : Représentation schématique de la technique de projection thermique.

I-1-4 Différents types de projection thermique

Toutes les méthodes fonctionnent selon le même principe. Dissoudre le matériau avant de pulvériser avec un gaz porteur.

On utilise deux types d'énergie comme source de chaleur :

- La flamme
- L'arc électrique

I-1-4-1 Projection à flamme-poudre [10]

La projection flamme-poudre est généralement utilisée car c'est la plus ancienne méthode de projection thermique elle consiste à introduire le matériau qui sera transporté par la flamme de combustion d'oxygène grâce à l'énergie cinétique transmise par le gaz brûlant.

Parmi les types de distribution de la poudre nous citons ci-dessous :

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la projection thermique

- **Distributeur par gravité**

Un récipient à poudre placé directement au-dessus ou directement au-dessus du pistolet. La gravité directe fait tomber cette poudre au centre du chalumeau et y est propulsée par la dépression dans le conduit de l'un des deux gaz de combustion. Ce processus est aussi ce qu'on appelle une torche à gaz.

- **Distributeur par pression**

Un réservoir fermé près du pistolet est équipé en bas d'un distributeur de poudre à air comprimé. La poudre est transportée via le pistolet par un tube et il est propulsé sur le substrat par un vecteur d'air comprimé. Vous pouvez ajouter à cet appareil un vibreur ou une vis d'Archimède pour en voir plus sur la régularité des flux de produits.

- **Distributeur par dépression**

Le réservoir est équipé d'un dispositif de dépression composé d'une canne d'aspiration et d'une canne d'admission d'air connectée au dispositif d'aspiration. L'effet Giffard généré par le courant d'air comprimé passant par in système Convergent-divergent permet à la poudre d'être propulsée jusqu'au pistolet.

- **Distributeur par cyclone**

Le réservoir à poudre est équipé d'un système cyclone ou le mouvement du tourbillon. La poudre est interrompue par le flux d'air qui permet son transport jusqu'aux pistolets de projection.

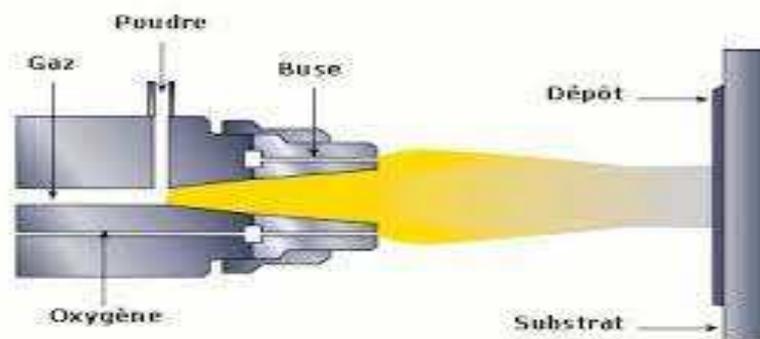


Figure I.2 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre.

I-1-4-2 Projection par flamme-fil [11]

Contrairement à la méthode précédente, la flamme n'est utilisée dans cette projection que pour faire fondre le matériau de remplissage introduit sous la forme d'un fil, d'une ficelle ou d'une tige fondu au centre. Une fois fondu, le matériau de remplissage est propulsé sur le substrat par un jet d'air comprimé. La figure (I.3) illustre le principe de la projection flamme-fil.

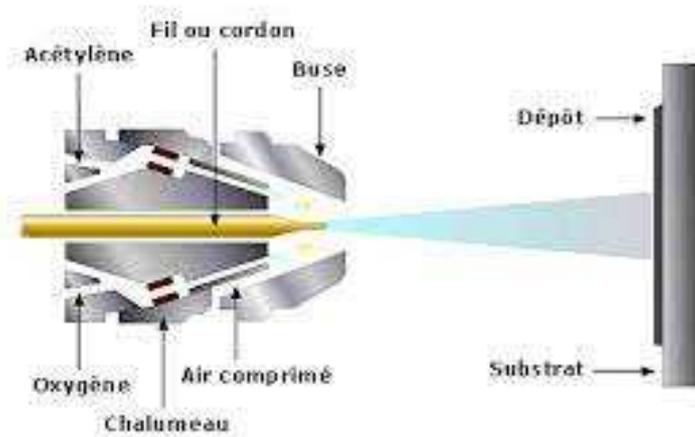


Figure I.3 : Schéma de principe d'une projection flamme-fil.

I-1-4-3 Projection plasma [12]

Le plasma est considéré comme le 4^{ème} état de la matière. C'est un gaz ionisé constitué d'électrons libres, d'ions, d'atomes et de molécules dans des états excités ou non.

Pour la génération d'un plasma, trois éléments sont fondamentaux :

- Un générateur à courant continu;
- Un générateur haute fréquence ou haute tension;
- Un couplage assurant le contact entre deux électrodes via le gaz plasma.

Pour la projection thermique, deux propriétés conditionnent vitesse et température des particules projetées :

- La conductivité thermique qui détermine les transferts plasma-particule est donc l'état de fusion des particules lors de leur impact sur le substrat;
- La viscosité qui permet de démunir les entrées d'air dans le jet plasma, d'augmenter la longueur du jet et d'éviter les réactions chimiques des particules (oxydation en particulier).

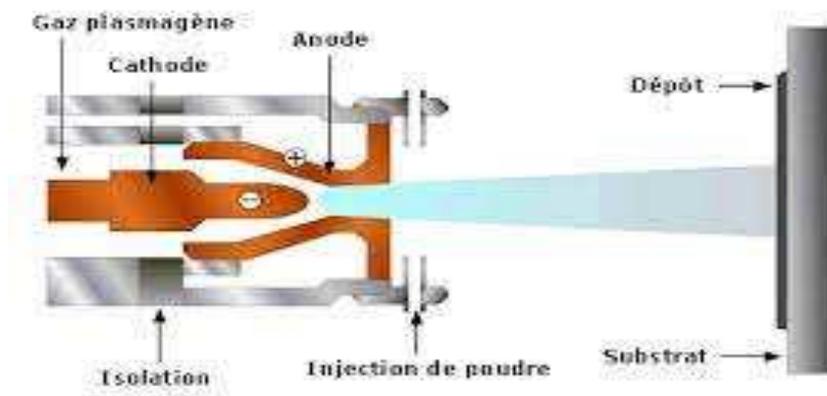


Figure I.4 : Schéma de principe d'une torche à plasma d'arc.

I-1-4-4 Projection HVOF/HVAF [13]

Cette variante du procédé classique à la flamme est due à la très grande vitesse atteinte par les particules rejetées par la haute pression dans la chambre de combustion. Deux méthodes ont été développées et les différences reposent essentiellement sur des critères de classification économique

- Le procédé **HVOF** : high velocity oxygen fuel;
- Le procédé **HVAF** : high velocity air fuel.

La méthode HVOF utilise la combustion de deux gaz: d'une part et d'autre par propane, propylène, tétrène ou hydrogène.

La méthode HVAF utilise quant à elle un mélange kérosène -air comprimé pour la combustion. Les gaz de combustion pénètrent dans la chambre de combustion puis seront éjectés du pistolet sous l'effet de la pression élevée (5 à 7 bars).

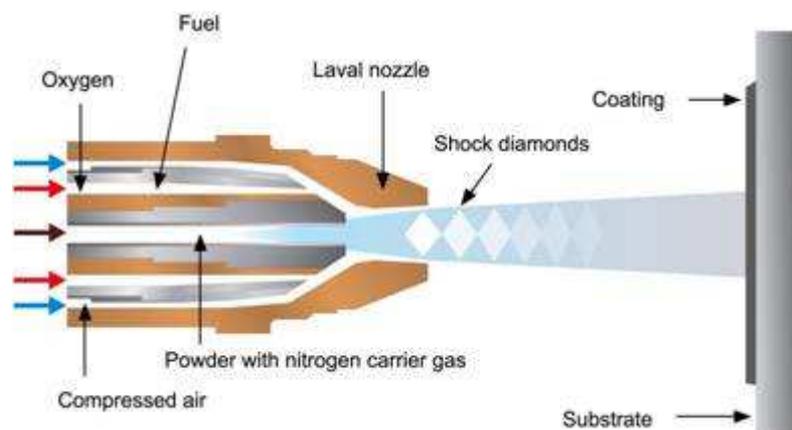


Figure I.5 : Schéma de principe d'une projection HVOF/HVAF.

I-1-5 Paramètres de projection influant sur le dépôt [14]

- **Débit des gaz**

Un excès d'oxygène augmente l'oxydation du dépôt et donc sa dureté ce qui réduit sa résistance mécanique. Les dépôts deviennent cassants et difficiles à traiter, et les excès Niveaux d'acétylène, qui conduisent à la carbonisation du revêtement, dans les deux cas En cas d'usure prématurée de la buse.

- **Pressions des gaz**

Une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal, donc toutes les consommations (Dissipation d'énergie).

- **Diamètre du fil ou du cordon**

Un diamètre du fil ou du cordon plus grand, augmente le grain de dépôt et les pertes.

- **Vitesse du fil ou du cordon**

Lorsque la vitesse du fil ou du cordon est trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur des grains. Et lorsque cette dernière est trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.

- **Distance de projection**

Lorsque la distance de projection est trop petite, elle provoque des turbulences, pertes et défauts d'adhérence. Et les dépôts surchauffent. Augmentation du refroidissement des grains lorsque la distance est trop grande et entraîne une mauvaise adhérence.

- **Angle de projection**

En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.

- **Vitesse de balayage**

Lorsque la vitesse de balayage est trop rapide, cela augmente la perte de métal et l'épaisseur du dépôt devient est trop faible. Lorsqu'elle est trop lente, elle crée une épaisseur de dépôt irrégulière et augmente la température du substrat.

- **Vitesse de rotation**

Lorsque la vitesse est trop rapide, les particules rebondissent, et contamine les dépôts, lorsqu'elle est trop lente, elle peut provoquer une surchauffe des dépôts et une couche de revêtement trop épaisse.

• Refroidissement

Lorsque le refroidissement est trop rapide, il génère le délaminage des couches, et lorsqu'il est trop lent, il entraîne une surchauffe, et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt.

- La projection doit s'effectuer dans les meilleures conditions, c'est-à-dire sur un support bien préparé et dans un délai acceptable entre la préparation et la métallisation.

I-1-6 Préparation des surfaces

La métallisation exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir.

Si parfois on pouvait avoir des liaisons avec des liquides et des particules très chaudes du fait de la fusion entre le projectile et le substrat, cet accrochage reste très insuffisant.

En effet, que ce soit lors d'opérations d'usinage sur des pièces rechargées, ou lors de sollicitation des composants résistants à la corrosion, les contraintes mécaniques induites aux revêtement les feront décoller, il est donc utile et nécessaire de préparer le revêtement afin d'obtenir:

- Une propreté qui est un état chimique;
- Une rugosité qui est un état physique;
- Un préchauffage éventuel.

I-1-6-1 La propreté

La propreté est l'observation visuelle de la disparition plus ou moins importante des diverses impuretés qui tachent la surface du produit. Il met également à jour la structure pour d'éventuelles modifications physiques (défauts ou autres). La métallisation nécessite que la surface du support reçoive un futur revêtement et soit particulièrement propre, comme le calcaire, la rouille, les traces d'huile ou de graisse, afin qu'elle n'interfère pas avec l'adhérence du métal d'apport. Cette propreté sera obtenue en fonction du type de contamination en surface, ou par dégraissage dans le cas d'opérations de rechargement, net après usinage ou par sablage
Opération de protection contre la corrosion.

I-1-6-2 La rugosité

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la projection thermique

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

La rugosité est le résultat d'une modification micro-géométrique de surface, donnée par bombardement intensif de projectiles avec sablage, ou par enlèvement organisé. Dans le cas de l'usinage, la matière est gaufrée (relief).

Dans les deux cas, le résultat a pour effet :

- D'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue de la surface.
- De créer un maximum d'aspérités, où le matériau déposé viendra s'ancrer.

La rugosité est complémentaire de la propreté.

I-1-6-3 Le préchauffage

Comme on l'a vu précédemment, selon l'écart de température entre le métal d'apport et le support, on obtiendra des accrochages plus ou moins importants. C'est pourquoi il est toujours recommandé de réchauffer légèrement les pièces à traiter pour augmenter l'adhérence. Il est essentiel pour le revêtement en poudre, en particulier pour les matières plastiques non conductrices de chaleur. Le préchauffage peut également être utilisé pour sécher certaines pièces poreuses trop saturées d'eau, de graisse ou d'huile pour être nettoyées. Il permettra au liquide absorbé de s'écouler, permettant à la métallisation d'adhérer efficacement.

I-1-7 Modes de préparation [15, 16]

I-1-7-1 Le dégraissage

La graisse que nous voulons éliminer lors de cette opération est incrustée dans la matrice. Elle est réalisée par dissolution en milieu solvant organique, ou par saponification, ou par mise en suspension avec des tensioactifs. Dans la plupart des cas, une chaleur suffisante sera utilisée pour ramollir la graisse. De plus, des effets mécaniques sont souvent nécessaires. La profondeur de dégraissage est plus ou moins celle requise, et le dégraissage est très approfondi ; par conséquent, un dégraissage chimique avec une solution d'électrolyte est recommandé.

I-1-7-2 Le décapage

Le nom commun de décapage comprend le processus d'élimination des produits en acier. Le décalaminage élimine la couche d'oxydes anhydres formée à haute température, tandis que le dérouillage préserve les oxydes hydratés naturellement corrodés. La méthode de détartrage est chimique, électrochimique, mécanique ou thermique. Les méthodes chimiques et électrochimiques utilisent des solutions acides et alcalines corrosives et même des agents oxydants puissants. Dans la plupart des cas, une mauvaise préparation de surface est la cause de l'échec du traitement de surface. La qualité de la préparation est une notion relative selon l'utilisation, et les éléments gênants et leur teneur limite sont différents.

I-1-7-3 Le sablage

Le sablage est un abus de langage pour désigner un traitement par « impact », plus communément appelé traitement d'une surface par de petites mais nombreuses projections destinées à provoquer une modification physique, chimique ou mécanique du substrat. La technique utilisée insiste sur l'utilisation d'un transporteur de gaz (généralement de l'air comprimé) ou de la force centrifuge pour projeter des particules à grande vitesse, frappant de manière répétée la surface d'une pièce. Le "grenailage" utilise une très grande variété de projectiles, différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres qui influent sur les résultats.

I-1-8 Formation et caractéristiques du dépôt

Les revêtements sont caractérisés par plusieurs facteurs dont les plus significatifs sont :

- La structure;
- L'adhérence;
- La dureté;
- La densité;
- La contrainte résiduelle.

I-1-8-1 Structure du dépôt

Les particules projetées sur le substrat sont broyées sur le substrat pour former une superposition de couches lamellaires. Typiquement, la phase de solidification commence avant la fin de la phase d'étalement. Les particules heurtent les lamelles déjà solidifiées. Ainsi, les dépôts se forment par l'accumulation de lamelles dans une structure en couches, avec des

propriétés différentes de celles des matériaux massifs. Les dépôts comprennent des inclusions telles que des oxydes ou d'autres matériaux provenant de chalumeaux qui ont eux-mêmes fondu ou partiellement fondu des particules n'ayant pas encore subi un cycle thermique complet (du fait de leur taille ou de leur parcours dans la source de chaleur). [17,18]

I-1-8-2 L'adhérence

De manière générale, le comportement d'un revêtement dépend largement de la qualité de la liaison entre le substrat et la couche préalablement déposée. Cette adhérence est de nature mécanique : sous l'effet de la pression lors de l'impact. Le matériau dans son état plastique est projeté dans les creux de la surface, établissant des points d'ancrage. Cette adhérence est fonction du matériau de projection et des paramètres de projection. L'adhérence des dépôts de projection thermique est l'un des points à traiter pour obtenir des résultats fiables dans des conditions de service sévères

- Le substrat doit être très propre et le dépôt doit s'effectuer dans les 20 minutes qui suivent le sablage.
- La surface doit être rugueuse afin de faciliter l'adhérence mécanique et d'augmenter la surface du contact.

Les contraintes résiduelles entre le dépôt et le substrat peuvent entraîner le décollement du dépôt au refroidissement. [18]

I-1-8-3 La dureté

Les particules sont soumises à un martèlement dû à l'influence des particules suivantes, ce qui conduit à un phénomène de trempe, qui est lié à leur trajectoire et à la température du support. La température de l'acier chute rapidement de 1500 °C à 100 °C en très peu de temps, La température maximale de la pièce traitée. La dureté est un attribut important car elle indique la résistance à l'usure. Il est affecté par la teneur en oxyde et la porosité des dépôts. Une teneur en oxyde plus élevée entraîne une dureté plus élevée. L'augmentation de la porosité entraîne également une diminution de la dureté moyenne du dépôt. [19]

I-1-8-4 La densité

Les dépôts projetés thermiquement dans l'air sont poreux. Selon le mode de projection utilisé, cette porosité est plus ou moins importante. La taille des particules et leur vitesse ont un effet

significatif sur la densité du revêtement. Pour les revêtements métalliques, celle-ci est également en fonction de la vitesse de formation d'oxydes lors de la projection. [18]

I-2 Traitements thermiques appliqués aux différentes familles d'aciers inoxydables

I-2-1 Aciers inoxydables martensitiques [20]

Leur structure entièrement martensitique confère à ces aciers une limite d'élasticité, une résistance et une dureté élevées. En revanche, ils sont moins ductiles que les aciers inoxydables ferritiques ou austénitiques, et pour l'améliorer, les aciers inoxydables martensitiques sont généralement plus ou moins fortement trempés. Comme tous les aciers inoxydables, les aciers inoxydables martensitiques contiennent au moins 11 % de chrome. La structure martensitique peut être obtenue par ajout de carbone ou de nickel. La contribution carbone peut atteindre 1,4 %. Cet élément augmente fortement la dureté de l'acier, car d'une part il augmente la dureté de la martensite et d'autre part il entraîne l'apparition de carbures. Le carbone peut être partiellement remplacé par de l'azote.

Le nickel peut être ajouté entre 1,5% et 5%. Cet élément a beaucoup moins d'effet sur la dureté que le carbone et peut être utilisé pour améliorer la ductilité. C'est beaucoup plus cher que le carbone.

I-2-2 Aciers inoxydables ferritiques [20]

Les aciers inoxydables ferritiques au sens strict se caractérisent par l'absence de domaines γ et $\alpha + \gamma$ monophasés. Cependant, les aciers ferritiques sont classés comme ayant de l'austénite à chaud (présence de domaines $\alpha + \gamma$), par exemple jusqu'à 30 %, mais pas de martensite dans le métal à l'état de livraison. Dans la suite de cet article, nous qualifierons parfois ces aciers d'aciers semi-ferritiques. Par conséquent, la teneur en carbone et en azote (éléments gamma) est modérée, inférieure à 0,1 %. L'utilisation d'éléments générateurs à la fois de carbone et d'alpha, tels que le titane, le niobium ou le zirconium, assure le caractère entièrement ferritique de la nuance : la nuance dite stable. La teneur en chrome peut être comprise entre 10,5 % et 30 %.

Les traitements thermiques appliqués aux aciers inoxydables ferritiques peuvent généralement être considérés comme des recuits pour recristalliser le métal ou lui redonner certaines de ses propriétés de ductilité ou de corrosion. Incidemment, la recristallisation est mentionnée dans le guide de choix du traitement thermique de l'inox, mais n'est pas abordée dans cet article. Ils se

soucient davantage des fabricants d'acier que des utilisateurs finaux de l'acier. Toute la fragilité ci-dessus détermine la plage de température utilisée pour le recuit. Ici, il faut faire la distinction entre les boîtiers en acier instables et stables.

Dans le premier cas, le recuit sera effectué entre 750 °C et Ac1, car les températures supérieures sont interdites par crainte de redissoudre les carbonitrides ou de former de l'austénite puis de se transformer en martensite. Dans le second cas, le recuit peut être réalisé entre 850 et 1000 °C, car les températures élevées accélèrent les phénomènes de récupération ou de recristallisation. La stabilité en température des carbures formés par les éléments stabilisants est supérieure à celle des carbures de chrome, cette stabilité est plus prononcée si le passage du titane au niobium et enfin au zirconium est réalisé. Éviter de redissoudre le carbure de titane (à partir de 1000 °C) ou le carbure de niobium (à partir de 1150 °C) car ils reprécipitent rapidement et sous forme fine au refroidissement, provoquant un certain durcissement.

Dans tous les cas, le refroidissement devra être rapide pour passer rapidement à travers les zones fragilisantes, en particulier autour de 475 °C.

I-2-3 Aciers inoxydables ferrito-martensitiques [21]

On utilise des nuances d'aciers inoxydables ferrito-martensitiques pour désigner des nuances avec une gamme $\alpha + \gamma$ à chaud, avec une teneur maximale en austénite plus élevée que les nuances décrites au paragraphe précédent comme semi-ferritiques (de 40 % à 60 %, tandis que jusqu'à 30 %). De plus, ce domaine alpha + gamma est effectivement utilisé pour fournir des produits contenant 10 à 55 % de martensite. Cela permet d'augmenter la résistance ou la dureté, gain qui peut être complété par l'effet de l'écrouissage. Ces nuances peuvent présenter un compromis performance/coût intéressant entre les nuances ferritiques et austénitiques à l'état écroui. Le traitement thermique final appliqué au métal doit être porté à une température suffisante (et pendant une durée suffisante) pour que la teneur en austénite soit égale à la teneur en martensite visée. Une vitesse de refroidissement supérieure à 20 °C/h est suffisante pour transformer toute l'austénite chaude en martensite.

La martensite de nuance 1.4589 est relativement tendre du fait de la présence de titane qui fixe le carbone et l'azote du fait de sa faible teneur en carbone (le métal a un allongement en traction de 20 à 25%). Cette remarque est à ajuster en fonction de la température à laquelle l'austénite se forme : si la température est élevée (1050 ou 1100 °C), le carbure de titane s'est dissous, la teneur en carbone de l'austénite augmentée et la dureté de la martensite seront plus élevées Par

conséquent, l'ombrage La propriété finale est très flexible. La martensite de qualité 1.4017 sera plus dure. Du fait de la présence de ferrite, la résilience et la ductilité sont suffisantes et le revenu n'est généralement pas effectué, mais une simple relaxation est effectuée si nécessaire.

I-2-4 Aciers inoxydables austénitiques [20]

I-2-4-1 Traitement d'hypertrempe

Il s'agit d'un traitement thermique premium généralement appliqué aux aciers inoxydables austénitiques. Il consiste en un maintien à haute température (de 1000 à 1150 °C), suivi d'un refroidissement rapide. Le but de ce traitement est d'obtenir une phase austénitique homogène à température ambiante dans laquelle tous les éléments, notamment le carbone et l'azote, sont en solution solide.

I-3 La corrosion

I-3-1 Définition de la corrosion

La corrosion est un processus électrochimique qui détériore les métaux en réagissant avec l'environnement. Le processus de corrosion détériore le fer dans l'acier, entraînant la perte de ses propriétés principales telles que la dureté ou la résistance.

La corrosion est un phénomène naturel très complexe, sachant que l'interaction interstitielle irréversible peut être vue sous sa forme globale comme une réaction spontanée d'échange d'électrons à l'interface métal / environnement, c'est juste un Restauration à l'état d'oxyde naturel qui se produit sous des influences environnementales immédiat comme le sol, l'atmosphère, l'eau ou plusieurs d'autres fluides [22].

I-3-1-1 Les facteurs de la corrosion [22]

Le phénomène de corrosion dépend de nombreux facteurs souvent en relation les uns avec les autres suites à des réactions chimiques qui se produisent sur la surface des métaux et des alliages, sous l'action de l'environnement. Ces facteurs peuvent provenir de l'intérieur ou de l'extérieur. Comme on le voit sur le tableau suivant :

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la projection thermique

Facteurs du milieu corrosif	Facteurs métallurgique	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 -procèdes d'élaboration -impuretés -traitement thermique -traitement mécanique	-état de surface -forme des pièces -emploi d'inhibiteur -procèdes d'assemblage	-vieillissements -tensions mécaniques -modification des revêtements protecteurs

Tableau (I.1) : Les principaux facteurs de la corrosion

I-3-2 Les types de la corrosion [22]

On peut distinguer trois grandes classes de la corrosion : Chimique, biochimique et électrochimique, d'après la nature du milieu environnant dans lequel la substance interagit

I-3-2-1 la corrosion chimique [22]

Il s'agit d'une réaction hétérogène non électrolyte qui se produit à l'interface métal/gaz ou liquide et peut être provoquée par les milieux atmosphériques (oxygène, humidité anhydride carbonique, anhydride sulfureux, et d'autres produits industriels) comme l'oxydation des aciers ordinaire à haute température par l'oxygène de l'air.

I-3-2-2 La corrosion biochimique [22]

Il s'agit d'une attaque bactérienne sur des métaux en particulier dans les canalisations enterrées, due à l'activité vitale des différents microorganismes milieu nutritif ou sécrétant des substances corrosives telles que CO₂, H₂S, H₂SO ou d'un acide organique.

I-3-2-3 La corrosion électrochimique [22]

Appelée aussi corrosion humide, la corrosion électrochimique est le phénomène le plus important et le plus courant de la corrosion, qui se traduit par un transfert d'électrons entre le métal et la solution électrolytique en contact avec celui-ci, entraînant une oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxydes avec la présence d'un agent réducteur (H₂O, O₂, H₂, etc.)

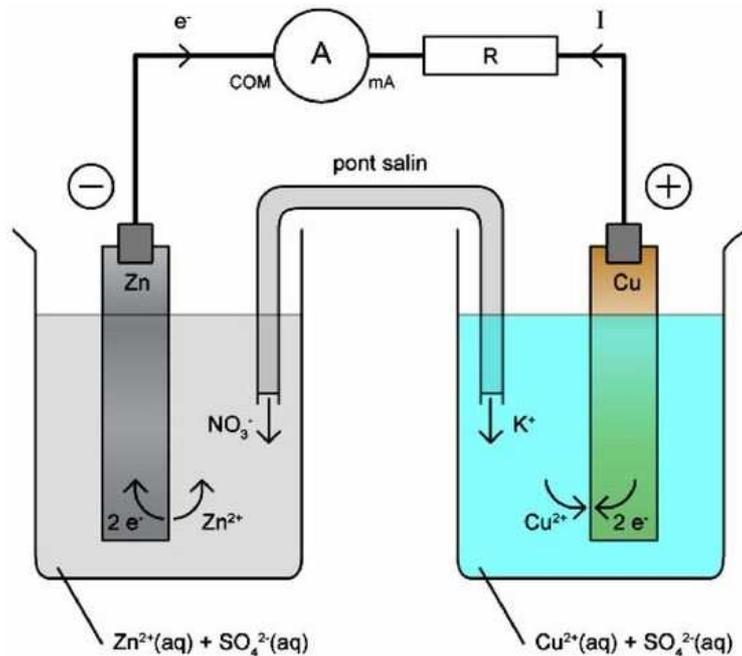


Figure I.6. Exemple de la corrosion électrochimique

Ce type de corrosion implique un transfert de charge à l'interface entre un conducteur électronique, nommée électrode, et un conducteur ionique, nommé électrolyte. Une réaction électrochimique peut inclure une ou plusieurs réactions d'électrode.

I-3-3 Les différentes formes de corrosion [22]

La corrosion est généralement considérée uniquement comme de la rouille et du ternissement, cependant, les dommages dus à la corrosion peuvent également se produire d'autres manières, entraînant, par exemple, une défaillance, une fissuration ou une perte de résistance ou de ductilité. On peut distinguer cinq principaux types de corrosion classés selon l'aspect extérieur ou de propriétés physiques changés

I-3-3-1 La corrosion uniforme [22]

C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. On reconnaît cette attaque notamment sur les métaux exposés aux milieux acides par exemple oxydation et passivité anodiques ; corrosion atmosphérique.

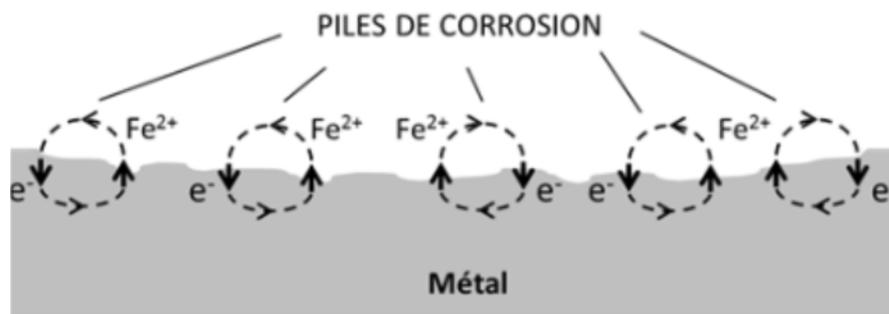


Figure I.7 corrosion uniforme

I-3-3-2 La corrosion par pique [22]

C'est une Attaque qui peut survenir sur tout point de la surface d'un acier inoxydable exposée à un milieu chloruré, se réduit à des piqûres très localisées qui peuvent progresser très rapidement en profondeur avec une perte de poids remarquable de la structure apparaisse, prenant pour exemple une corrosion par piqûre des métaux passifs tels que les aciers inoxydables.

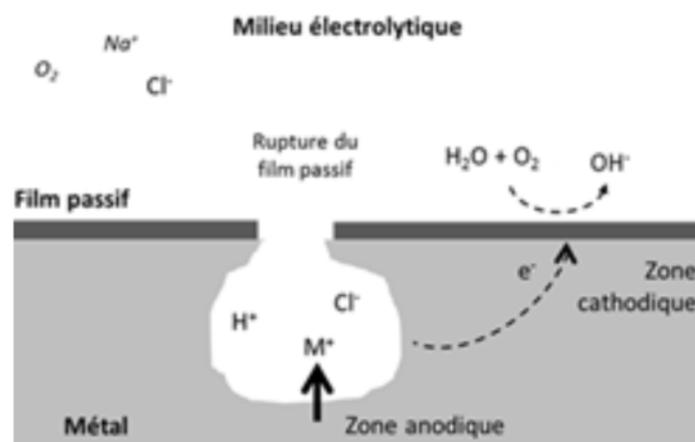


Figure I.8 corrosion par pique

I-3-3-3 La corrosion inter granulaire [22]

C'est une dissolution préférentielle aux environs immédiats des joints de grains, qui peut entraîner une décohésion totale des grains, et une perte totale des propriétés mécaniques du métal comme par exemple les alliages de nickel.

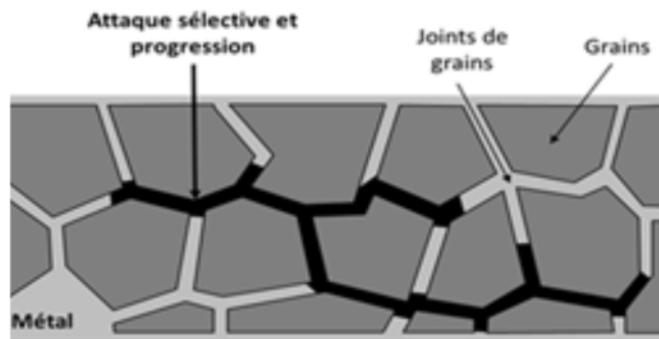


Figure I.9 corrosion inter granulaire

I-3-3-4 La corrosion sélective [22]

C'est une oxydation sélective via la corrosion de l'un des éléments d'alliage, laissant une structure métallique poreuse, par exemple la corrode préférentiellement du zinc dans un laiton.

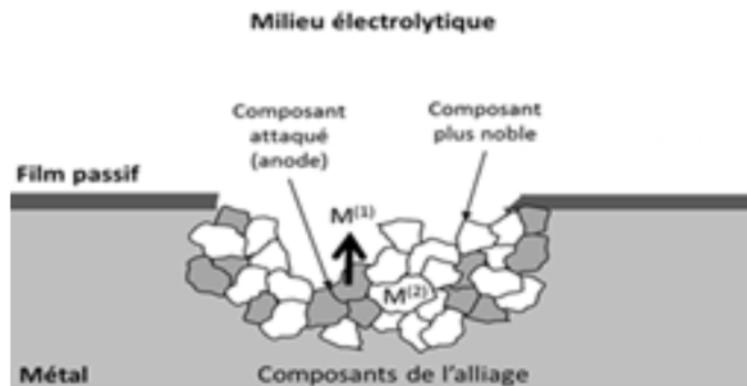


Figure I.10 corrosion sélective

I-3-3-5 La corrosion sous-contrainte [22]

C'est la fissuration du métal due à une contrainte mécanique de traction répétées ou alternées dans un environnement corrosif par exemple : corrosion sous tension, corrosion par fatigue.

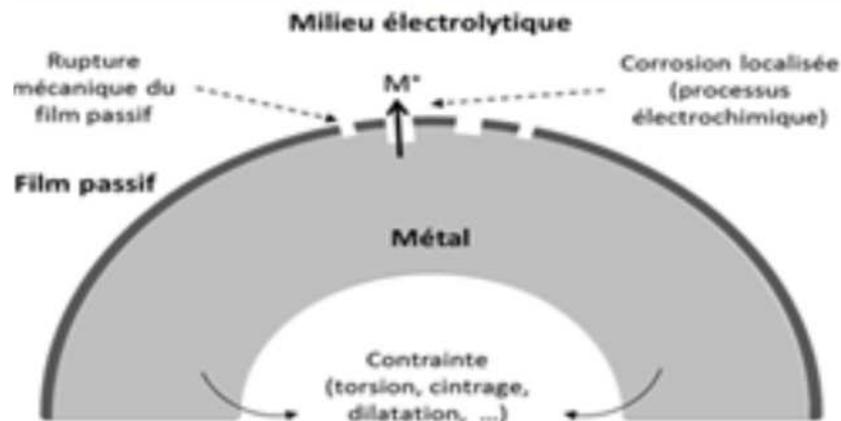


Figure I.11 corrosion sous-contrainte

I-3-4 Moyens de protection contre la corrosion [22]

I-3-4-1 Prévention par une forme adaptée des pièces :

En donnant à l'objet la forme appropriée, le risque de corrosion peut être réduit. Car la forme d'un objet a un impact déterminant sur sa durée de vie. La répartition des contraintes dans une pièce affecte sa sensibilité à la corrosion sous contrainte. Éliminant ainsi la conception de pièces contenant des angles Éviter les concentrations de contraintes telles que les têtes de boulons come dans la figure (I.12)

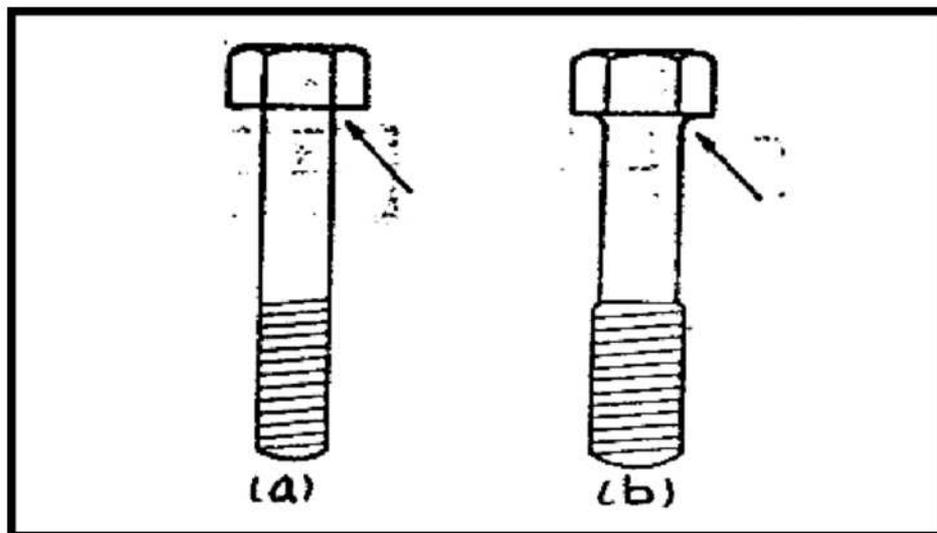


Figure I.12 : Diminution du risque de corrosion sous contrainte d'un boulon

I-3-4-2 Protection électrochimique (active) :

I-3-4-2-1 Protection cathodique [22]:

Chapitre I : Recherche bibliographique sur la projection thermique

Soit en grattant mécaniquement ou bien en absorbant des ions corrosifs tels que Br⁻, Cl⁻, qui dissout la couche de corrosion, grâce à la formation facile de complexes facilement soluble.

Ce type de protection est basé sur la réduction du potentiel de corrosion du métal en appliquant un potentiel suffisamment bas, de façon que la vitesse de corrosion devient négligeable, soit par un contre-courant par la cathode de la pile électrochimique, soit provenant d'une source d'alimentation externe. De plus, le niveau de potentiel doit être maintenu dans des limites pour éviter la dégradation des propriétés mécaniques ou du revêtement. La protection cathodique est surtout utilisée pour protéger les grandes installations de fer, telles que les installations pétrolières offshore, les navires, installations chimiques et lignes de transport souterraines.

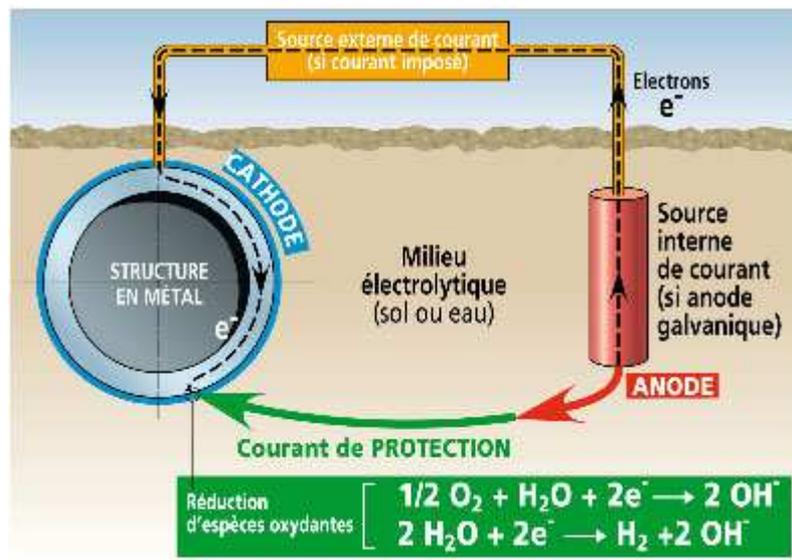


Figure I.13 protection cathodique par courant imposé

I-3-4-2-2 Protection anodique [22]

Le métal peut être protégé contre la corrosion par élévation de son potentiel dans le domaine de passivation, (réalisable par intervention d'une action oxydante ou par intervention d'un courant électrique imposé). La protection anodique est plus difficile à utiliser que la protection Cathode, elle est appliquée uniquement dans des cas particuliers.

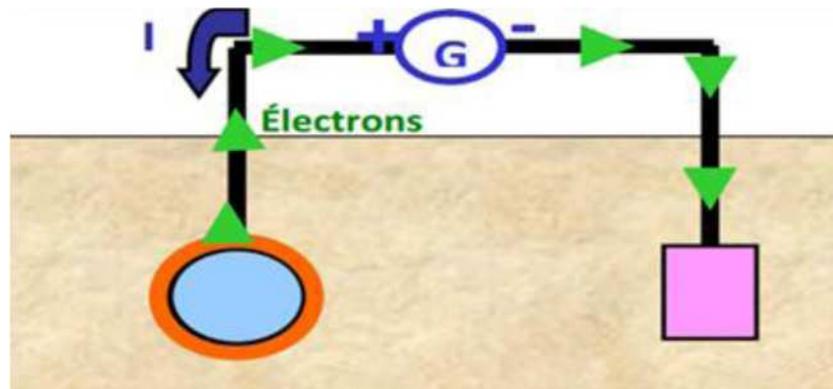


Figure I.14 Protection anodique par courant imposé

I-3-4-3 Prévention par un choix judicieux des matériaux [22]

La méthode d'anticorrosion la plus usuelle, quelles que soient ses formes, se repose sur un choix de matériaux appropriés. Pour choisir un matériau on doit prendre en compte plusieurs facteurs.

- Domaine d'utilisation.
- Nature et niveau des sollicitations mécaniques et thermiques.
- Traitements sélectionnés.
- la disponibilité de matériau et son prix

I-3-4-4 Les Revêtements protecteurs [22]

Le traitement de surface par revêtement est une méthode de plus en plus utilisée. Elle consiste à augmenter les propriétés à la surface par dépôt d'une couche très fine appelée revêtement, qui joue le rôle barrière physique entre le métal et le milieu agressif pour limiter l'intensité globale de la corrosion, d'augmenter la dureté, fournir une protection contre la corrosion ou améliorer les propriétés physiques particulières.

Ce type de revêtement n'offre pas une protection absolue et définitive en raison des défauts susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage. Pour être efficace, le revêtement appliqué doit répondre à certaines spécifications, dont l'adhérence, une bonne résistance aux impacts, une bonne Isolation électrique et stabilité durable de sa composition chimique

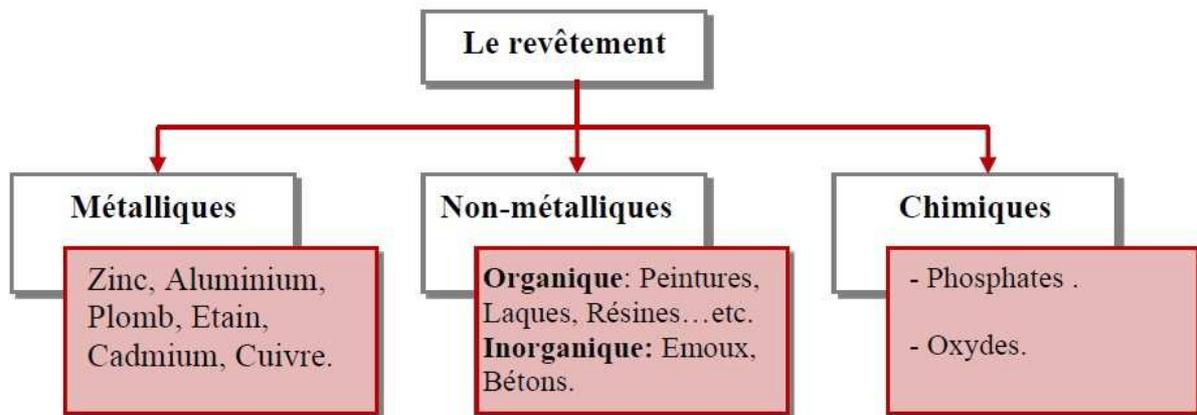


Figure I.15 : Types des revêtements protecteurs

I-3-4-5 Protection d'inhibition [22]

Un inhibiteur de corrosion est donc un produit chimique (molécule organique ou Inorganiques) ajoutés en petites quantités à des environnements corrosifs (généralement milieu liquides et rarement gazeux), qui protège le métal des Corrosion par recouvrement d'une barrière isolante (partielle ou totale) d'un environnement agressif.

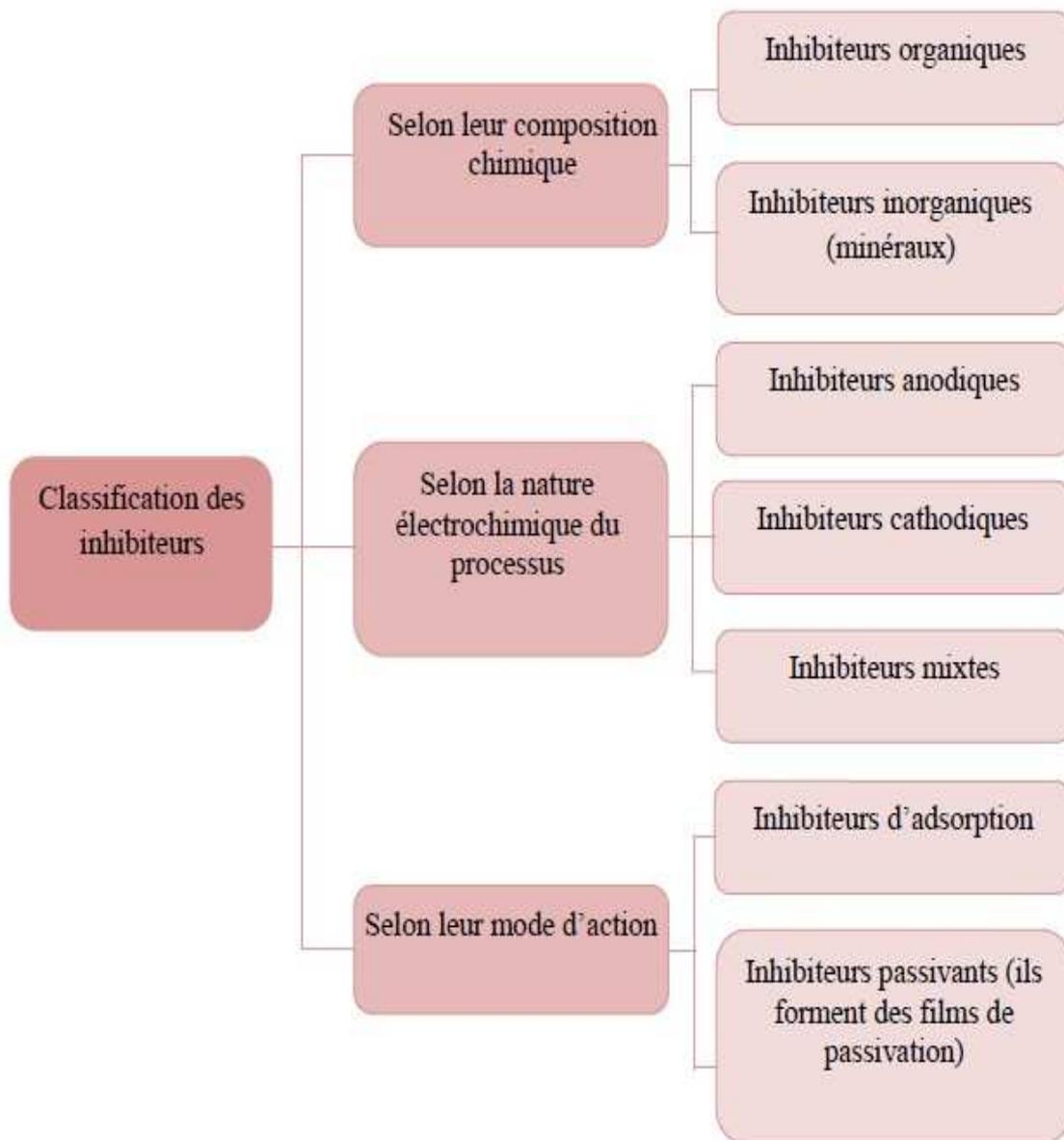


Figure I.16 : Classification des inhibiteurs.

Chapitre II :

Matériaux et techniques

Expérimentales

Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentales

II-1- introduction

Sur une longue période de temps, il existe de nombreux types d'usure, qui peuvent être identifiés comme suit : adhérence, délaminage, usure, corrosion, petites déformations, impact, corrosion et oxydation, usure par diffusion. Cependant, il faut reconnaître qu'en raison de la complexité des phénomènes rencontrés en pratique, il est difficile de déterminer le mécanisme de base.

II-2 matériaux utilisés

II-2-1 le substrat

On a utilisé 3 types d'aciers inoxydables qui diffèrent du pourcentage du Chrome (Cr)

	NE	%C	%Cr	%Ni	%Si	%Mn%	%P	%S
X6CrNi18/8	Z6CN18/8	0.12	16 à 18	6 à 8	1	2	0.04	0.03
X30Cr13	Z30C13	0.3	12 à 14	0	1	1	0.04	0.03
X6CrNi18/8+X30Cr13								

Tableau II.1 : composition chimique des échantillons

NE : normes européenne

II-3- préparation des échantillons

II-3-1- élaboration des échantillons [23]

Les échantillons utilisés pour la projection thermique, ont été usinés 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

Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentales

- Les échantillons élaborés présentent la forme de pions et sont représentés dans la figure II.1

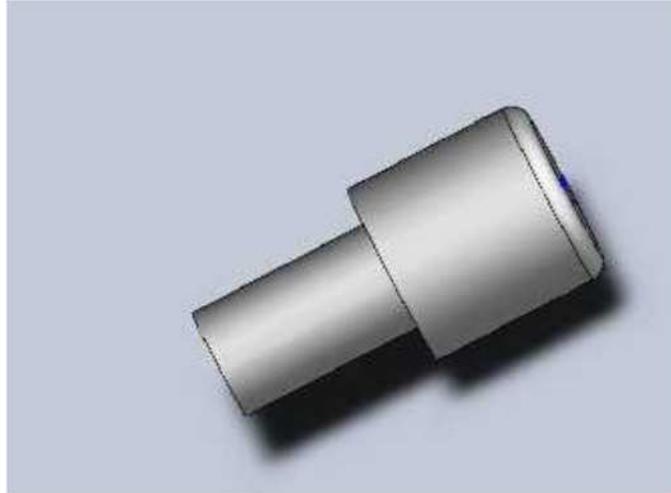


Figure II.1 Echantillon utilisé pour la projection.

II-3-2 traitement thermique a 900°C

Le traitement thermique confère à l'inox des propriétés adaptées à son utilisation, principalement des propriétés mécaniques (ductilité, ténacité et dureté) et une résistance à la corrosion. Le traitement thermique est spécifique à chaque série d'inox.

Pour les aciers inoxydables ferritiques, il convient de distinguer les aciers inoxydables qui restent ferritiques sur toute la plage de température et les aciers inoxydables semi-ferritiques qui forment jusqu'à 30 % d'austénite à chaud ; cette dernière se transforme en martensite lors du refroidissement. De plus, pour les nuances instables ou semi-ferritiques, tout maintien à 900°C à 950°C suivi d'un refroidissement lent peut provoquer une précipitation du carbure de chrome aux joints de grains, le rendant sensible à la corrosion intergranulaire.

II-3-3 préparation des surfaces à revêtir

II-3-3-1 polissage [24]

Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentales

Le polissage est souvent utilisé pour améliorer l'apparence des objets, prévenir la contamination des instruments, éliminer l'oxydation, créer des surfaces réfléchissantes ou prévenir la corrosion des tuyaux. En métallographie et en métallurgie, le polissage est utilisé pour créer des surfaces planes afin d'examiner la microstructure des métaux au microscope.

Le polissage de l'acier inoxydable peut également ajouter aux avantages hygiéniques de l'acier inoxydable.

Nous avons donc utilisé une polisseuse qui était à notre disposition. On pose le papier sur la roue, humidifiée tout le temps de la manipulation; l'eau permet de faire adhérer le papier pendant la rotation, mais aussi de retirer les impuretés qui se détachent de l'acier. Le polissage mécanique est généralement effectué sur la surface relativement plane de l'objet, et une surface très lisse peut être obtenue.

Pour les expériences, Il consiste à abader la surface à l'aide de papiers abrasif de grade progressif (120,400, 600, 800, 1000, 1500,2000). Tout d'abord, nous utilisons du sable grossier pour éliminer la plupart des impuretés, et on finit avec un petit grain afin d'obtenir une pièce d'acier lisse. Le polissage est important pour ne pas fausser les mesures de dureté du métal et l'analyse microscopique.



Figure II.2 Polisseuse a double disque

Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentales

II-3-3-2 dureté HRC [24]

Le test de dureté Rockwell est un test de pénétration mécanique. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs fabriqués à partir de cônes en diamant ou de billes en acier trempé poli. Pour obtenir la valeur de dureté Rockwell, la pénétration résiduelle du pénétrateur avec une petite charge a été mesurée.

Le pénétrateur est d'abord poussé dans l'échantillon avec une pré-force (également appelée précharge) jusqu'à la profondeur de pénétration qui définit le niveau de référence auquel la profondeur de pénétration restante est mesurée, après quoi la mesure sera effectuée.

Ensuite, en appliquant une force d'essai supplémentaire pendant le temps de maintien (quelques secondes) défini dans la norme applicable, le pénétrateur pénètre dans l'échantillon jusqu'à la profondeur de pénétration maximale. La somme de la précharge et de la force d'essai supplémentaire donne la force d'essai totale (également appelée force totale ou charge principale).

Après le temps de maintien, la force d'essai est supprimée et le pénétrateur revient à sa position initiale dans la partie élastique de la profondeur de pénétration par rapport à la force d'essai totale et s'arrête à la profondeur de pénétration restante h (en unités de 0,002 ou 0,001 mm). Cette dernière est également connue sous le nom de différence de profondeur (différence de profondeur de pénétration avant et après l'application de la force d'essai totale). La profondeur de pénétration résiduelle h est ensuite utilisée pour calculer la dureté Rockwell (HR) à l'aide de l'échelle Rockwell utilisée selon la formule définie dans la norme.



Figure II.3 Un duromètre type Rockwell

II-3-4 microscope métallographique

La métallographie est la technique de détermination de la microstructure des métaux en les observant au microscope optique. Il est ainsi possible de déterminer la nature de la structure, la répartition des phases, la taille et la forme des grains, la nature et la teneur des inclusions, la présence d'éventuels traitements thermiques, la direction des lignes de glissement, dans le cas de déformations de l'échantillons ou de traitements de surface [25]. Une simple observation d'un objet métallique ne donnera aucune information précise autre que l'état de surface.



Figure II.4 Microscope métallographique

Chapitre III :

Résultats et discussions

Chapitre III : Résultats et discussions

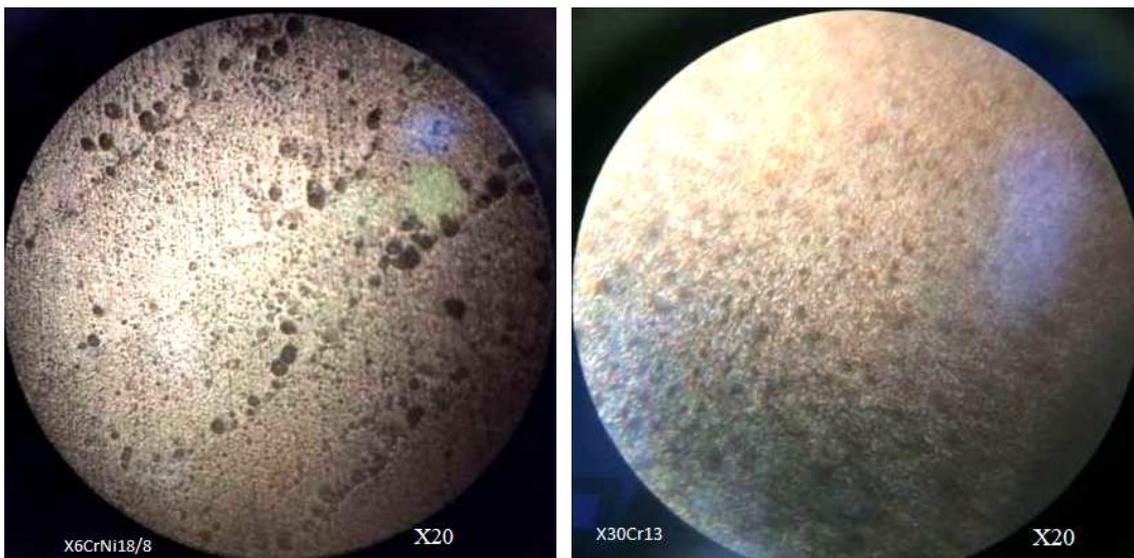
III-1 Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera d'abord l'observation micrographique des dépôts en aciers inoxydables non traités et traités à 9000°C par le microscope optique. Ensuite, on présentera une caractérisation mécanique basée sur les mesures de dureté et en dernier lieu on présentera les résultats des tests de corrosion.

III-2 Analyse microstructurale au MO

III-2-1 Microstructures des dépôts X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8+ X30Cr13 non traités avant le test de corrosion

La microscopie optique nous a permis de mieux observer l'état de surface des trois échantillons non traités. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (III.1).



Chapitre III : Résultats et discussions



Figure III.1 : images microscopiques des échantillons non traités avant le test de corrosion

On remarque :

La présence des zones poreuses sur la surface des trois échantillons. Des pores plus gros et plus denses sur l'échantillon X6CrNi18/8+X30Cr13, de gros pores mais moins denses sur l'échantillon X6CrNi18/8 alors que l'échantillon X30Cr13 contient des pores moins gros et moins denses par rapport aux 2 autres échantillons.

Chapitre III : Résultats et discussions

III-2-2 1 Microstructures des dépôts X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8+ X30Cr13 traités avant le test de corrosion:

La microscopie optique nous a permis de mieux observer l'état de surface des trois échantillons traités thermiquement à 900°C. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (III.2).

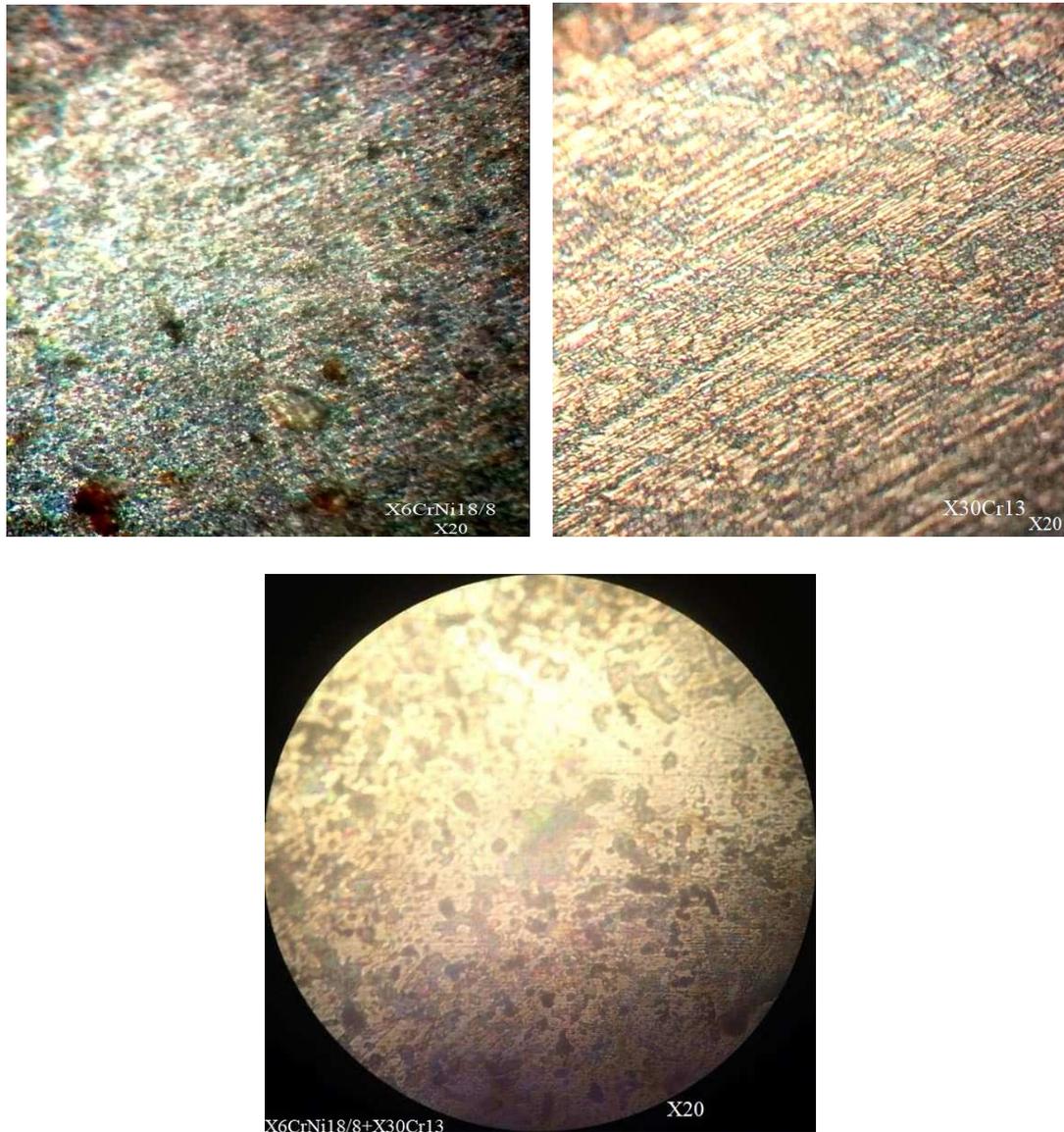


Figure III.2 : images microscopiques des échantillons traités avant le test de corrosion

Après avoir traité thermiquement les trois échantillons à 900° C, on constate une diminution de la porosité sur l'ensemble des 3 échantillons. Cette disparition de porosités est remarquée d'une manière partielle sur l'échantillon X6CrNi18/8 et d'une manière totale sur l'échantillon X30Cr13 tandis que sur l'échantillon X6CrNi18/8+X30Cr13 on remarque que les particules

Chapitre III : Résultats et discussions

poreuses sont encore présentes mais moins dense et cela est dû au phénomène de colmatage favorisé par le post-traitement.

III-3 caractérisation mécanique

III-3-1 essai de dureté HRC :

Dans ce qui suit, on présentera les histogrammes illustrant l'évolution de la dureté en fonction des différents dépôts réalisés en aciers inoxydables traités et non traités

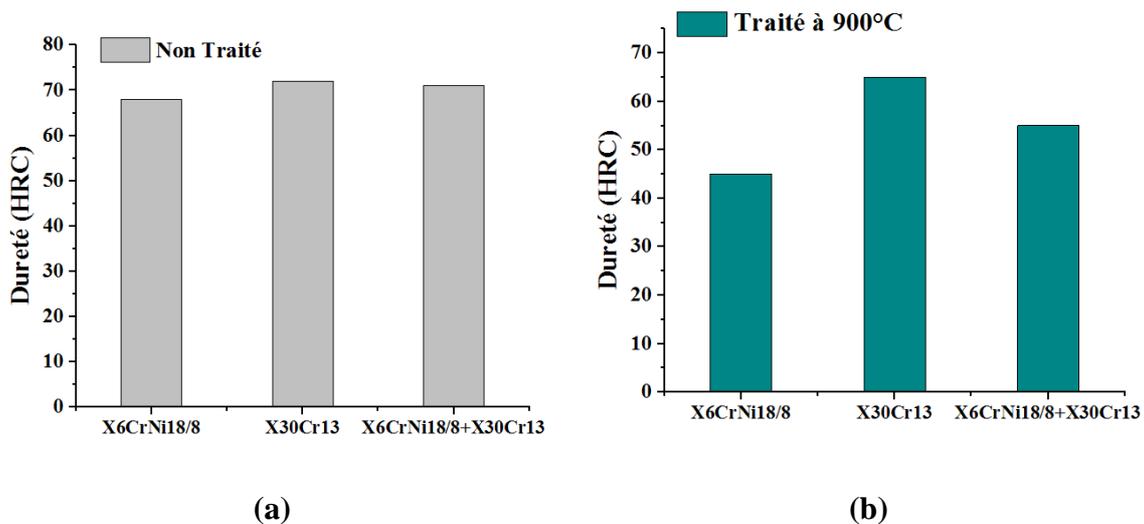


Figure III.3 : représentation en histogramme des résultats des essais de dureté

A travers ces histogrammes, on remarque ce qui suit:

- Sans le traitement thermique, la dureté (HRC) de l'échantillon X30Cr13 est la plus élevée que celle des 2 autres échantillons tandis que celle de l'échantillon X6CrNi18/8 est la plus basse

Avec le traitement thermique à 900° C, la dureté (HRC) de l'échantillon X30Cr13 est la plus élevée que celle des 2 autres échantillons tandis que celle de l'échantillon X6CrNi18/8 est la plus basse.

Et on remarque aussi que la dureté HRC des échantillons non traités thermiquement est plus élevée que celle des échantillons traités thermiquement à 900° C et cela est dû à la disparition totale et partielle des particules poreuses sur les échantillons traités thermiquement à 900°C.

Chapitre III : Résultats et discussions

III-4 Caractérisation électrochimique :

III-4-1 comportement des revêtements vis-à-vis de la corrosion :

Dans ce qui suit, les échantillons ont été immergés dans l'eau de mer synthétique avec une concentration de NaCl à 3% pendant 1 jour, 5 jours, 10 jours, 15 jours et 20 jours. A la fin de chaque immersion, on relèvera la perte de masse relative. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes pour les trois types de dépôts non traités et traités à 900°C.

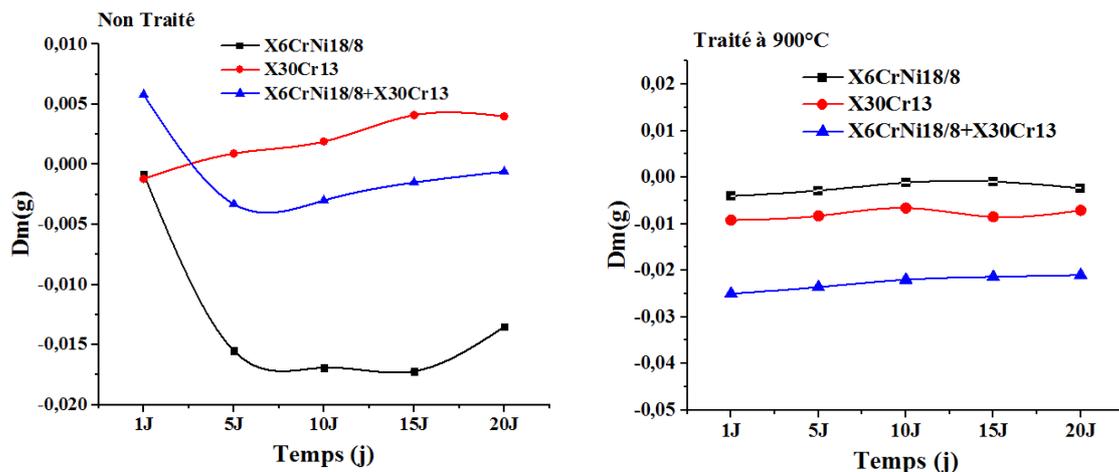


Figure III.4 : Courbe montrant la variation du Dm en fonction du Temps des dépôts non traités et traités

Cette courbe montre l'évolution de la perte et/ou gain de masse des 6 échantillons en fonction du temps. L'immersion des différents échantillons dans la solution marine nous a permis d'évaluer la perte et/ou gain de masse de chaque échantillon sous l'influence du phénomène de corrosion :

Pour le dépôt non traité, on remarque qu'il possède un comportement moins stable en fonction de temps. La perte et/ou gain de masse se fait de manière rapide et irrégulière

Pour le dépôt traité à 900°C, on remarque une croissance de la masse en fonction de temps et qui se fait de manière stable et régulière.

III-4-2 Variation de la masse des dépôts X6CrNi18/8 :

Chapitre III : Résultats et discussions

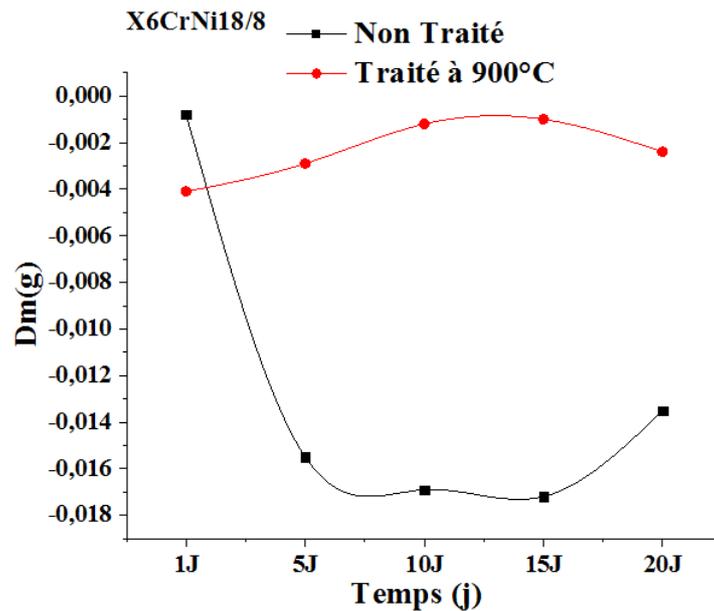


Figure III.5 : courbe montrant la variation du Dm en fonction du Temps des dépôts X6CrNi18/8 non traités et traités

Après avoir immergé les 2 échantillons dans la solution marine, on peut observer qu'entre le 1^{er} et le 15^{em} jour, une perte de masse pour l'échantillon non traité thermiquement (perte de masse de manière considérable entre le 1^{er} et le 5^{em} jour). Par contre on observe un gain de masse pour l'échantillon traité thermiquement à 900° C. De ce constat, on peut dire que le phénomène de corrosion a eu une influence différente sur la masse des 2 échantillons.

Et entre le 15^{ème} et le 20^{ème} jour, on observe un gain de masse pour l'échantillon non traité thermiquement tandis que l'échantillon traité thermiquement à 900 C a perdu en masse.

III-4-3 Variation de la masse des dépôts X30Cr13 :

Chapitre III : Résultats et discussions

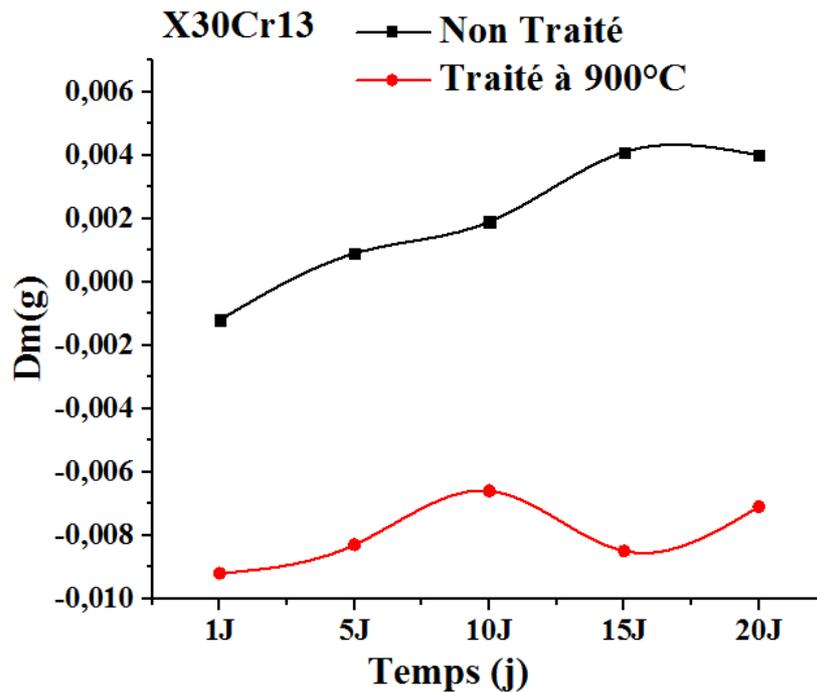


Figure III.6 : Courbe montrant la variation du Dm en fonction du Temps des dépôts X30Cr13 non traités et traités

Après avoir immergé les deux échantillons dans la solution marine, on peut observer qu'entre le 1^{er} et le 10^{ème} jour un gain de masse pour les 2 échantillons mais de manière plus considérable pour l'échantillon non traité thermiquement.

Entre le 10^{ème} et le 15^{ème} jour, il y'a un gain de masse de manière considérable pour l'échantillon non traité thermiquement tandis que l'échantillon traité thermiquement à 900 C a perdu considérablement en masse

Entre le 15^{ème} et le 20^{ème} jour, on remarque une petite perte de masse pour l'échantillon non traité thermiquement alors que l'échantillon traité thermiquement à 900 C a gagné considérablement en masse

Donc peut dire qu'ici aussi la corrosion a influé de manière différente sur la masse des 2 échantillons.

III-4-4 Variation de la masse des dépôts X6CrNi18/8 + X30Cr13 :

Chapitre III : Résultats et discussions

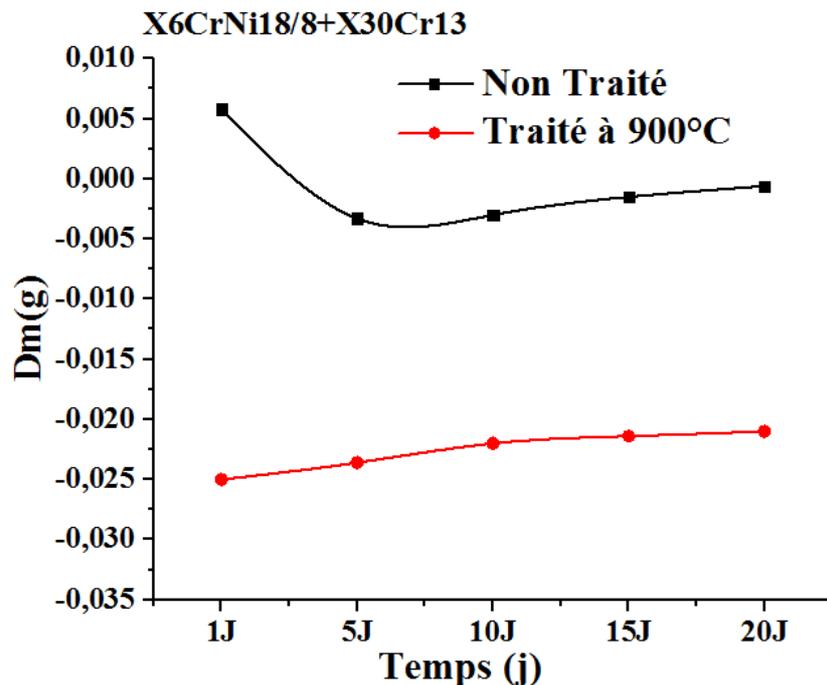


Figure III.7 : représentation graphique de la variation du D_m en fonction du Temps des échantillons X6CrNi18/8 + X30Cr13 non traités et traités

Après avoir immergé les 2 échantillons dans la solution marine, on peut observer qu'entre le 1^{er} et le 5^{ème} jour, une perte de masse considérable pour l'échantillon non traité thermiquement tandis que l'échantillon traité thermiquement à 900 C a un peu gagné en masse

Entre le 5^{ème} le 20^{ème} jour on remarque un gain de masse de manière lente et peu considérable par rapport aux 5 premiers jours pour l'ensemble des 2 échantillons. Donc la corrosion a influé de manière différente sur la masse des 2 échantillons.

III-5 Microstructures des dépôts X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8+ X30Cr13 traités et non traités après le test de corrosion:

Chapitre III : Résultats et discussions

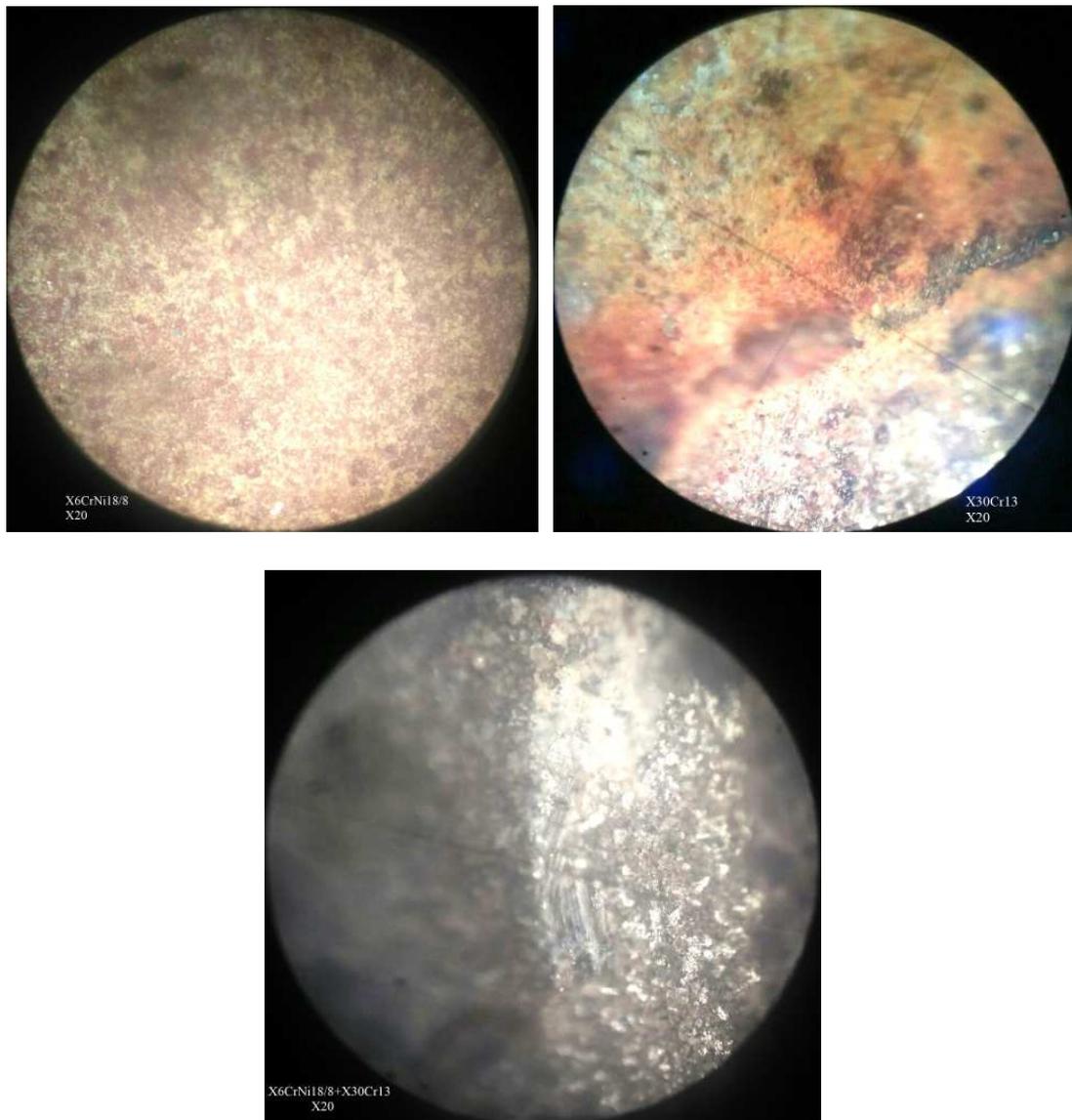


Figure III.8 : Images micrographiques des dépôts non traités après le test de corrosion

Chapitre III : Résultats et discussions

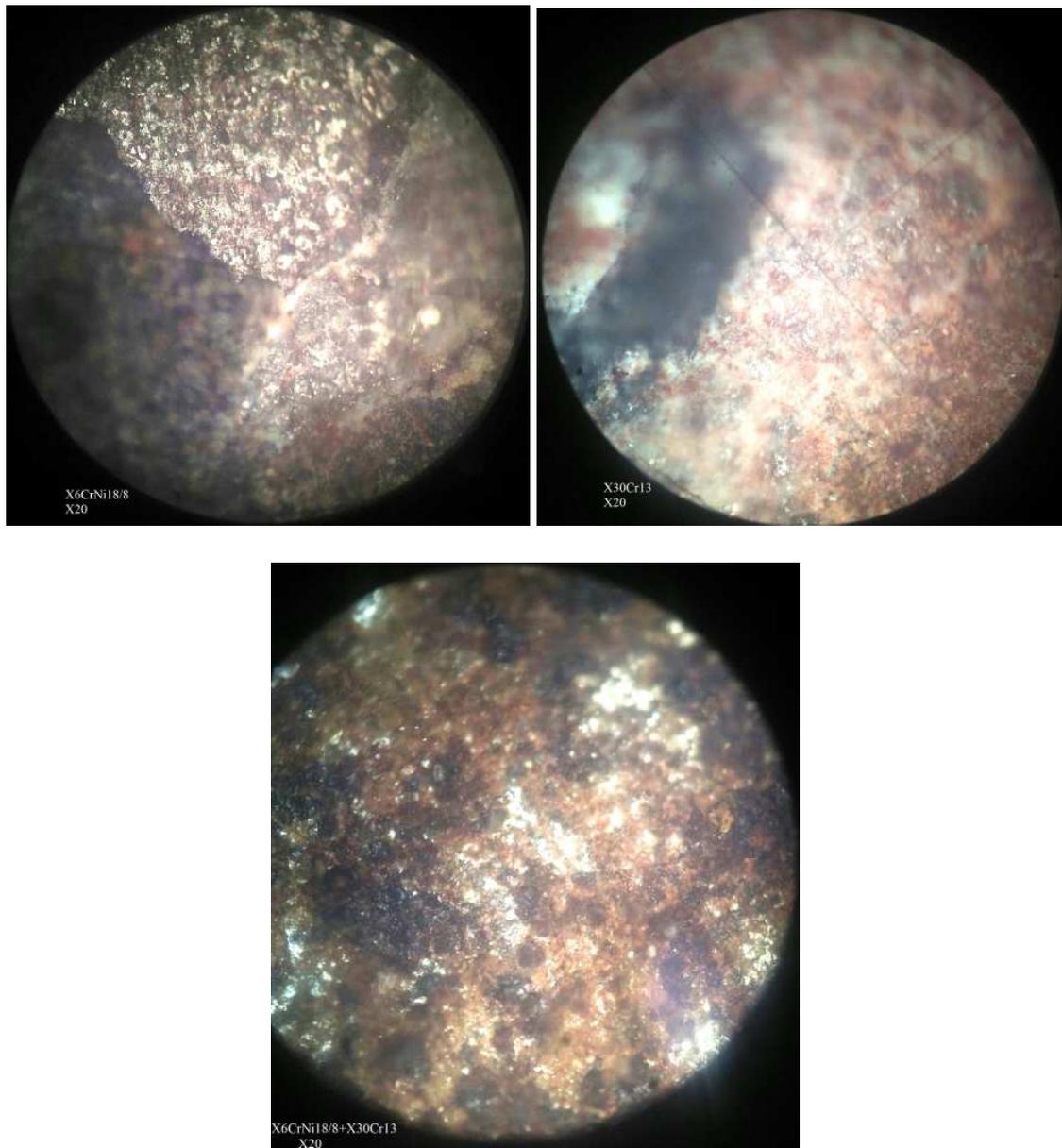


Figure III.9 : Images micrographiques des dépôts traités après le test de corrosion

La figure (III.8) et la figure (III.9) nous montrent que la couche d'oxyde protectrice (l'oxyde de chrome) des échantillons traités à 900°C semblent être très denses ayant une croissance rapide en fonction du temps, tandis que la densité de la couche d'oxydation (l'oxyde de fer II) des échantillons non traités est moins dense, et les échantillons non traités présentent une densité de la couche d'oxyde protectrice (l'oxyde de chrome) faible par rapport aux échantillons traités à 900°C.

Chapitre III : Résultats et discussions

On constate que les échantillons traités à 900°C présentent une couche d'oxyde protectrice adhérente et devenue dense et à croissance par rapport au non traités qui est faible et lente en fonction du temps.

Conclusion générale

Conclusion générale

La technique de projection thermique est une technique de pointe dans la réalisation de couches protectrices. La création d'un revêtement sur une surface d'une pièce permet bien souvent d'améliorer quelques propriétés comme la protection contre la corrosion.

Notre travail se porte sur une étude comparative du comportement mécanique et électrochimique des trois revêtements en aciers inoxydables déposés sur un substrat en acier doux de type E335 par la technique de la projection thermique

X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8 + X30Cr13 traités à 900° C et d'autres non traités.

Les principaux résultats obtenus sont comme suite :

- La caractérisation par microscope optique, a mis en évidence le rôle de la nouvelle morphologie obtenue après traitement thermique dans l'amélioration des propriétés électrochimiques pour 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 de corrosion nous a montré que :

-L'application du post traitement thermique permet également d'améliorer la résistance à la corrosion

- Le dépôt traité à 900°C présente un comportement protecteur dans le milieu d'eau de mer.

- Le dépôt traité à 900°C présente une dureté plus considérable que celle de dépôt sans traitement.

Annexes

Références bibliographiques

- [1] R.W .Smith, R .Novak, Advances and application in us thermal spray Technologie and Materials,
- [2] Powder Metallurgy international.« 100 years of thermal spray: About the inventor Max Ulrich Schoop », *Surface and Coatings Technology*, vol. 220, 15 avril 2013, p. 3–13
- [3] C. Abert, Thermisches Spritzen 100 Jahre M.U. Schoop, Association suisse pour la technique du soudage SVSXASS, (2009).
- [4] R.R. John, W.L. Bade, *Journal of the American Rocket Society*, J4 31, (1961)
- [5] G. Giannini, A Ducati, Plasma stream apparatus and method, US Patent 2 922 869, (1960)
- [6] R.M. Gage, O.H. Nestor, D.M. Yenni, Collimated Electric Arc Powder Deposition Process, U.S. Patent 3 016 477, (1962)
- [7] H. Gerdien, A. Lotz, *Wiss. Veroffentlichungen Siemenswerk* 2, 489, (1922)
- [8] Pawlowski, Lech., *Dépôts physiques : techniques, microstructures et propriétés*, Lausanne/Paris, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003, 305 p.
- [9] S. Narouzi, contribution à l'étude du procédé arc –fil pour la réalisation de dépôts Métalliques durs résistants à l'usure abrasive. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, (2004).
- [10] K. Belkacem, élaboration par projection plasma d'arc de dépôts de Zircone et d'Alumine croissance colonnaire, contraintes résiduelles et modélisation. Thèse de doctorat, Université de Limoges, France.

Références bibliographiques

[11] M. Vardelle, Etude de la structure des dépôts d'alumine obtenus par projection plasma en fonction des températures et des vitesses des particules au moment de leur impact sur la cible, Thèse de troisième cycle, Université de Limoges, France.

[12] S. Valette, Influence de la pré-oxydation d'un acier sur l'adhérence de son revêtement en alumine Déposé par voie plasma thermique, Thèse de doctorat, Université de Limoges, France (2004).

[13] M. Khalid Fataouiz, "Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique", Thèse de Doctorat, Université Chouaib Doukkali El-Jadida, Maroc, (2007).

[14] J. Deruelle, Préparation des surfaces – Introduction Techniques de l'ingénieur M1435

[15] R. Jules, études des problèmes dynamiques de contact et de frottement. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France.

[16] M. Vardelle, S. Bousard, P. Fauchais, C. Bossoutrou, F. Braillard, Laboratoire Sciences des Procédés et de Traitements de Surfaces (SPCTS), UMR-CNRS 6638. Journée Scientifique barrière thermique ONERA. Limoges, France. (2002).

[17] R. Gheriani, Influence de la projection de phases dans le domaine de températures (400°C - 1000°C) sur des films de Ti et de Cr, déposé sur des substrats aciers, Thèse de doctorat, Université de Constantine (2005).

[18] G.Zambelli, L.Vincent, Matériaux et Contacts – une approche tribologique, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Références bibliographiques

- [19] Sassoulas (H.). – Guide de choix des traitements thermiques des aciers inoxydables. M 1 160, traité Matériaux métalliques (1997).
- [20] Colombié (M.). – Aciers inoxydables. M 320, traité Matériaux métalliques (1991).
- [21] Baroux (B.), Orlandi (M.C.) et Maitrepierre (PH.). – Sensitization of continuously cooled austenitic stainless steels. Metals technology, vol. 11, p. 378-382, sept. 1984.
- [22] Haimer Siham, La synthèse d'un inhibiteur de corrosion et l'étude de son effet sur l'acier X42 dans un milieu aqueux. Mémoire Master université de Biskra (2019)
- [23] Bounekta Fares ,Soualmi Mohand-Ameziane, étude tribologique et thermique d'un contact glissant entre dépôt a base de nickel réalisé par projection thermique et disque en acier. Mémoire de Master Université de Bejaia (2018).
- [24] Liu Jaming, modification des propriétés mécaniques d'un acier inoxydable par laminage et traitement thermique ,INSA Rouen Normandie (2017).

Résumé

Résumé :

La technologie de rechargement par projection thermique fournit aux pièces mécaniques, des revêtements métalliques divers. Le revêtement obtenu par la projection thermique est largement utilisée pour modifier les propriétés physiques, chimiques et mécanique des surfaces de pièces industrielles.

Ce travail s'intéresse à l'effet du post-traitement sur la dureté et la résistance à la corrosion du premier dépôt traité par projection thermique à 900°C et sur la dureté et la résistance a la corrosion du second dépôt non traité thermiquement des aciers inoxydables X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8+ X30Cr13.

Mots clés : projection thermique, acier inox, dureté, corrosion

Abstract:

Thermal spray coating technology provides mechanical parts with various metallic coatings. The coating obtained by thermal spraying is widely used to modify the physical, chemical and mechanical properties of industrial parts surfaces.

This work focuses on the effect of post-treatment on the hardness and corrosion resistance of the first deposit treated by thermal spraying at 900°C and on the hardness and corrosion resistance of the second non-thermally treated deposit of stainless steels X6CrNi18/8, X30Cr13 and X6CrNi18/8+ X30Cr13.

ملخص

توفر تقنية الرش الحراري طلاءات معدنية مختلفة للأجزاء الميكانيكية. يستخدم الطلاء الذي يتم الحصول عليه عن طريق الرش الحراري على نطاق واسع لتعديل الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية لأسطح الأجزاء الصناعية

ويتعلق هذا العمل بتأثير المعالجة اللاحقة على الصلابة ومقاومة التآكل لأول ترسب يعالج بالبرذاذ الحراري عند 900 درجة مئوية وعلى صلابة ومقاومة التآكل للترسب الثاني غير المعالج المعالج بالحرارة من الفولاذ المقاوم للصدأ X6CrNi18/8 و X30Cr13 و X6CrNi18/8 + X30Cr13

Annexes

Annexe

Résultats obtenus par l'essai de corrosion pour les aciers non traités aux files des jours

M_0 (X6CrNi18/8) = 8,7588 g

M_0 (X30Cr13) = 8,4246 g

M_0 (X6CrNi18/8 + X30Cr13) = 8,3094 g

	M0	$\Delta M1(24h)$	$\Delta M2(5j)$	$\Delta M3(10j)$	$\Delta M4(15j)$	$\Delta M5(20j)$
X6CrNi18/8	8,7588	-0,0008	-0,0155	-0,0169	-0,0172	-0,0135
X30Cr13	8,4246	-0,0012	0,0009	0,0019	0,0041	0,004
X6CrNi18/8 + X30Cr13	8,3094	0,0058	-0,0033	-0,003	-0,0015	-0,0006

Résultats obtenus par l'essai de corrosion pour les aciers traités aux files des jours

M_0 (X6CrNi18/8) = 7,8368 g

M_0 (X30Cr13) = 8,1655 g

M_0 (X6CrNi18/8 + X30Cr13) = 8,6762 g

	M0	$\Delta M1(24h)$	$\Delta M2(5j)$	$\Delta M3(10j)$	$\Delta M4(15j)$	$\Delta M5(20j)$
X6CrNi18/8	7,8368	-0,0041	-0,0029	-0,0012	-0,001	-0,0024
X30Cr13	8,1655	-0,0092	-0,0083	-0,0066	-0,0085	-0,0071
X6CrNi18/8 + X30Cr13	8,6762	-0,025	-0,0236	-0,022	-0,0214	-0,021

Résultats obtenus par l'essai de dureté pour les aciers traités et non traités

F= 981 N

	Aciers non traités	Acier traités
X6CrNi18/8	68	45
X30Cr13	72	65
X6CrNi18/8 + X30Cr13	71	55

Annexe

Résumé

Résumé :

La technologie de rechargement par projection thermique fournit aux pièces mécaniques, des revêtements métalliques divers. Le revêtement obtenu par la projection thermique est largement utilisée pour modifier les propriétés physiques, chimiques et mécanique des surfaces de pièces industrielles.

Ce travail s'intéresse à l'effet du post-traitement sur la dureté et la résistance à la corrosion du premier dépôt traité par projection thermique à 900°C et sur la dureté et la résistance a la corrosion du second dépôt non traité thermiquement des aciers inoxydables X6CrNi18/8, X30Cr13 et X6CrNi18/8+ X30Cr13.

Abstract:

Thermal spray coating technology provides mechanical parts with various metallic coatings. The coating obtained by thermal spraying is widely used to modify the physical, chemical and mechanical properties of industrial parts surfaces.

This work focuses on the effect of post-treatment on the hardness and corrosion resistance of the first deposit treated by thermal spraying at 900°C and on the hardness and corrosion resistance of the second non-thermally treated deposit of stainless steels X6CrNi18/8, X30Cr13 and X6CrNi18/8+ X30Cr13.

ملخص

توفر تقنية الرش الحراري طلاءات معدنية مختلفة للأجزاء الميكانيكية. يستخدم الطلاء الذي يتم الحصول عليه عن طريق الرش الحراري على نطاق واسع لتعديل الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية لأسطح الأجزاء الصناعية

ويتعلق هذا العمل بتأثير المعالجة اللاحقة على الصلابة ومقاومة التآكل لأول ترسب يعالج بالرش الحراري عند 900 درجة مئوية وعلى صلابة ومقاومة التآكل للترسب الثاني غير المعالج المعالج بالحرارة من الفولاذ المقاوم للصدأ X6CrNi18/8 وX30Cr13 وX6CrNi18/8 + X30Cr13