

**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 : CONSTRUCTION MÉCANIQUE

PAR :

**HAMDOUCHE HOCINE**

**DJENANE ADEL**

## Thème

---

**Etude électrochimique des dépôts en acier inoxydable 18-8 obtenu  
par la technique de projection thermique.**

---

Le 25/06/2019 Devant le jury composé de:

Président : Pr BRADAI Med Amokrane

Rapporteur : Dr YOUNES R

Examineur : Dr AMARI Dj

Examineur (invité) : Mr IDIR

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019

# 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 vont à Mr 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 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. Pr. Bradai en tant que Président de jury, et aussi Mr Amari et Mr Idir les examinateurs.*

*Sans oublier l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia, l'équipe d'Algérie Métallisation.*

*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*

*On dédie ce mémoire aux personnes qui nous sont les plus chers :*

*À mon père, la plus belle marque de reconnaissance et d'encouragement que je puisse lui offrir est ma réussite.*

*À ma très chère mère l'être le plus noble qui a sacrifié les plus belles années de sa vie.*

- *À mes très chers parents.*
- *À nos sœurs.*
- *À nos frères.*
- *À nos tantes.*
- *À tous les membres de nos familles.*
- *À nos meilleures amies.*
- *À tous les camarades de notre section.*
- *Enfin nous dédions notre travail à A. TASSADIT ET H. EL-MNAOUR, FATIHA.*

***H.HOCINE***

# Dédicace

*On dédie ce mémoire aux personnes qui nous sont les plus chers :*

*À mon père, la plus belle marque de reconnaissance et d'encouragement que je peux lui offrir est ma réussite.*

*À ma très chère mère l'être le plus noble qui a sacrifié les plus belles années de sa vie.*

- *À mes meilleurs amis.*
- *À mes sœurs.*
- *À mes frères.*
- *À tous les membres de mes familles.*
- *À tous mes camarades.*
- *Enfin je dédie ce travail à Mounia*

*D. Adel*

# ***SOMMAIRE***

## Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Elément bibliographiques</b>	
<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Historique .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3. Principe de la projection thermique .....</b>	<b>4</b>
<b>I.4. Différents types de procédés de projection thermique .....</b>	<b>5</b>
I.4.1. Projection par arc électrique entre deux fils .....	5
I.4.2. Projection flamme .....	6
I.4.3. Projection HVOF/HVAF .....	7
I.4.4. Projection par plasma .....	8
I.4.5. Projection arc-fil .....	9
<b>I.5. Paramètres de projection influant sur le dépôt .....</b>	<b>11</b>
<b>I.6. Préparation des surfaces .....</b>	<b>12</b>
I.6.1. La propreté de la surface .....	12
I.6.2. La rugosité .....	13
I.6.3. Le préchauffage .....	13
<b>I.7. Les Modes de préparation .....</b>	<b>13</b>
I.7.1. Le dégraissage .....	13
I.7.2. Le décapage .....	14
I.7.3. Le sablage .....	14
<b>I.8. Formation et structure d'un dépôt réalisé par projection thermique .....</b>	<b>15</b>
I.8.1. Microstructure .....	15
<b>I.9. Les aciers inoxydables .....</b>	<b>16</b>
I.9.1. Définition des aciers inoxydables .....	16
I.9.2. Système fer-chrome .....	17
I.9.3. Classes des aciers inoxydables .....	18
I.9.3.1. Aciers martensitiques .....	18
I.9.3.2. Aciers ferritiques .....	19
I.9.3.3. Aciers inoxydables austénitiques .....	19

---

## Sommaire

---

I.9.3.4. Aciers inoxydables austéno-ferritiques .....	19
I.9.4. Propriétés physicochimiques des inox .....	20
I.9.5. Influence des éléments d'Alliage .....	21
I.9.6. L'utilisation des aciers inoxydables .....	22
<b>I.10. La Corrosion .....</b>	<b>22</b>
I.10.1. Introduction .....	22
I.10.2. Définition de corrosion .....	23
I.10.3. Processus de corrosion .....	23
I.10.4. Morphologie de la corrosion .....	26
I.10.4.1. La corrosion uniforme ou généralisée .....	26
I.10.4.2. Corrosion localisée .....	27
I.10.5. L'eau de mer .....	31
I.10.5.1. L'environnement marin .....	31
I.10.5.2. Les caractéristiques de l'eau de mer .....	32
I.10.6. Mécanisme de la réaction de corrosion électrochimique .....	34
I.10.6.1. Réaction partielle cathodique .....	34
I.10.6.2. Réaction partielle anodique .....	34
I.10.7. Techniques électrochimiques .....	35
I.10.7.1. La Voltamétrie .....	35
I.10.7.2. Chronoampérométrie .....	36

## **Chapitre II : Matériels et techniques expérimentales**

<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>II.2. Matériaux utilisé .....</b>	<b>38</b>
II.2.1. Le substrat .....	38
II.2.2. Dépôts réalisés .....	38
<b>II.3. Traitements thermiques .....</b>	<b>38</b>
<b>II.4. Caractéristique des dépôts .....</b>	<b>40</b>
<b>II.5. Présentation des échantillons .....</b>	<b>41</b>
II.5.1. Elaboration des échantillons .....	41
II.5.2. préparation des surfaces à revêtir .....	41

---

# Sommaire

---

II.5.2.1. Dégraissage .....	42
II.5.2.2. Sablage .....	42
<b>II.6. Réalisation des dépôts .....</b>	<b>42</b>
II.6.1. Paramètre de projection .....	42
II.6.2. Procédé d'élaboration des revêtements par la projection arc-électrique .....	43
II.6.3. Caractérisation microstructurale .....	44
II.6.4. Le polissage mécanique .....	44
<b>II.7. Observation métallographique .....</b>	<b>45</b>
II.7.1. Diffraction des rayons X .....	45
II.7.2. Métallographique .....	46
<b>II.8. Caractérisation électrochimique .....</b>	<b>46</b>
II.8.1. L'électrode de travail .....	47
II.8.2. L'électrode de référence .....	47
II.8.3. L'électrode auxiliaire .....	47
II.8.4. Milieu d'essai .....	48
<b>II.9. Méthode d'étude électrochimique .....</b>	<b>48</b>
II.9.1. Polarisation potentiodynamique .....	48
II.9.2. Procédure d'oxydation .....	49
<b>II.10. Test d'usure .....</b>	<b>49</b>
II.1.10.1 Principe du teste d'usure .....	49
II.1.10.2. La perte de masse relative .....	49
II.1.10.3. Représentation du dispositif d'usure .....	50
II.1.10.4. Optimisation et réalisation du test d'usure .....	50

## **chapitre III : Résultats et discussions**

<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>52</b>
<b>III.2. Analyse structurale par diffraction des rayons X .....</b>	<b>52</b>

---



## Sommaire

---

<b>III.3. Perte de masse des deux dépôts (test d'usure) .....</b>	<b>53</b>
III.3.1. Graphes des Dépôts sans traitement thermique (ST) .....	54
III.3.2. La Microstructure des dépôts sans traitement thermique (ST).....	56
III.3.3. Dépôts traité à 950°C .....	58
III.3.4. La Microstructure des dépôts traités à une température de 950°C .....	60
<b>III.4. Morphologie de la corrosion .....</b>	<b>62</b>
III.4.1. Métallographie des deux dépôts .....	62
<b>III.5. Les courbes anodique et cathodique.....</b>	<b>71</b>
III.5.1. La courbe anodique.....	71
III.5.2. La <b>courbe cathodique</b> .....	72
<b>III.6. La courbe de Tafel.....</b>	<b>73</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>76</b>

---

***LISTE***

***DES***

***FIGURES***

## *Liste des figures*

---

<b>Figure I.1 :</b>	Schéma simplifié du principe de la projection thermique .....	5
<b>Figure I.2 :</b>	Schéma de principe de la projection à l'arc électrique .....	6
<b>Figure I.3 :</b>	Projection flamme .....	7
<b>Figure I.4 :</b>	Principe de la projection HVOF .....	8
<b>Figure I.5 :</b>	Schéma de principe d'une torche à plasma d'arc .....	9
<b>Figure I.6 :</b>	Schéma de principe d'un dispositif de projection à arc électrique .....	10
<b>Figure I.7 :</b>	Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique .....	15
<b>Figure I.8 :</b>	diagramme d'équilibre de phase de système fer-chrome.....	17
<b>Figure I.9 :</b>	Schéma de principe de corrosion sèche.....	24
<b>Figure I.10 :</b>	Schéma de principe de corrosion électrochimique.....	25
<b>Figure I.11 :</b>	Schéma de principe de corrosion uniforme.....	27
<b>Figure I.12 :</b>	Schéma de principe de corrosion localisée.....	27
<b>Figure I.13 :</b>	Les différents types de la corrosion localisée.....	28
<b>Figure I.14 :</b>	Schéma de principe de corrosion galvanique.....	29
<b>Figure I.15 :</b>	Corrosion par piqûres d'un acier inoxydable.....	30
<b>Figure I.16 :</b>	Corrosion intergranulaire d'un acier inoxydable.....	30
<b>Figure I.17:</b>	Étapes réactionnelles lors de la corrosion d'un métal en milieu liquide.....	34
<b>Figure I.18 :</b>	L'allure générale de la courbe voltampérométrique et ses grandeurs Caractéristiques.....	36
<b>Figure I.19 :</b>	Schéma théorique de la courbe courant-temps pourLa germination tridimensionnelle.....	37
<b>Figure II.1:</b>	mode opératoire d'un traitement thermique.....	39
<b>Figure II.2 :</b>	Echantillon utilisé pour la projection.....	41
<b>Figure II.3 :</b>	Pistolet arc-électrique.....	44
<b>Figure II.4:</b>	la polisseuse mécanique.....	45
<b>Figure II.5 :</b>	Microscope optique.....	46

## *Liste des figures*

---

<b>Figure II.6 :</b>	Dispositif de mesure d'une courbe de polarisation potentiodynamique.....	47
<b>Figure II.7 :</b>	Procédure d'oxydation.....	49
<b>Figure II.8 :</b>	Représentation du dispositif d'usure utilisé.....	50
<b>Figure II.9 :</b>	Thermomètre Laser.....	51
<b>Figure II.10 :</b>	Balance analytique.....	51
<b>Figure III.1 :</b>	Spectre de diffraction de l'acier inox 18-8.....	52
<b>Figure III.2 :</b>	Perte de masse en fonction du temps (5N).....	54
<b>Figure III.3 :</b>	Perte de masse en fonction du temps (30N).....	55
<b>Figure III.4 :</b>	Microstructure des dépôts sans traitement thermique après l'essai de l'usure...	56
<b>Figure III.5 :</b>	Perte de masse en fonction du temps (5N).....	58
<b>Figure III.6 :</b>	Perte de masse en fonction du temps (30N).....	59
<b>Figure III.7 :</b>	Microstructure des dépôts traités à 950°C après l'essai de l'usure.....	60
<b>Figure III.8 :</b>	La perte de masse des échantillons à 7 jours.....	62
<b>Figure III.9 :</b>	Microstructure des différents échantillons obtenus après 7 jours.....	63
<b>Figure III.10 :</b>	La perte de masse des échantillons à 14 jours.....	64
<b>Figure III.11 :</b>	Microstructure des différents échantillons obtenus après 14 jours.....	65
<b>Figure III.12 :</b>	La perte de masse des échantillons à 21 jours.....	66
<b>Figure III.13 :</b>	Microstructure des différents échantillons obtenus après 21 jours.....	67
<b>Figure III.14 :</b>	La perte de masse des échantillons à 28 jours.....	68
<b>Figure III.15 :</b>	Microstructure des différents échantillons obtenus après 28 jours.....	69
<b>Figure III.16 :</b>	La perte de masse des échantillons pendant tout le teste.....	70
<b>Figure III.17 :</b>	Courbe de polarisation anodique.....	71
<b>Figure III.18 :</b>	Courbe de polarisation cathodique.....	72
<b>Figure III.19 :</b>	Le tracé de Tafel.....	73

***LISTE***

***DES***

***TABLEAUX***

## *Liste des tableaux*

---

### Liste des tableaux

<b>Tableau I.1 :</b>	Variétés allotropiques du fer et structures correspondantes .....	17
<b>Tableau I.2 :</b>	Propriétés chimiques .....	20
<b>Tableau I.3 :</b>	Propriétés physiques .....	20
<b>Tableau II.1 :</b>	Analyse du substrat par la fluorescence des rayons X .....	38
<b>Tableau II.2 :</b>	Composition chimique (en % massique) de l'acier inoxydable X30Cr13 .....	40
<b>Tableau II.3 :</b>	Propriétés thermo physiques et mécaniques de l'acier inoxydable X30Cr13 .....	40
<b>Tableau II.4 :</b>	Paramètres de projection utilisée .....	43
<b>Tableau III.1 :</b>	les charges et vitesses appliques pour les dépôts sans traitement thermique.....	57
<b>Tableau III.2 :</b>	les charges et vitesses appliques pour les dépôts traités à 950°C.....	61
<b>Tableaux III.3 :</b>	Le potentiel de corrosion des échantillons.....	74

***INTRODUCTION  
GÉNÉRALE***

# Introduction générale

---

Les matériaux métalliques sont toujours en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux. Le processus de corrosion entraîne une dégradation 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 quotidienne.

Ce problème a fait l'objet de plusieurs études durant ces dernières années. Des recherches ont été publiées sur le comportement des matériaux dans l'eau de mer mais il subsiste toujours des défaillances. Après des investigations approfondies doivent s'effectuer pour obtenir une meilleure compréhension sur le comportement des matériaux vis-à-vis la corrosion, et ce dans le but de trouver des solutions à ce phénomène, ils sont arrivés à l'une des solutions les plus utilisées pour le moment qui s'appelle la projection thermique.

Apparue dans le cadre de la protection anticorrosion, la projection thermique a su conquérir une place intéressante dans le domaine de la maintenance industrielle, grâce aux performances accrues des pièces revêtues par cette technique. En outre, la projection thermique est un procédé de dépôt dont les particules solides sont injectées dans un gaz à haute température, elles y sont chauffées, fondues, accélérées et projetées à grande vitesse sur le substrat 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.

La matière à déposer, sous forme de poudre, de fil ou de baguette est totalement ou partiellement fondus dans la source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma). La réalisation de revêtement projeté de haute qualité passe par une bonne cohésion du dépôt et une adhérence élevée des revêtements sur leur substrat.

Notre travail est basé sur l'étude électrochimique des dépôts à base acier inox 18-8 obtenue par la technique de projection thermique, qui est présenté sur les trois 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 arc électrique, et sur les différentes étapes de réalisation des dépôts, par la suite on a présenté des généralités sur la corrosion.



# Introduction générale

---

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

Le chapitre III, nous présentons les micrographies des dépôts réalisés, les résultats expérimentaux des tests de DRX, d'usure et tests électrochimiques ainsi que leurs interprétations. En fin nous terminons par une conclusion générale.

# ***CHAPITRE I***

## ***ELÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES***

**I.1. Introduction :**

La projection thermique est un terme générique qui regroupe un ensemble de procédés utilisés pour déposer des matériaux métalliques et non métalliques sur une pièce à revêtir.

Différentes technologies de dépôts permettent d'apporter à un matériau les propriétés de surface donnée. Parmi les techniques les plus utilisées, on peut citer l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur (notés respectivement PVD et CVD) et la projection thermique. Les applications de ces dépôts concernent essentiellement la protection contre l'usure et la corrosion, la décoration ou la réalisation de revêtements à propriétés physiques spécifiques (électrique, magnétique, thermique, etc.). [1]

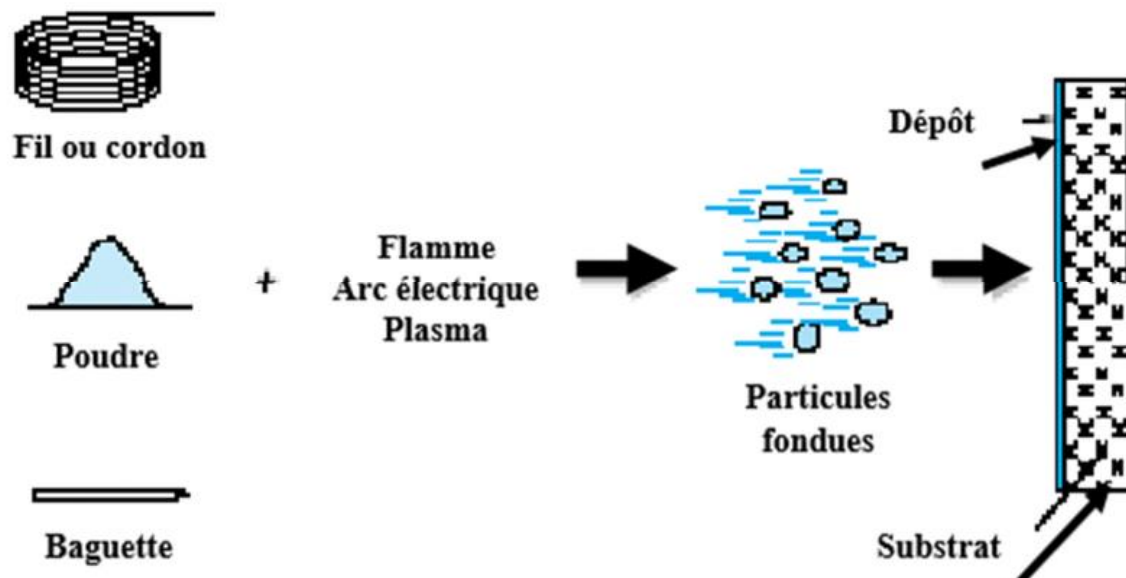
**I.2. Historique :**

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle (1909) un ingénieur suisse Zurich le Docteur Max Ulrich Schoop a minutieusement étudié l'impact de balles en plomb sur un mur en béton, ce qui lui a inspiré 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. [2]

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 d'énergie 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). La robotisation des processus ont assuré un progrès constant de la projection thermique et de son application pour l'élaboration de nouveaux matériaux. [2]

**I.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 et chimiques. L'épaisseur du revêtement est comprise entre 50 microns et quelques millimètres.



**Figure I.1:** Schéma simplifié du principe de la projection thermique[3]

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).

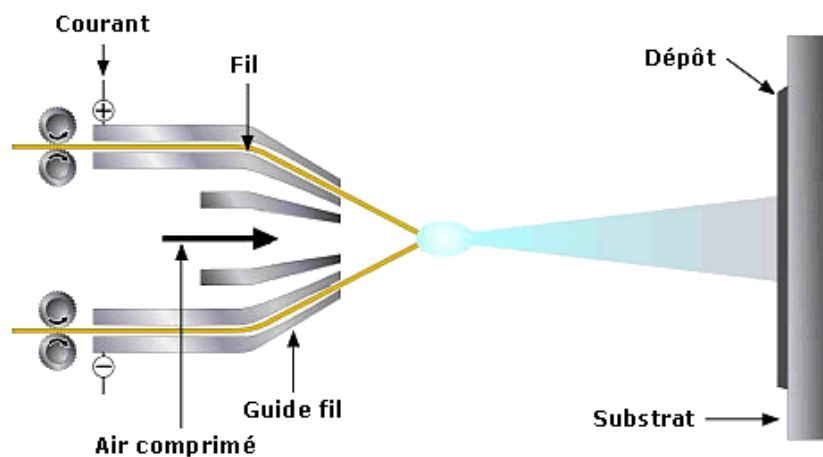
#### **I.4. Différents types de procédés de projection thermique :**

##### **I.4.1. Projection par arc électrique entre deux fils :**

La projection à l'arc est le premier procédé ayant utilisé dont l'énergie calorifique est obtenue par 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 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. [3]

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.[4]

#### **I.4.2. Projection flamme :**

Il s'agit du procédé le plus ancien, à l'origine de la projection thermique. La technique de projection 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. (Figure 1.3).

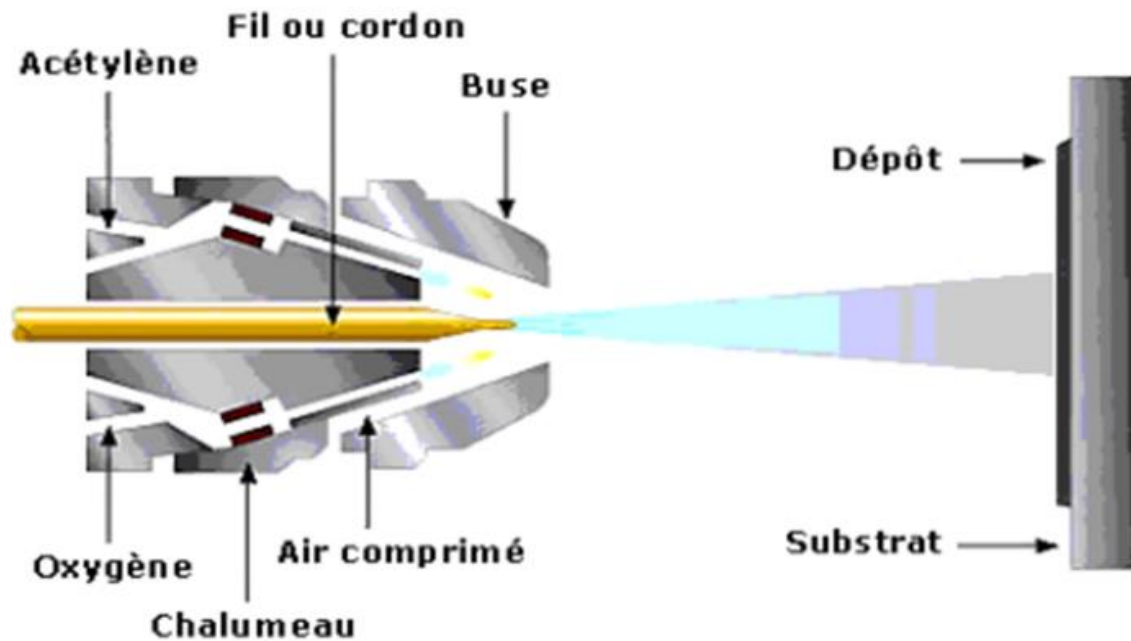


Figure I.3: Projection flamme[5]

#### I.4.3. Projection HVOF/HVAF :

La technique de projection HVOF/HVAF consiste à produire une flamme hypersonique par la combustion d'hydrocarbures avec de l'oxygène sous grande pression avec une vitesse très élevée acquise par les particules projetées grâce aux importantes pressions régnant dans la chambre de combustion.

Deux procédés sont développés, leur différence tient essentiellement à des critères d'ordre économique :

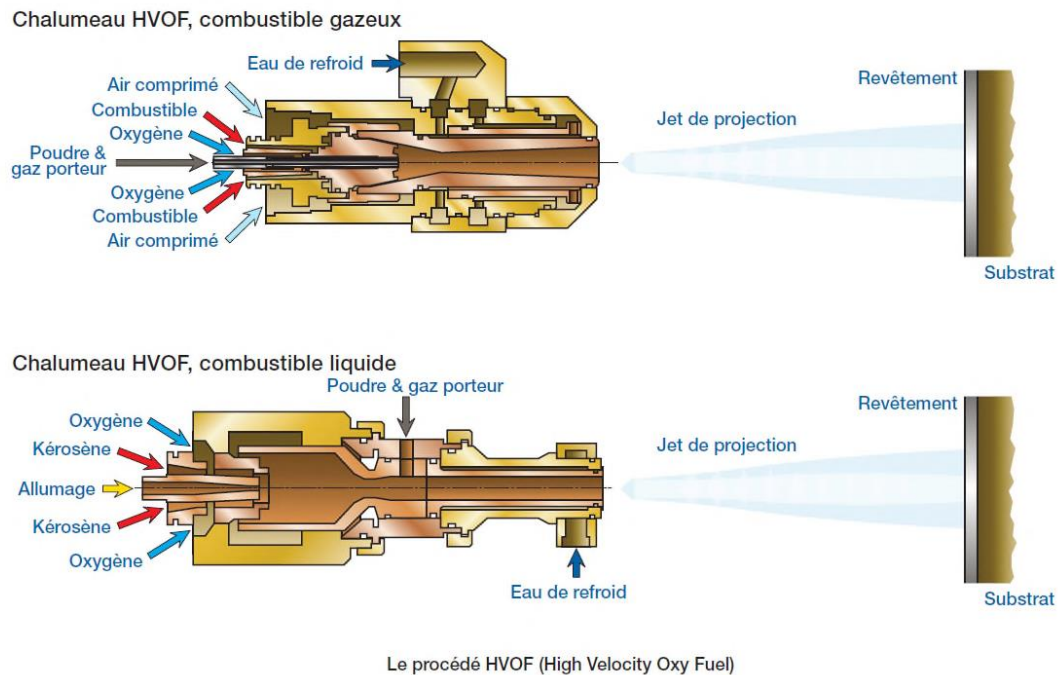
- Le procédé HVOF : high velocity oxygen fuel;
- Le procédé HVAF : high velocity air fuel.

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

L'HVAF utilise quant à lui un mélange kérosène -air comprimé pour la combustion.[6]

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).

La poudre est injectée à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où elle est fondue et accélérée dans la tuyère à une vitesse proche de la vitesse hypersonique. Figure I.4



**Figure I.4 :** Principe de la projection HVOF

#### I.4.4. Projection par plasma :

Un plasma est un gaz ionisé constitué d'électrons libres, d'ions, d'atomes et de molécules dans des états excités ou non.

Il est considéré comme le 4<sup>ème</sup> état de la matière.

Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont :

- Une source de puissance (générateur à courant continu);
- Une décharge ionisant le gaz (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 d'effusion 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.5

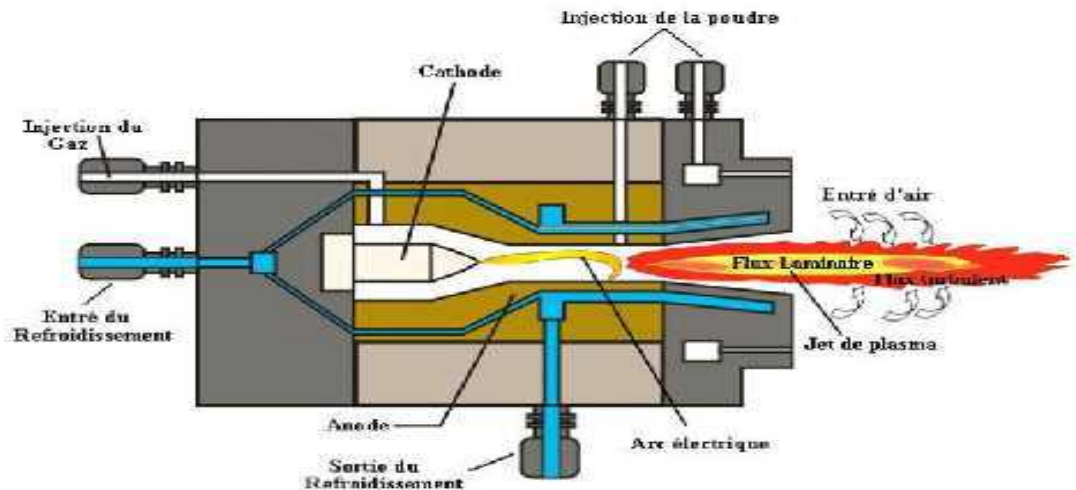


Figure I.5 :Schéma de principe d'une torche à plasma d'arc.

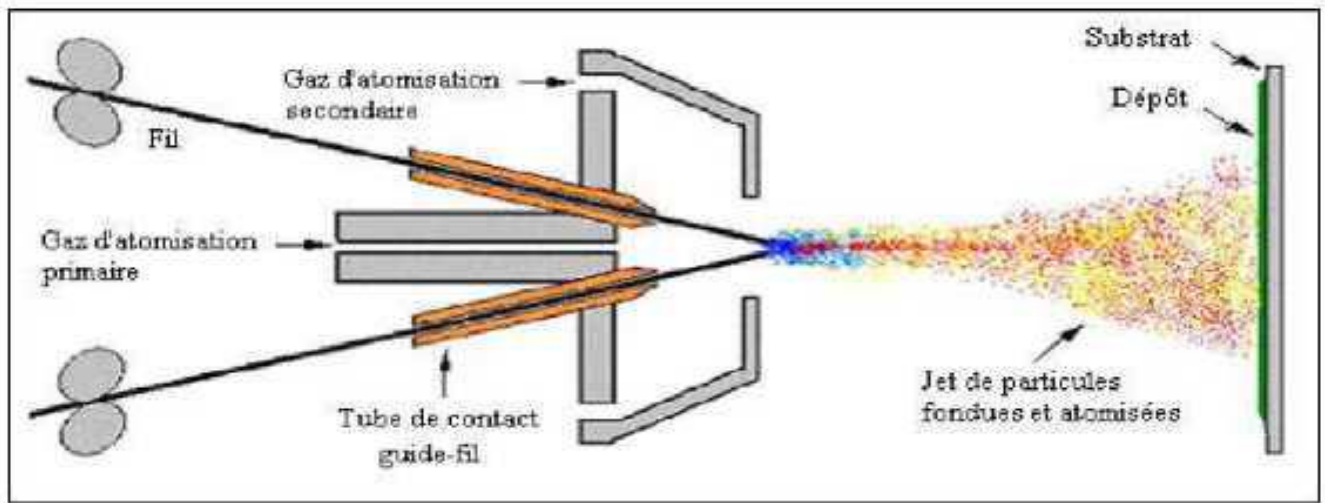
#### I.4.5. Projection arc-fil :

La projection arc-fil est une technique de revêtement de surface relativement économique qui compte de nombreuses applications industrielles.

Elle est utilisée industriellement en Europe depuis 1945. [8,9]

Le principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommable, et à atomiser le matériau aussi fondu par un jet de gaz comprimé (généralement de l'air) qui le projette sur le substrat. Figure I.6

Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec les Tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de Courant allant de 100à500A.



**Figure I.6** : Schéma de principe d'un dispositif de projection à arc électrique.

Ils sont essentiellement constitués de deux parties :

- La première sert à l'entraînement des fils;
- La seconde assure la fusion et la projection du métal fondu.

Les fils sont conditionnés en bobines et tirés au travers de gaines souples, par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et mues par des moteurs électriques.

Dans le cas de fils très rigide ou de grandes distances entre le pistolet et les bobines (supérieure à 5 m), il est nécessaire d'adjoindre à l'installation un système d'entraînement des fils par poussée à l'entrée des gaines.

Ce type d'équipement est communément appelé << pousse-tire >>.

A l'intérieur du pistolet, les fils sont orientés par deux tubes permettant d'une part le positionnement du fil avant son entrée dans la zone de fusion et d'autre part, la transmission du courant électrique aux fils.

Une buse située derrière le point d'intersection des fils, dirige un flux de gaz comprimé à grande vitesse sur l'extrémité des fils en fusion, et propulse le matériau atomisé sur le substrat.

La température de l'arc, d'environ 6000 (K) dans l'air pression ambiante, est largement au-dessus du point de fusion des matériaux projetés, ce qui entraîne une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes. Cependant, ce dernier peut aider à créer des zones d'interaction métallurgique dans le dépôt ou à l'interface dépôt substrat et des zones de diffusion améliorant, ainsi, sensiblement l'adhérence et la cohésion des dépôts.

L'avance des fils à vitesse constante permet la projection continue avec des débits de matière élevés, ceci en dépit du caractère discontinu qu'induit la création et l'extinction de l'arc électrique lors de la formation et l'atomisation des gouttelettes de matériau fondu.

#### **I.5. Paramètres de projection influant sur le dépôt[10] :**

- **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.
- **Pression de gaz** : Une pression trop forte de gaz augmente les pertes de métal donc toutes les consommations (Dissipation d'énergie).
- **Diamètre du fil ou du cordon** : Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente le grain du dépôt et les pertes.
- **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.
- **Pression de l'air** : (air comprimé vecteur de la projection). Son accroissement diminue la grosseur du grain mais augmente l'oxydation du dépôt.
- **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.
- **Angle de projection** : En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.

- **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.
- **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.
- **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.6. Préparation des surfaces :**

La métallisation exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir. Si quelques fois on peut obtenir, avec des particules liquides et très chaudes, des liaisons ponctuelles par fusion entre le projectile et le substrat, cet accrochage reste toujours très insuffisant.

En effet, que ce soit pendant les opérations d'usinage sur des pièces rechargées, ou au cours des sollicitations sur des pièces protégées contre la corrosion, les efforts mécaniques induits aux revêtements engendreront son décollement il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir :

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

#### **I.6.1. La propreté de la surface :**

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.

Le traitement de surface est un paramètre clé qui contrôle totalement des gouttelettes projetés.

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

### **I.6.2. La rugosité :**

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

Dans les deux cas, le résultat a pour effet :

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

### **I.6.3. Le préchauffage :**

Comme nous l'avons vu précédemment, suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle du support, on obtiendra un accrochage plus ou moins important. C'est pourquoi un préchauffage de substrat est recommandé pour améliorer les propriétés d'adhérences, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence. Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre, surtout pour les matières plastiques qui ne sont pas conductrices de chaleur. Le préchauffage peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau, de graisse ou d'huile, où le nettoyage n'est pas atteint. Il permettra de faire sortir les liquides absorbés afin que la métallisation adhère efficacement.

## **I.7. Les Modes de préparation [5]:**

### **I.7.1. Le dégraissage :**

Ce que l'on recherche à éliminer dans cette opération, ce sont des graisses incrustées sur le substrat. Il s'effectue soit par dissolution en milieu de solvant organique, soit par saponification, soit par muséification à l'aide d'un tensioactif. Dans la plupart des cas, on aura recours à une élévation de température suffisante pour ramollir la souillure grasse.

De même, un effet mécanique est souvent nécessaire. Suivant le besoin, le dégraissage sera plus ou moins profond pour un dégraissage très poussé; il convient donc de faire suivre le dégraissage chimique d'un électrolytique.[42]

### **I.7.2. Le décapage :**

Le nom générique de décapage regroupe les procédés éliminant les produits pour le fer et l'acier. Le décalaminage élimine les couches d'oxyde anhydre formées en hautes températures, alors que le dérouillage conserve l'oxyde hydrate de la corrosion naturelle.

Les méthodes de décalaminage sont chimiques, électrochimiques, mécaniques ou thermiques. Les méthodes chimiques et électrochimiques utilisent des solutions agressives acides, alcalines ou encore des oxydants forts.

Dans la plupart des cas, une mauvaise préparation de surface est l'origine d'un traitement de surface défaillant. La qualité d'une préparation est une notion relative selon les utilisations, ni les éléments gênant ni leur teneur limite ne sont les mêmes.[43]

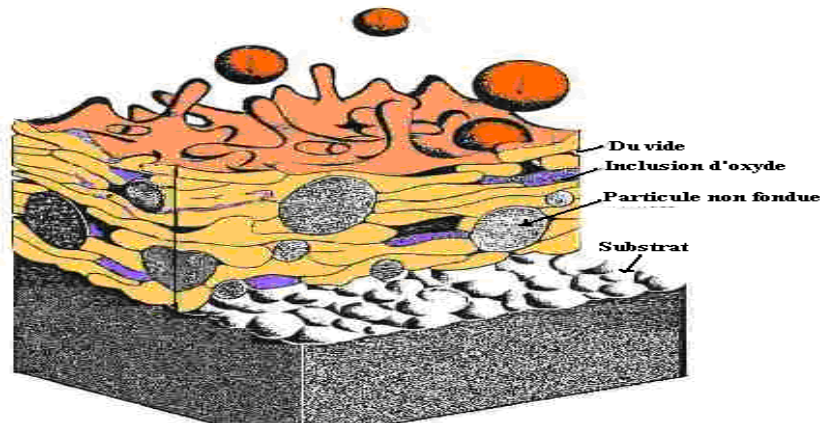
### **I.7.3. Le sablage :**

Le sablage est le terme impropre donné au "traitement par impacts", plus généralement appelé grenailage par les professionnels. C'est un procédé de traitement d'une surface par des projectiles petits et nombreux, destinés à induire des modifications physiques, chimiques ou mécaniques au subjectile.

La technique employée consiste à utiliser, soit un vecteur gazeux (généralement l'air comprimé), soit une force centrifuge (turbine) pour à grande vitesse des grains (projectiles) qui viennent percuter de façon répétée la surface des pièces (subjectiles). Le "grenailage" met en œuvre des projectiles extrêmement variés, différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres qui influencent le résultat.[44]

### I.8. Formation et structure d'un dépôt réalisé par projection thermique :

Les particules qui sont projetées sur le substrat s'encrassent sur celui-ci pour donner une superposition de couches sous forme lamellaire. Cette forme résulte de la rapidité de solidification des particules aplaties, entrant en impact avec la surface froide du substrat, donc le dépôt résulte de l'empilement de lamelles, il a une structure lamellaire et ses propriétés sont différentes de celles des matériaux massifs.[13]



**Figure I.7 :** Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique.

#### I.8.1. Microstructure :

Les dépôts sont généralement stratifiés. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilement imparfait des gouttelettes, soit à la consommation de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1% à 25% suivant les procédés et les matériaux utilisés. En raison de la très grande vitesse de refroidissement, les particules fondues s'écrasent sur le substrat où des particules sont déjà déposées et forment de fines lamelles qui s'adaptent aux irrégularités de la surface. Le temps de solidification d'une particule projetée est de l'ordre de la microseconde à la dizaine de microsecondes.

Les caractéristiques de la microstructure dépendent, d'une part, des paramètres des particules à l'impact (vitesse, taille, état de fusion et état chimique) et d'autre part, des paramètres du substrat (matière, rugosité, état chimique de la surface et température).[14]

**I.9. Les aciers inoxydables : [41]****I.9.1. 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 allotropiques de structures cristallines différentes entre les basses températures et sa température de transformation :

- en-dessous de 910 °C, le fer à une structure cubique centrée, c'est le fer  $\alpha$  ou ferrite.
- de 910 °C à 1400 °C, le fer se transforme en fer  $\gamma$  ou austénite dont la structure est cubique à faces centrées.
- une nouvelle transformation intervient de 1400 °C à 1538 °C pour donner la ferrite  $\alpha$  dont la structure est à nouveau cubique centrée. Ces transformations qui sont réversibles peuvent se résumer suivant le tableau 1.

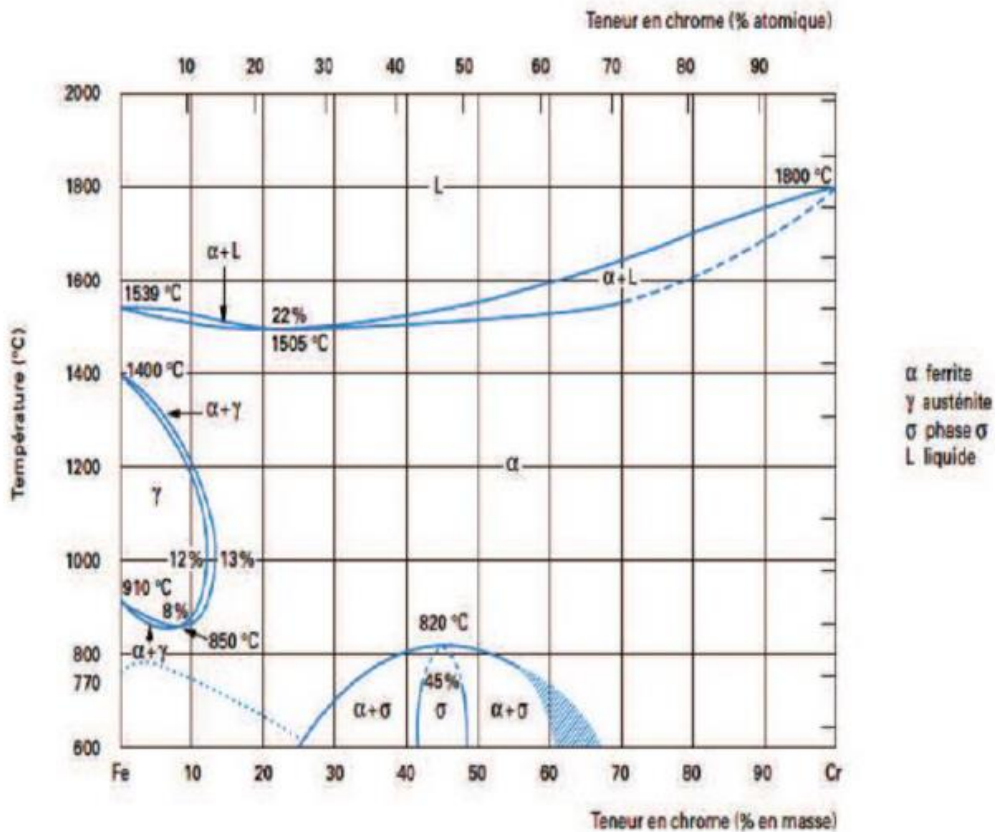
Les éléments d'addition présents dans les aciers inoxydables ont tendance à favoriser une Structure aux dépens d'une autre, suivant leur concentration. Ces éléments sont ajoutés à l'acier inoxydable de base afin d'en modifier ou d'en d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et mécaniques.



<b>Fer (ferrite)</b> $(\theta < 910 \text{ }^\circ\text{C})$	<b>Fer (austénite)</b> $910^\circ\text{C} < \theta < 1400 \text{ }^\circ\text{C}$	<b>Fer (forme haute température)</b> $\theta > 1400 \text{ }^\circ\text{C}$
Structure cubique centrée	Structure cubique à faces centrées	Structure cubique centrée

**Tableau I.1 :** Variétés allotropiques du fer et structures correspondantes.

**I.9.2. Système fer-chrome :** Le diagramme binaire complet à l'équilibre fer-chrome montre que l'existence de la phase  $\gamma$  est limitée à l'intérieur d'un domaine appelé « boucle  $\gamma$  » ; cette situation étant due au chrome qui, compte tenu de sa structure cristallographique (cubique centrée), favorise le développement du domaine  $\alpha$ .



**Figure I.8 :** diagramme d'équilibre de phase de système fer-chrome

L'étendue du domaine  $\gamma$  va être très fortement influencée par d'autres éléments d'addition. Certains auront tendance à favoriser l'existence de la phase  $\alpha$  (structure ferritique) ; ce sont les éléments dits  $\alpha$ -gènes qui sont le chrome, le bore ou le molybdène. D'autres, à l'opposé, auront tendance à favoriser l'existence de la phase  $\gamma$  (structure austénitique) ; ce sont les éléments dits  $\gamma$ -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 trempe (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  $\gamma$ . L'alliage à 13% de chrome et 0,3 % de carbone (X30Cr13) est représentatif de cette famille.
- 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  $\gamma$ . Il s'agit 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.9.3. Classes des aciers inoxydables :**

#### **I.9.3.1. Aciers martensitiques :**

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

- présence d'une teneur en chrome supérieure à 13 % 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.9.3.2. Aciers 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.9.3.3. 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 exceptionnelle. Il faut ajouter également une excellente soudabilité métallurgique, ce 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  $\gamma$  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.9.3.4. 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  $\alpha$  et 50 % d'austénite  $\gamma$  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.9.4. Propriétés physicochimiques des inox :

Les principales propriétés chimiques et physiques sont représentées dans les tableaux I.2 et I.3

<b>Composition chimique (%)</b>	<b>304 Austénitique</b>	<b>430 Ferritique</b>	<b>410 Martensitique</b>
<b>Carbone</b>	0,8	0,12	0,15
<b>Manganèse</b>	2	1	1
<b>Phosphore</b>	0,045	0,04	0,04
<b>Souffre</b>	0,03	0,03	0,03
<b>Silicone</b>	1	1	1
<b>Chrome</b>	18 à 20	16 à 18	11,5 à 13,5
<b>Nickel</b>	8 à 12		

**Tableau I.2 :** Propriétés chimiques[40]

	<b>Aciers ferritiques</b>	<b>Aciers austénitiques</b>
<b>Masse volumique (kg. m<sup>3</sup>)</b>	7 700	7 900
<b>Module d'Young (MPa)</b>	220 000	200 000
<b>Limite d'élasticité (MPa)</b>	370	270
<b>Résistance à la rupture (MPa)</b>	500	620
<b>Allongement à la rupture (%)</b>	26	56
<b>Coefficient de dilatation thermique linéaire entre 20 et 200°C (10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>)</b>	10	16
<b>Capacité thermique massique (J.kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>)</b>	460	500

**Tableau I.3 :** Propriétés physiques[39]

**I.9.5. Influence des éléments d'Alliage:[15]**

- **Chrome (Cr)**

Une teneur minimale d'environ 10,5 % est nécessaire pour former un film passif de chrome qui soit stable, suffisant pour protéger l'acier contre une corrosion atmosphérique modérée. La résistance à la corrosion augmente avec la teneur en chrome. Le chrome est  $\alpha$ -gène : il favorise la forme ferritique, c'est-à-dire la structure cubique centrée du fer. Des teneurs en chrome élevées nécessitent des quantités accrues de nickel pour former une structure austénitique ou austéno-ferritique. Elles favorisent également la formation de phases intermétalliques.

- **Le carbone (C)**

Le carbone est un élément inhérent aux aciers. Il permet d'améliorer la résistance mécanique du fer, en se plaçant dans les sites interstitiels des mailles cristallographiques. Le carbone est plus soluble dans l'austénite que dans la ferrite et par conséquent, il stabilise le domaine austénitique des aciers et il est dit  $\gamma$ -gène ( $\gamma$ -gène). En effet, de faibles teneurs en carbone permettent d'améliorer la ténacité et la ductilité, tandis que des teneurs en carbone plus élevée apportent une meilleure résistance.

- **Le nickel (Ni)**

Le nickel est l'élément  $\gamma$ -gène de base. Il a une structure cubique faces centrées (c.f.c.) et stabilise donc fortement l'austénite  $\gamma$ . L'addition de nickel en quantité suffisante dans un acier Fe-Cr permet l'obtention d'un acier austénitique.

- **Le molybdène (Mo)**

Le molybdène améliore la résistance à la corrosion uniforme. Cet élément est  $\alpha$ -gène et comme le chrome, le molybdène favorise la précipitation d'intermétalliques, tels que la phase  $\sigma$ .

- **Le manganèse Mn**

.Récemment, l'addition de manganèse dans les aciers inoxydables et dans les aciers duplex en particulier, a retrouvé un fort intérêt car le manganèse augmente la solubilité de l'azote dans la solution solide de fer. Cet élément est particulièrement utilisé avec des teneurs élevées dans les nouveaux aciers austénitiques à hautes teneurs en éléments interstitiels. Cet élément est gammagène.[16]

### **I.9.6. L'utilisation des aciers inoxydables :**

Les aciers inoxydables trouvent des applications très nombreuses et très variées.

Pratiquement tous les domaines industriels et grands publics les utilisent. Les deux raisons principales en sont :

- Des propriétés très variées, qu'il s'agisse d'abord de résistance à la corrosion, mais aussi des caractéristiques mécaniques, de mise en œuvre, etc.
- L'existence de toutes les formes de produits : produits plats minces et épais, produits longs, fils, produits forgés et moulés, tubes, tôles plaquées, soudure, etc.

### **I.10. La Corrosion :**

#### **I.10.1. Introduction :**

. 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.[17]

#### **I.10.2.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 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. [18]

### **I.10.3.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.[19]

#### **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. [20]

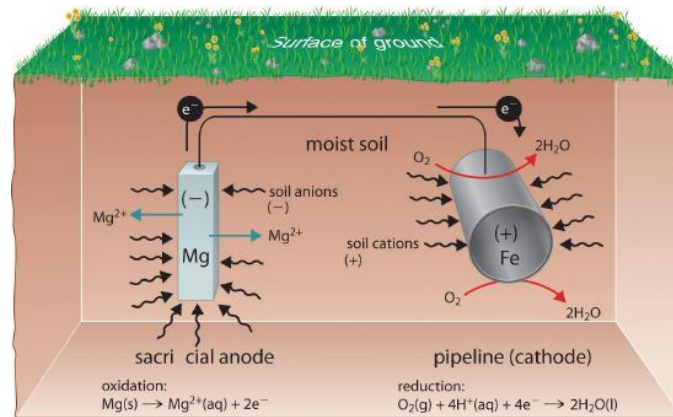


Figure I.9 :Schéma de principe de corrosion sèche

## 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. [20]

## 3. Corrosion humide :

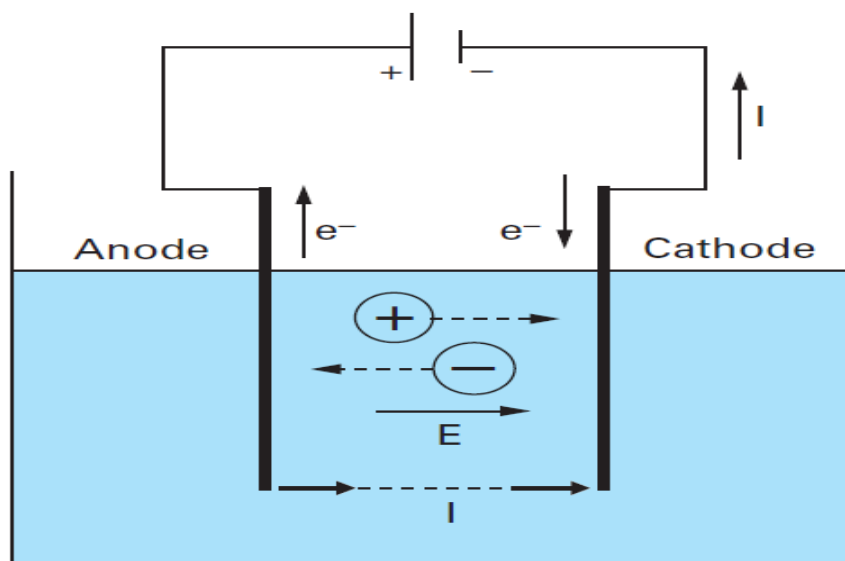
La corrosion humide est la plus rencontrée dans l'industrie du gaz et du pétrole ainsi que dans l'industrie pétrochimique. Elle est responsable de la dégradation des structures métalliques en contact avec tout milieu susceptible de contenir de l'eau. La corrosion humide fonctionne comme une pile électrochimique et doit donc réunir simultanément quatre facteurs pour pouvoir se déclencher [21]:

- **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<sup>+</sup>,



formation d'eau par réduction de l'oxygène en milieu acide, formation d'ions OH<sup>-</sup> par réduction de l'oxygène en milieu basique, dépôt d'un métal par réduction d'un de ses cations...).

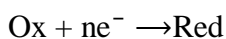
- **Un conducteur électrique** : qui puisse véhiculer les électrons libérés de l'anode vers la cathode. Ce rôle est assuré par le métal lui-même.
- **Un conducteur ionique** : qui puisse permettre la migration des cations libérés de l'anode vers les anions libérés à la cathode pour assurer la neutralité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



**Figure I.10:** 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 :

- 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. [21]

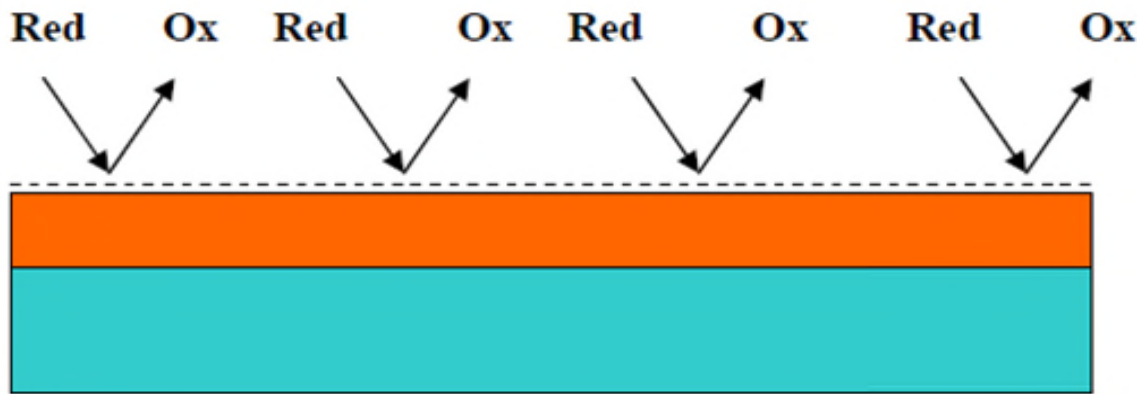
#### **I.10.4. Morphologie de la corrosion :**

Selon la nature de l'attaque, la corrosion peut présenter des aspects très divers regroupés en deux grandes familles [22]:

- la corrosion uniforme ou généralisée.
- La corrosion localisée.

##### **I.10.4.1. La corrosion uniforme ou généralisée :**

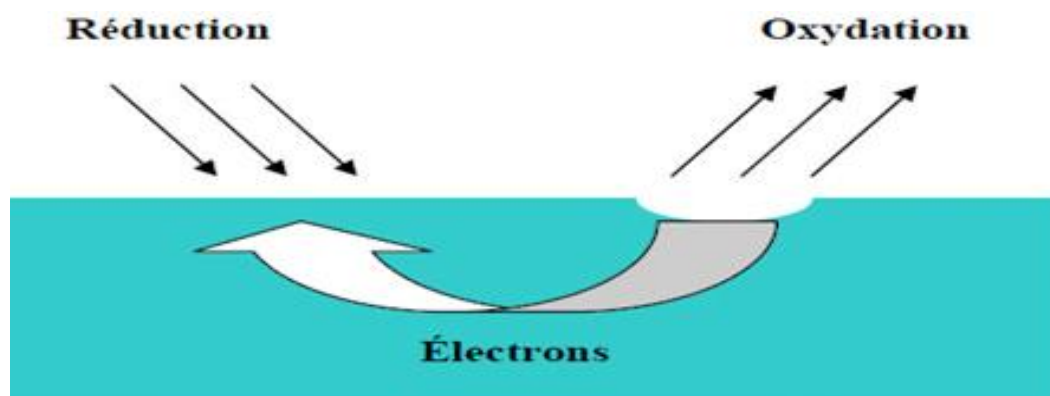
C'est la forme la plus classique de corrosion, mais pas toujours la plus importante en termes économiques ou sécuritaires. La corrosion uniforme se caractérise par l'existence de plusieurs processus électrochimiques individuels qui se produisent uniformément sur toute la surface considérée, Elle se traduit en diminution d'épaisseur (par unité de temps ou en perte de poids par unité de surface, et par unité de temps) si les produits de corrosion sont solubles, ou par un dépôt uniforme s'ils ne le sont pas. La corrosion uniforme peut être réduite ou évitée par un choix convenable du matériau, la modification du milieu ou la protection cathodique. Ce type de corrosion peut être détecté longtemps avant qu'un ennui vienne interrompre la vie de l'équipement ou de la structure. [22]



**Figure I.11:**Schéma de principe de corrosion uniforme

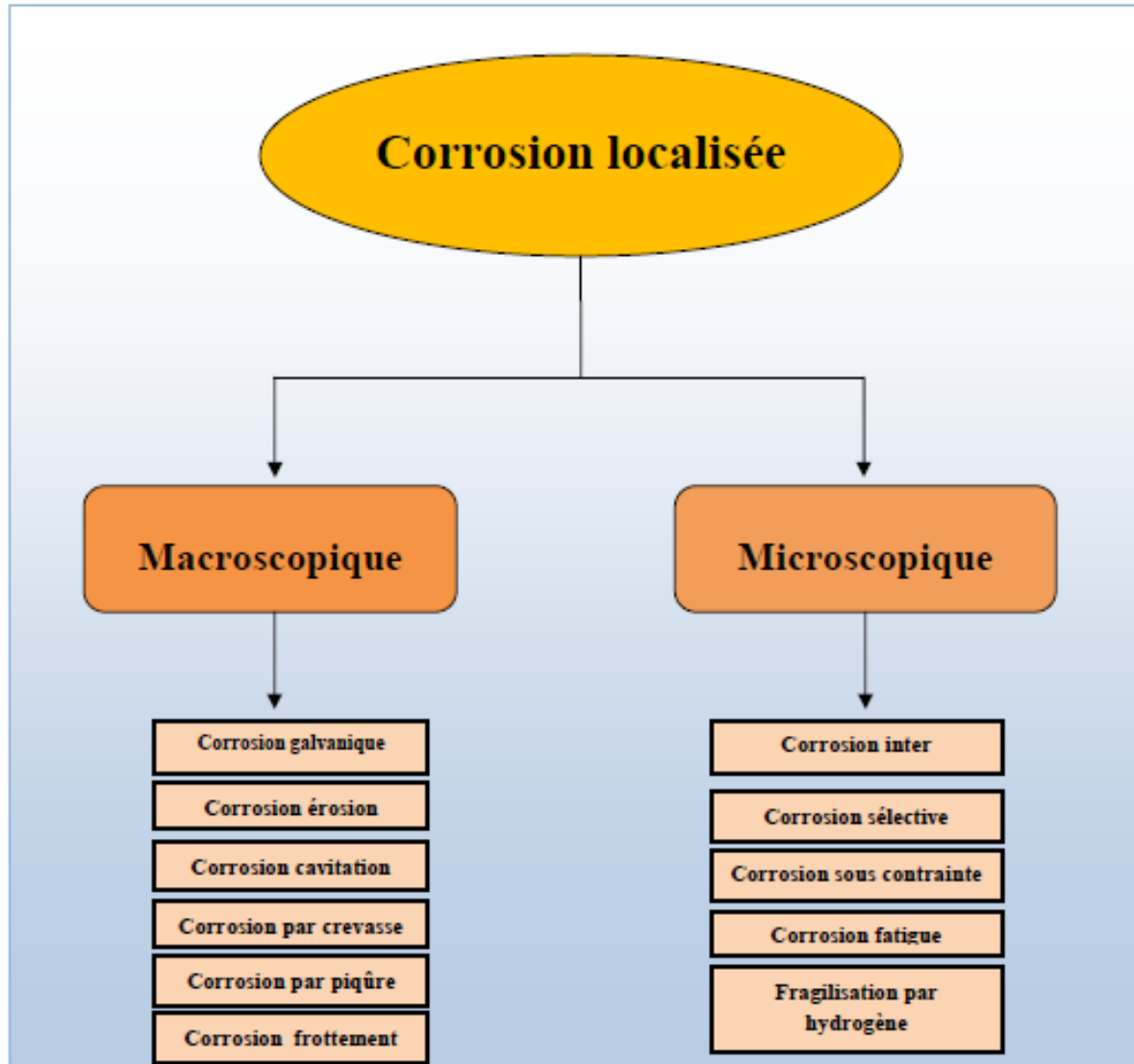
#### I.10.4.2. Corrosion localisée :

Comme son nom l'indique, elle est localisée sur des sites bien précis du métal. Il en existe plusieurs types, et leur caractéristique commune est qu'ils correspondent à l'existence de multi- électrodes locales (existence de micro-pile due à l'hétérogénéité de la surface métallique). Ce type de corrosion ne peut être mesuré par la perte de poids ou de la diminution de l'épaisseur. Pour se faire, on doit réaliser des observations métallographiques et des mesures électrochimiques.[23]



**Figure I.12 :** Schéma de principe de corrosion localisée

On distingue plusieurs types de corrosion localisée que nous pouvons schématiser comme suit:

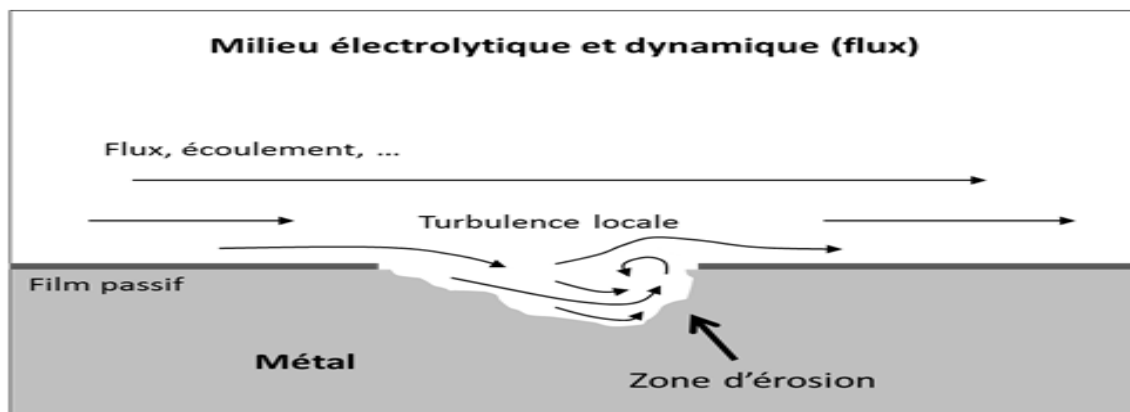


**Figure I.13 :** Les différents types de la corrosion localisée

- **Corrosion galvanique :**

Elle est due, à un contact entre des métaux de nature différente, exposés au même milieu : on utilise aussi le terme de bimétallisme.

Dans chaque solution, il est possible d'établir une "série galvanique", c'est-à-dire un classement des différents métaux et alliages en fonction de ce potentiel mesuré.[24]

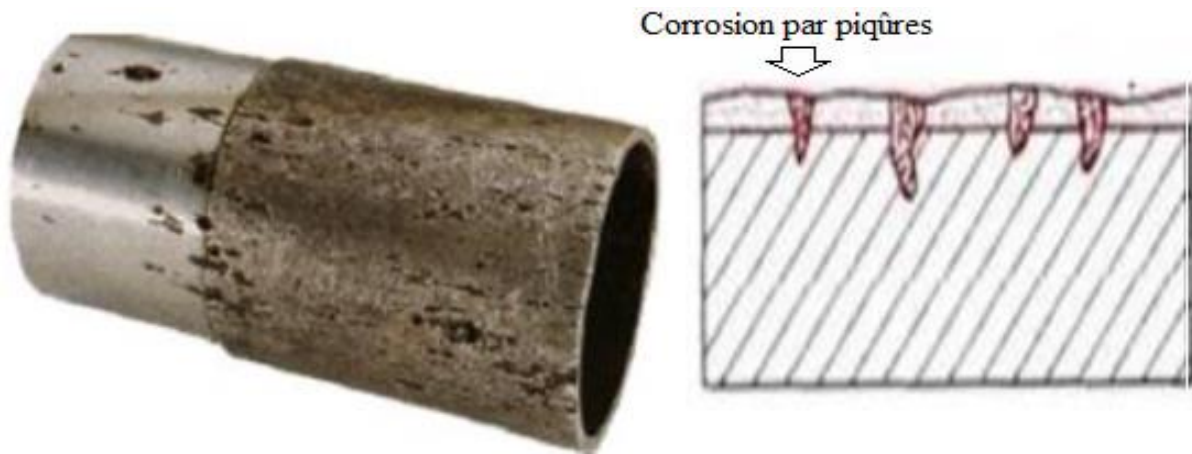


**Figure I.14 :** Schéma de principe de corrosion galvanique

Les méthodes de prévention à ce phénomène de corrosion sont :

- En utilisant avec précaution les revêtements en maintenant le milieu en bon état.
- En réduisant l'agressivité du milieu (température, ajout d'inhibiteurs).[25]
- **Corrosion par piqure :**

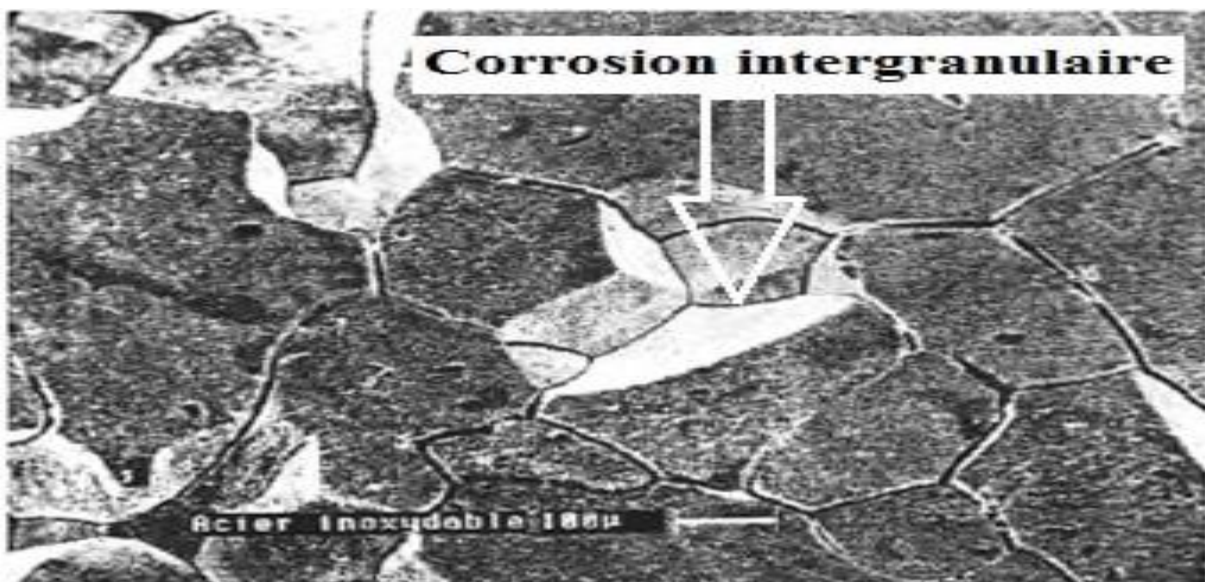
La corrosion par piqures a un caractère totalement différent. Seuls certains points du métal sont attaqués et la corrosion progresse en profondeur. Bien que la quantité de métal attaqué soit faible, cette forme de corrosion est très dangereuse car elle peut aboutir à la formation de trous profonds pouvant aller jusqu'à la perforation. L'intensité de corrosion est exprimée par la densité, la profondeur et le diamètre moyens des piqures. Il est important de souligner que la perte de poids et la diminution d'épaisseur n'ont aucune signification pour mesurer une telle corrosion.[26]



**Figure I.15 :** Corrosion par piqûres d'un acier inoxydable

- **Corrosion intergranulaire :**

La corrosion intergranulaire est un mode de corrosion structurale qui se propage dans le métal en attaquant soit les joints de grains, soit les zones adjacentes aux joints de grains. Ce mode de corrosion résulte de la présence, aux joints de grains, d'une phase continue et anodique par rapport au cœur du grain.[27]



**Figure I.16 :** Corrosion intergranulaire d'un acier inoxydable

- **Fragilisation par l'hydrogène :**

L'hydrogène peut pénétrer dans le métal quand il est produit à l'interface métal-film d'oxyde lors d'une réduction liée à la corrosion. En fond de fissure, le métal est nu. Il réagit avec l'eau et libère de l'hydrogène naissant qui se concentre aux joints des grains et facilite une décohésion inter cristalline.[28]

#### **I.10.5. L'eau de mer :**

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la Terre. On dit qu'elle est « salée » parce qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions, principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion sodium. On trouve 30 à 40 g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer. L'eau salée s'oppose à l'eau douce, qui contient moins de 1 g de sels dissous par kilogramme. La masse volumique de l'eau de mer à la surface est d'environ 1,025 g/ml, supérieure de 2,5 % à celle de l'eau douce (1 g/ml) à cause de la masse du sel et de l'électrostriction.[29]

##### **I.10.5.1. L'environnement marin :[30]**

Le milieu marin est considéré comme l'environnement le plus agressif pour la plupart des matériaux à cause de ses propriétés corrosives. Le comportement des matériaux peut varier considérablement dans l'environnement marin en fonction de leurs conditions d'utilisation. Ils peuvent être immergés, semi-immersés ou placé à un certain niveau au-dessus de l'eau. Leur environnement est différent suivant les expositions et par conséquent leur tenue à la corrosion peut être affectée.

Dans le cas de l'exposition à l'atmosphère marine, on peut citer le cas des bateaux et des équipements en bord de mer. Le métal est exposé aux milieux marins plus ou moins chargés de sel, à la forte humidité marine et aux moisissures qui peuvent se développer sur le métal.

- Pour l'immersion en eau de surface, on peut citer le cas des coques de bateau, des bouées de signalisation et des supports des pontons. La structure est immergée de quelques mètres dans une eau très aérée et constamment renouvelée du fait des vagues et des marées.

- Dans le cas de l'immersion en eau de mer profonde, certaines caractéristiques physicochimiques de l'eau telles que la salinité, la température et la concentration en oxygène, varient suivant la profondeur d'immersion.
- Pour l'immersion dans les fonds marins, la profondeur d'immersion joue un rôle très important dans la résistance à la corrosion par rapport à la présence abondante de sédiments organiques ou minéraux qui influent sur la tenue à la corrosion de certains métaux et alliages à cause du dégagement de dioxyde de soufre, de dioxyde de carbone et de l'ammoniac provenant de la décomposition bactérienne de ces sédiments.[31]

#### **I.10.5.2. Les caractéristiques de l'eau de mer :**

- **La salinité :**

C'est le caractère essentiel de l'eau de mer. L'océan contient en moyenne 35 grammes de sel par kilogramme d'eau de mer. Si on considère le volume total de l'océan (1370 millions de km<sup>3</sup>) cela représente 48 millions de milliards de tonnes de sel, soit 95 tonnes par m<sup>2</sup> sur le globe entier, ou 320 tonnes par m<sup>2</sup> sur les parties émergées.

La présence de sel dans l'eau modifie certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, température du maximum de densité). D'autres (viscosité, absorption de la lumière) ne sont pas influencées de manière significative. Enfin certaines sont essentiellement déterminées par la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique).

Le chlorure de sodium (Na Cl) n'est qu'un des très nombreux sels composant la solution. On a décelé dans l'eau de mer 60 des 92 corps simples existant à l'état naturel.[32]

- **Le pH :**

L'eau de mer est un milieu vivant et chimiquement tamponné. Le pH est par définition la mesure de l'activité des ions contenus dans une eau :

$$PH = - \text{Log} [H^+]$$

Le pH est lié à l'acidité et l'alcalinité de l'échantillon. Le pH de l'eau de mer est généralement compris entre 7.8 et 8.3. [32]



- **L'oxygène :**

L'oxygène est le facteur de la corrosion. En eau de mer, la réaction cathodique est le plus souvent la réduction de l'oxygène dissous donnant des ions OH<sup>-</sup>. L'augmentation de la concentration en oxygène favorise cette réaction et peut conduire à une augmentation de la corrosion par dépolarisation cathodique. De plus, les variations de la concentration en oxygène à la surface d'un même matériau sont à l'origine de la corrosion par aération différentielle : les surfaces ayant la concentration en oxygène la plus faible subissent une corrosion accélérée en devenant anodes, alors que la réduction de l'oxygène a lieu sur les surfaces où la concentration est la plus forte.[33]

- **La température :**

L'augmentation de la température de l'eau de mer devrait se traduire par une grande agressivité de celle-ci vis-à-vis des métaux. En d'autres termes, la tenue à la corrosion dans les mers tropicales devrait être moins bonne que dans les mers arctiques. Indépendamment des effets sur les organismes marins, l'augmentation de la température, au voisinage de l'ambiante, augmente la vitesse de corrosion de l'acier au carbone. [33]

- **La vitesse :**

La stagnation de l'eau de mer est un facteur défavorable à la tenue à la corrosion. La circulation de l'eau de mer a tendance à améliorer la tenue à la corrosion en diminuant la profondeur des piqures.[34]

- **L'activité biologique :**

L'eau de mer est un milieu vivant, dans lequel existe une très grande activité biologique qui contribue elle aussi à la tenue à la corrosion des métaux. Dès qu'un morceau de métal est immergé dans l'eau de mer, il se recouvre en quelques heures d'un film constitué d'une humeur biologique visqueuse appelée la zooglye sur laquelle se développent ensuite les salissures marines constituées des plantes et des animaux marins citant mollusques, corail, algues, éponge, etc.[33]

**I.10.6. Mécanisme de la réaction de corrosion électrochimique :[35]**

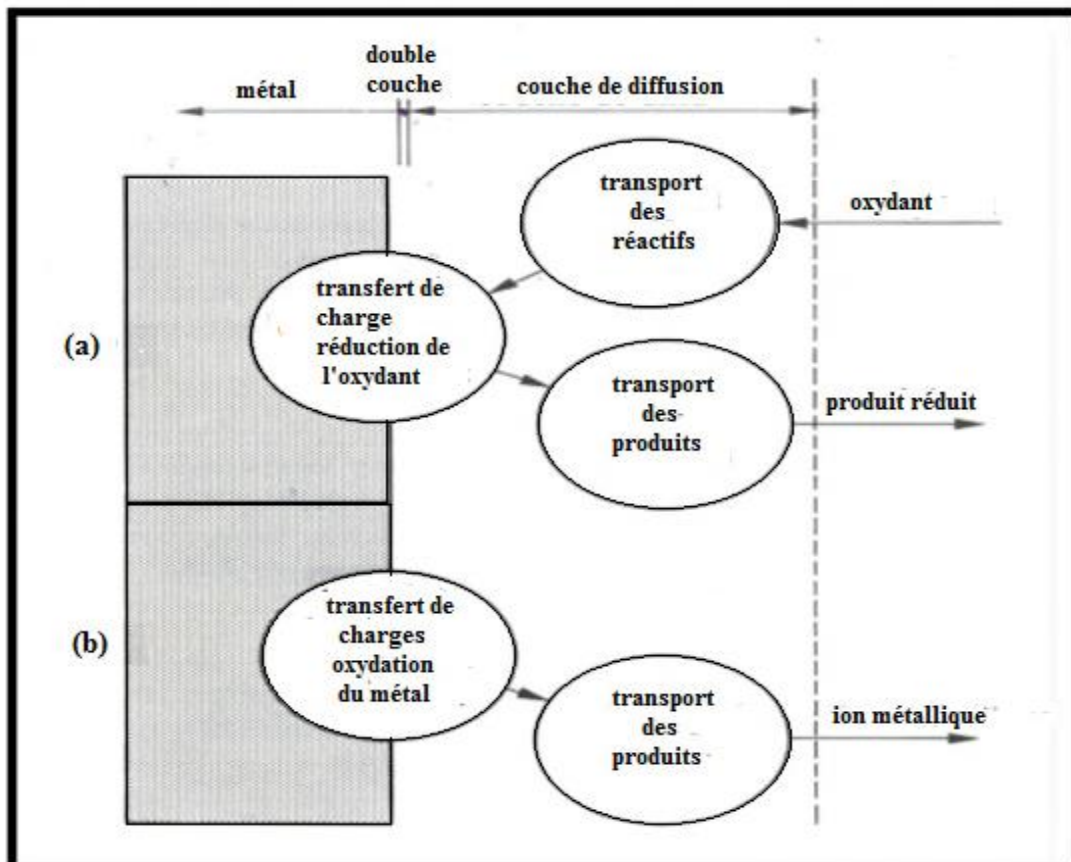
Les réactions de corrosion comportent au moins une réaction partielle anodique et une réaction partielle cathodique.

**I.10.6.1. Réaction partielle cathodique :**

L'oxydant présent dans l'électrolyte diffuse vers la surface de l'électrode, ou il réagit en acceptant un ou plusieurs électrons:  $Mn^+ + ne^- = M$

**I.10.6.2. Réaction partielle anodique :**

La réaction partielle anodique implique un transfert de charge à l'interface : un atome métallique perd un électron et passe en solution:  $M = Mn^+ + ne^-$ .



**Figure I.17:** Étapes réactionnelles lors de la corrosion d'un métal en milieu liquide :

(a) réaction partielle cathodique, (b) réaction partielle anodique

**I.10.7. 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 voltamétrie cyclique, la chronoampérométrie et l'impédance électrochimique. [36]

**I.10.7.1. La 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 ( $E_{\text{corr}}$ ), le courant de corrosion ( $I_{\text{corr}}$ ) 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 potentiodynamique à trois électrodes.

$E_{\text{corr}}$  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 densité de courant critique ( $i_c$ ) qui sont les valeurs à atteindre pour passiver le matériau. [37]

Les principales grandeurs caractéristiques d'un voltampérogramme sont données sur la

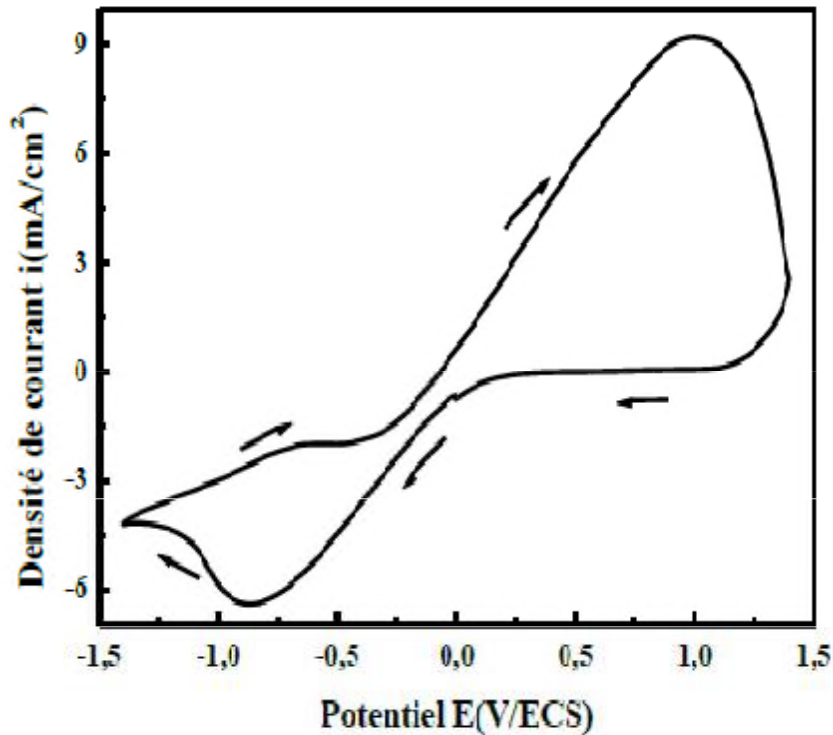
Avec :

$I_{pa}$ ,  $I_{pc}$  : 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

$\Delta E_p$  : Différence de potentiel entre  $E_{pa}$  et  $E_{pc}$



**Figure I.18 :** L'allure générale de la courbe voltampérométrique et ses grandeurs Caractéristiques

#### I.10.7.2. Chronoampérométrie :[38]

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 Cottrelcomme suit :

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

Où :

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

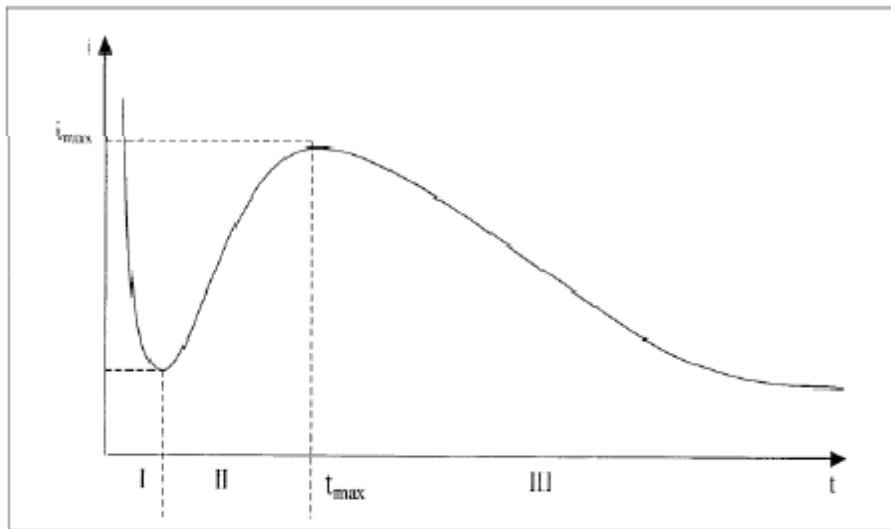
$D$  : coefficient de diffusion,  $C$  : concentration,  $t$  : temps.

Le schéma théorique 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.



**Figure I.19** : Schéma théorique de la courbe courant-temps pour  
La germination tridimensionnelle

# ***CHAPITRE II***

## ***MATÉRIAUX ET TECHNIQUES 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.

**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.

Acier A60	Fe	Ni	C	Mn	Cu	Si
	Bal	<0,03	0,1	0,231	0,119	0.044

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

**II.2.2. Dépôts réalisés :**

Le matériau de projection utilisé est un alliage à base inox X6CrNi18-8, 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. La qualité première des aciers

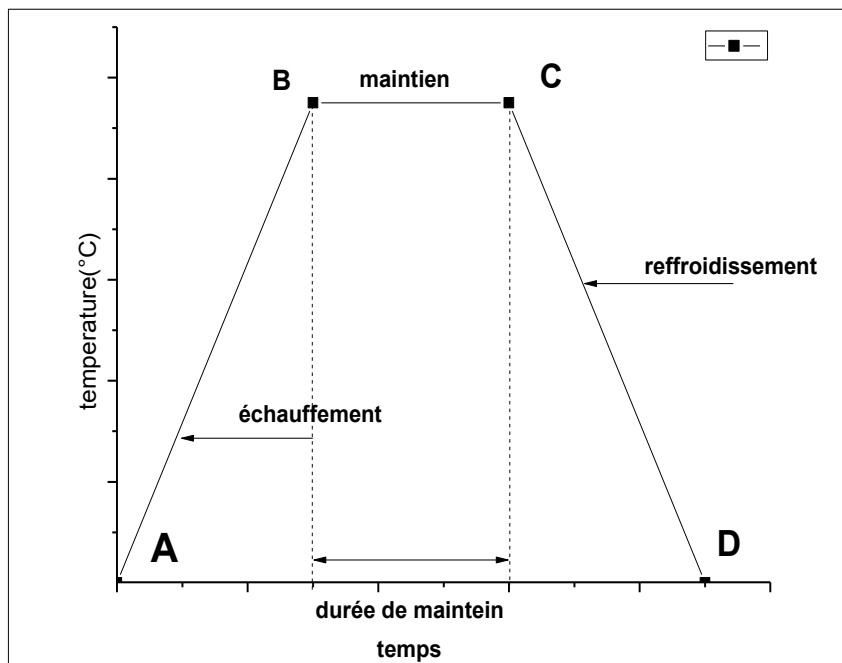
inoxydables est leur tenue à la corrosion, il convient de rappeler qu'ils peuvent par traitement thermique approprié acquérir des caractéristiques mécaniques supérieures dont une grande dureté, ce qui permet des économies de matière et un allégement des structures.

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 950 C°

Est on laisse les échantillons refroidir a 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 (une heure).
- CD : Refroidissement avec une vitesse lente (à l'air).

#### II.4. Caractéristique chimique de notre dépôts utilisé X6CrNi18-8 :

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

Eléments	Fe	Cr	C	Si	Ni	Mn	P
<b>Pourcentage massique (%)</b>	Balance	18	0.06	0.63	8	0.41	0.011

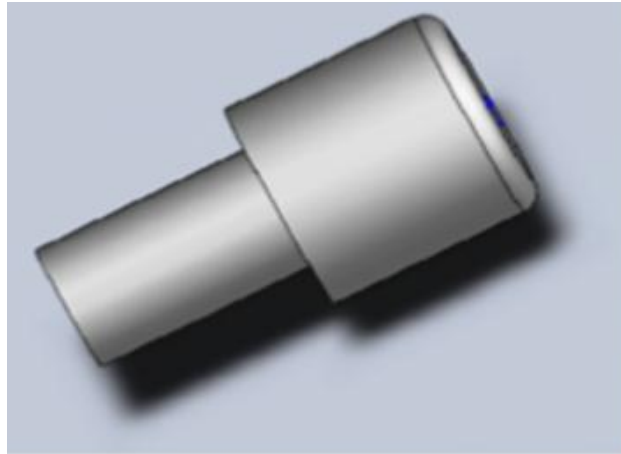
**Tableau II.2** : Composition chimique (en % massique) de l'acier inoxydable X6CrNi18-8

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 m2.s-1
structure cristalline : - forme $\alpha$ : - forme $\gamma$	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

**Tableau II.3** : Propriétés thermo physiques et mécaniques de l'acier inoxydable X6CrNi18-8

**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 chan freinage, 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.4 suivant :

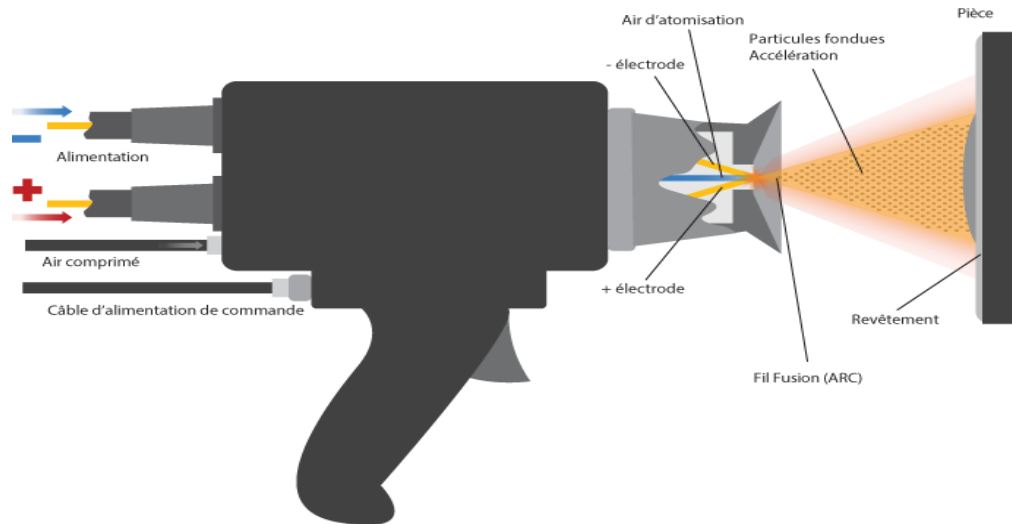
<b>Paramètres de projection Matériaux De projection</b>	<b>X6CrNi1 8-6</b>
Pression de projection	3 (bar)
Tension du générateur	30 (V)
Intensité du courant	100 (A)
Distance de projection	supérieures à 5 m
Angle projection	90°

Tableau II.4: Paramètres de projection utilisé

### **II.6.2. Procédé d'élaboration des revêtements par la projection arc-électrique :**

Dans ce procédé, deux fils constitués du matériau à projeter servent d'électrodes aux bornes desquelles une tension continue de 25 à 40 V est appliquée, ce qui crée un arc à leurs extrémités. Un gaz d'atomisation soufflé entre les deux fils permet de détacher la partie fondue sous forme de gouttelettes puis de les transporter jusqu'au substrat. Les taux de déposition sont élevés (jusqu'à 20 kg.h<sup>-1</sup>) et les dépôts réalisés sont épais (0,5 mm à 3 mm).

Les matériaux projetés doivent être conducteurs électriques et très filables (zinc, aluminium, cuivre, molybdène et acier), l'utilisation des fils fourrés constitués d'une gaine métallique ductile garnie de poudres de matériaux non-ductiles permet de réaliser des dépôts d'alliages (NiCrAl, NiMoAl, FeCrMn) ou des dépôts métalliques renforcés par des céramiques (carbures, ...)



**Figure II.3 :** Pistolet arc-électrique

### 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 mécanique

## **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.7.2. Métallographique :**

L'observation des échantillons a été réalisée à l'aide d'un microscope optique de marque «JOMO »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 (MatroxInspector), et transmis instantanément l'image qui s'affiche sur l'écran et qu'on peut stocker dans des fichiers réservés pour chaque type d'échantillons.



**Figure II.5 :** 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  $0.8 \text{ cm}^2$  de surface constituée d'un dépôt à base nickel sur un acier doux ordinaire. Le contact électrique est assuré par l'intermédiaire d'un fil conducteur, la face arrière de l'échantillon est enrobée par une résine époxy mélangée à un durcisseur de manière à laisser exposer au milieu corrosif que la surface du dépôt de nickel.

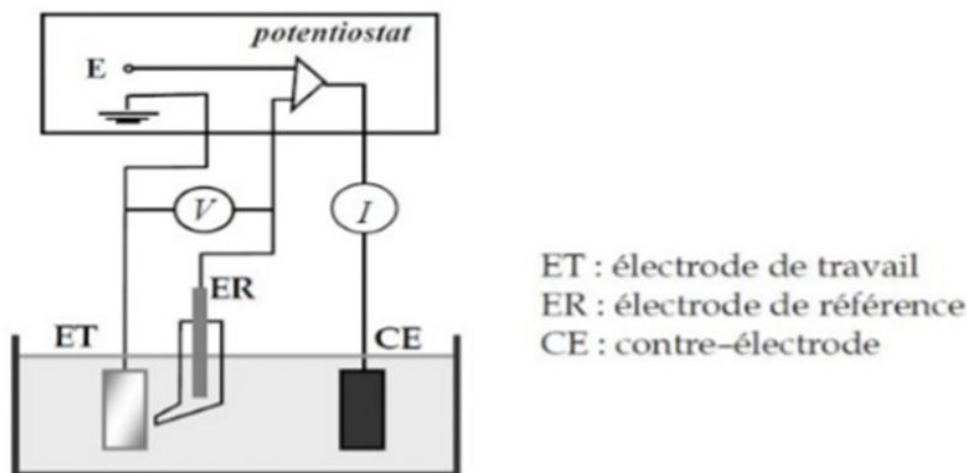
**II.8.2. L'électrode de référence :**

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

$\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}$  saturé. La demi-équation d'oxydoréduction associée au couple  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{Hg}$  est :  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2(\text{s}) + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg}(\text{l}) + 2\text{Cl}^-$  L'électrode de référence utilisée est de marque Radiometer analytical son potentiel par rapport à l'électrode normale à hydrogène à  $25^\circ\text{C}$  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.6 :** 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  $\pi$  qui lui est 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 contrôlées par une cinétique d'activation suivant la loi de Butler-Volmer

$$I = i_{COR} \left[ e^{\frac{\beta a \alpha_a n_a F \pi}{RT}} - e^{\frac{-\beta c \alpha_c n_c F \pi}{RT}} \right]$$

Où  $i_{COR}$  est la densité du courant de corrosion,  $\alpha_a$  et  $\alpha_c$ , les coefficients de transfert de charge anodique et cathodique,  $\pi$  la polarisation de l'électrode.

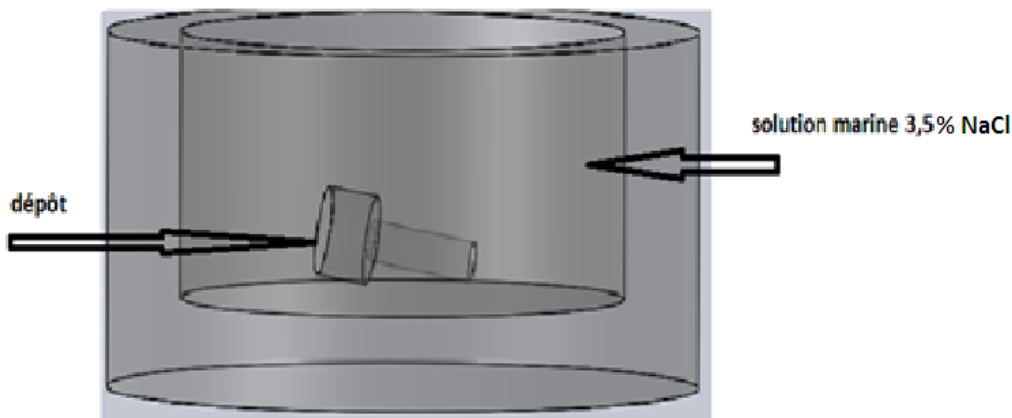
Le tracé en coordonnées semi logarithmiques laisse apparaître, loin de corrosion, l'existence de deux branches linéaires, dites droites de Tafel. Les pentes de ces deux droites, ou coefficients de Tafel  $\beta_a$  et  $\beta_c$ , et la densité du courant de corrosion sont représentatives du mécanisme 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. Procédure d'oxydation :

Les échantillons ont été pesés sur une balance de marque pionner et de type OHAUS ayant une précision de 0.1 mg, avant l'immersion dans la solution salée (3,5% NaCl), après une nouvelle pesée permet de noter une variation de masse due au phénomène d'oxydation. Figure II.7

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



**Figure II.7 :** Procédure de corrosion.

### II.10. Test d'usure :

#### II.10.1 Principe du teste d'usure :

Afin de suivre le comportement à l'usure des différents échantillons aux dépôts réalisés, on a fait subir aux échantillons des essais de masse par abrasion en fonction de temps. Ces derniers sont réalisés en jouant sur trois paramètres qui influent sur l'usure à savoir : la charge, le temps et la vitesse.

#### II.10.2 La perte de masse relative :

C'est une méthode d'analyse quantitative qui consiste à faire fonctionner un mécanisme pendant un temps connu puis à extraire la pièce à étudier et à la peser afin de déterminer sa perte de masse. La précision de la mesure effectuée peut être de l'ordre du dixième de milligramme.

$$\text{Perte de masse(\%)} = [\text{perte de masse(g)} / \text{masse initiale}] \times 100.$$

Après chaque essai d'usure, on mesure la température entre le dépôt et le substrat et ça, est effectué à l'aide d'un thermomètre à distance.

### II.1.10.3. Représentation du dispositif d'usure :

Afin d'assurer les tests d'usure, on a élaboré un dispositif qui comporte une tige articulée à son extrémité, et au milieu un poids qui permet de mettre l'échantillon en contact sous charge maîtrisée avec le cylindre tournant à une vitesse qu'on peut manipuler (de 90tr /min jusqu'à 180tr/min), tout le dispositif est monté sur un tour. Voir (figure II.8)

Le dispositif d'usure utilisé a été réalisé au niveau du Hall de technologie de l'université de Bejaia.

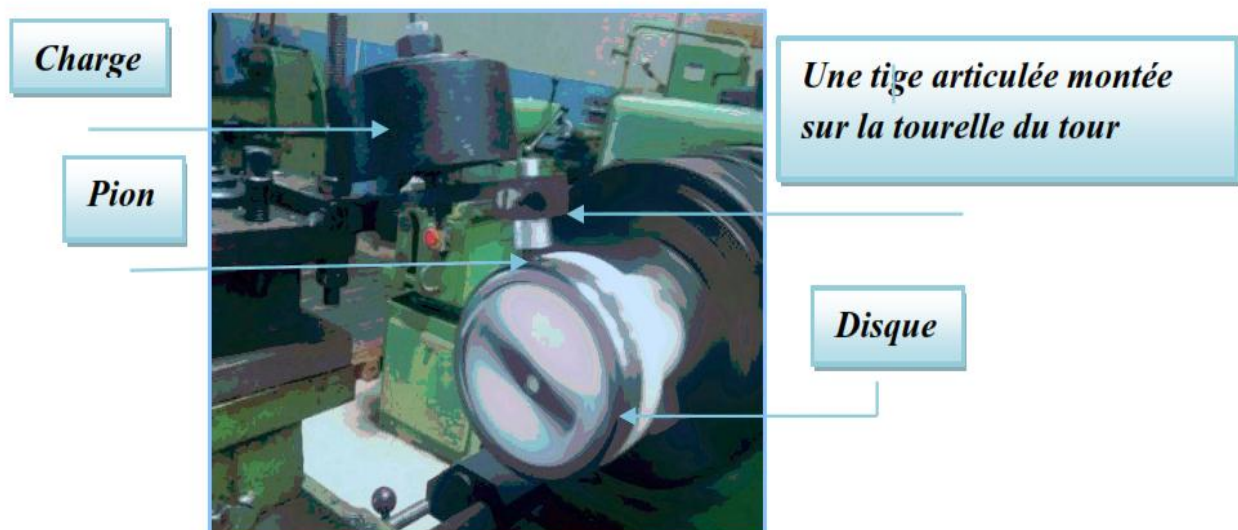


Figure II.8 : Représentation du dispositif d'usure utilisé.

### II.1.10.4. Optimisation et réalisation du test d'usure :

Afin de réunir toutes les conditions nécessaires pour la réalisation de tests d'usure significatifs soutenue par l'obtention de résultats fiables permettant une comparaison du comportement en matière de perte des masses des échantillons. Nous avons essayé de gérer les paramètres influents sur l'usure comme suit :

Avant de commencer les tests, on doit nettoyer notre échantillon des éléments additifs.

- prendre la masse initiale ( $M_0$ ) de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique de précision 0,1 mg ;
- Nettoyer le cylindre monté sur le mandrin ;
- Introduire l'échantillon dans le dispositif, et actionner le tour ;
- Après la fin du temps de chaque essai, on mesure la température à l'aide d'un thermomètre (figureII.10), et nettoie l'échantillon des additifs tout en prenant la nouvelle valeur de sa masse ( $M_1$ ).
- Observation des phénomènes d'usure à l'aide d'un microscope optique



**FigureII.9** : Thermomètre Laser.



**Figure II.10.**balance analytique

### A) Les charges appliquées

On a appliqué des charges lors des tests d'usure pour les différents échantillons : les charges appliquées (5 N, 30 N).

### B) La vitesse

Le travail s'est effectué à deux vitesses pour chacune des charges appliquées à savoir :

- à 90 tr/min ;
- à 180tr/min.

### C) La lubrification

Les tests d'usure ont été réalisés sans lubrification.

# ***CHAPITRE III***

## ***RÉSULTATS ET DISCUSSIONS***

**III.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, on présentera en premier lieu l'analyse structurale basée sur la diffraction des rayons X (DRX) qui nous permet d'identifier la nature des phases présentes dans les dépôts réalisés.

En second lieu on passera au test d'usure et la détermination du coefficient de perte de masse en fonction de temps pour deux charges différentes 5 et 30 N et deux vitesses différentes 0.5 m/s et 1 m/s.

Ensuite on passera à l'étude de corrosion des deux dépôts en les mettant dans l'eau de mer (NaCl) et mesurer chaque échantillon pour des durées différentes.

**III.2. Analyse structurale par diffraction des rayons X :**

L'analyse par diffraction des rayons X a été effectuée pour identifier les types d'oxydes formés après oxydation. Le spectre de DRX de l'acier inoxydable 18-8.

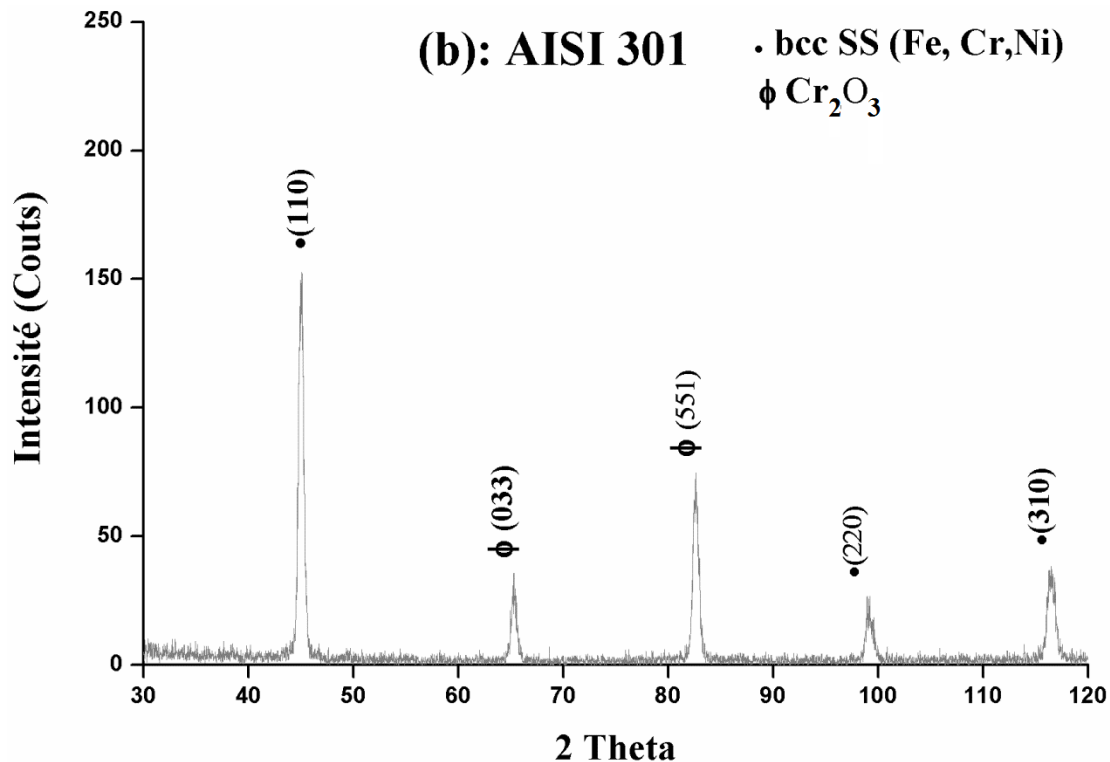


Figure III.1. Spectre de diffraction de l'acier inox 18-8.

Cette figure montre la présence des pics de grandes intensités qui correspondent aux oxydes de chrome du fer le spectre de diffraction de rayons X de l'acier inoxydable 18-8, révèle la composition de l'acier qui est constitué du fer, du chrome et du Nickel.

### **III.3. Perte de masse des deux dépôts (test d'usure) :**

Dans ce qui suit, on présentera les résultats des essais de perte de masse en fonction des charges appliquées aux différents dépôts obtenus par projection thermique à l'arc électrique. Elle est calculée comme suit :

$$\mathbf{M(\%) = \Delta M / M_0 \%}$$

Tel que :  $\Delta M = M_0 - M_1$

$M_0$ : masse initiale.

$M_1$ : masse finale.

Les valeurs obtenues sont représentées dans les tableaux cités en annexe.

Pour une meilleure compréhension des phénomènes qui les régissent, nous avons effectué une étude comparative entre les deux revêtements en termes de perte de masse en fonction de temps en appliquant deux vitesses différentes (90 et 180 tr/min) et deux masses différentes (5 et 30 N).

## III.3.1. Graphes des Dépôts sans traitement thermique (ST) :

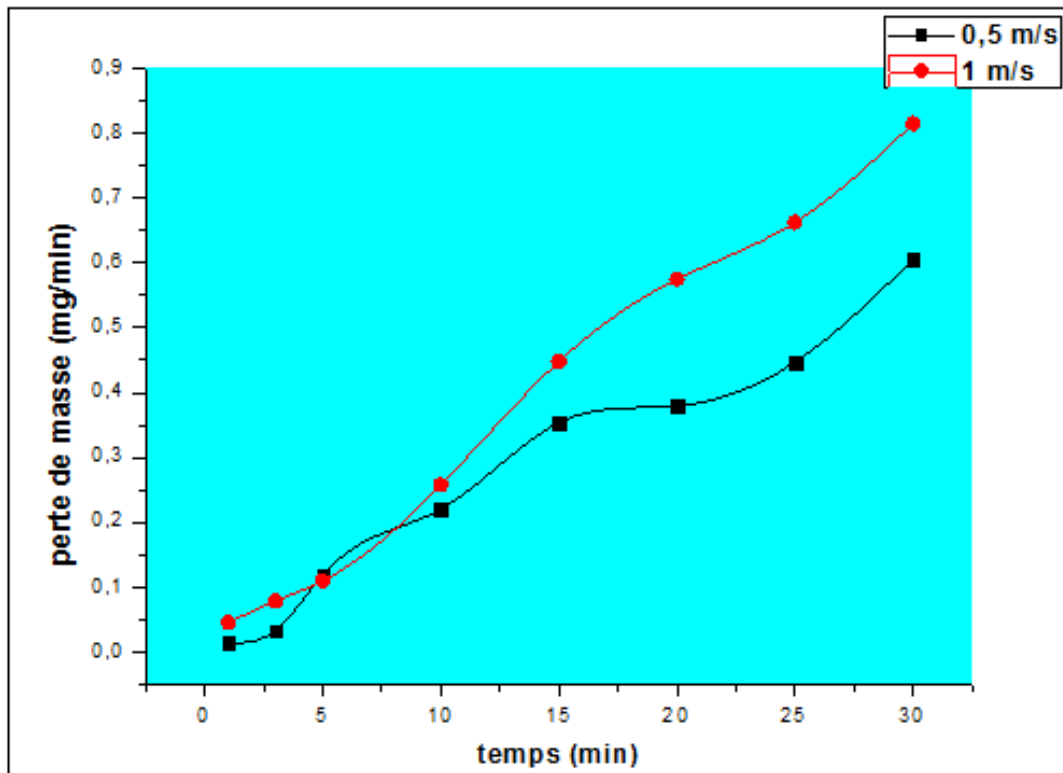


Figure III.2. Perte de masse en fonction du temps (5N)

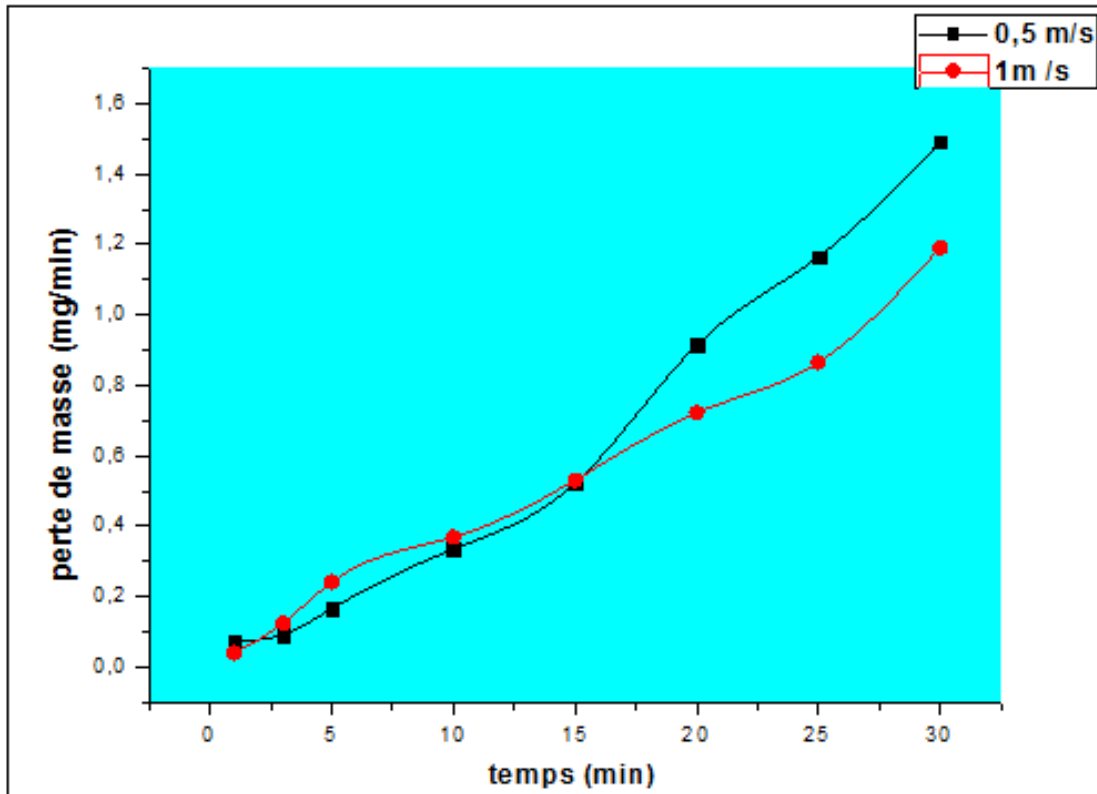
D'après ces deux courbes, on remarque que la perte de masse augmente avec l'augmentation du temps de frottement.

La courbe en rouge montre que l'augmentation de la vitesse accélère la perte de masse en fonction de temps.

Les valeurs minimales à  $t_{\min}=1$  min sont de l'ordre 0,04% pour la courbe rouge et 0,01% pour la courbe noire.

A  $t_{\max}=30$ min la perte de masse est maximale pour chaque courbe, pour la courbe rouge (1 m/s) elle est de l'ordre 0,8% et 0,6% pour la courbe en noir (0,5 m/s).





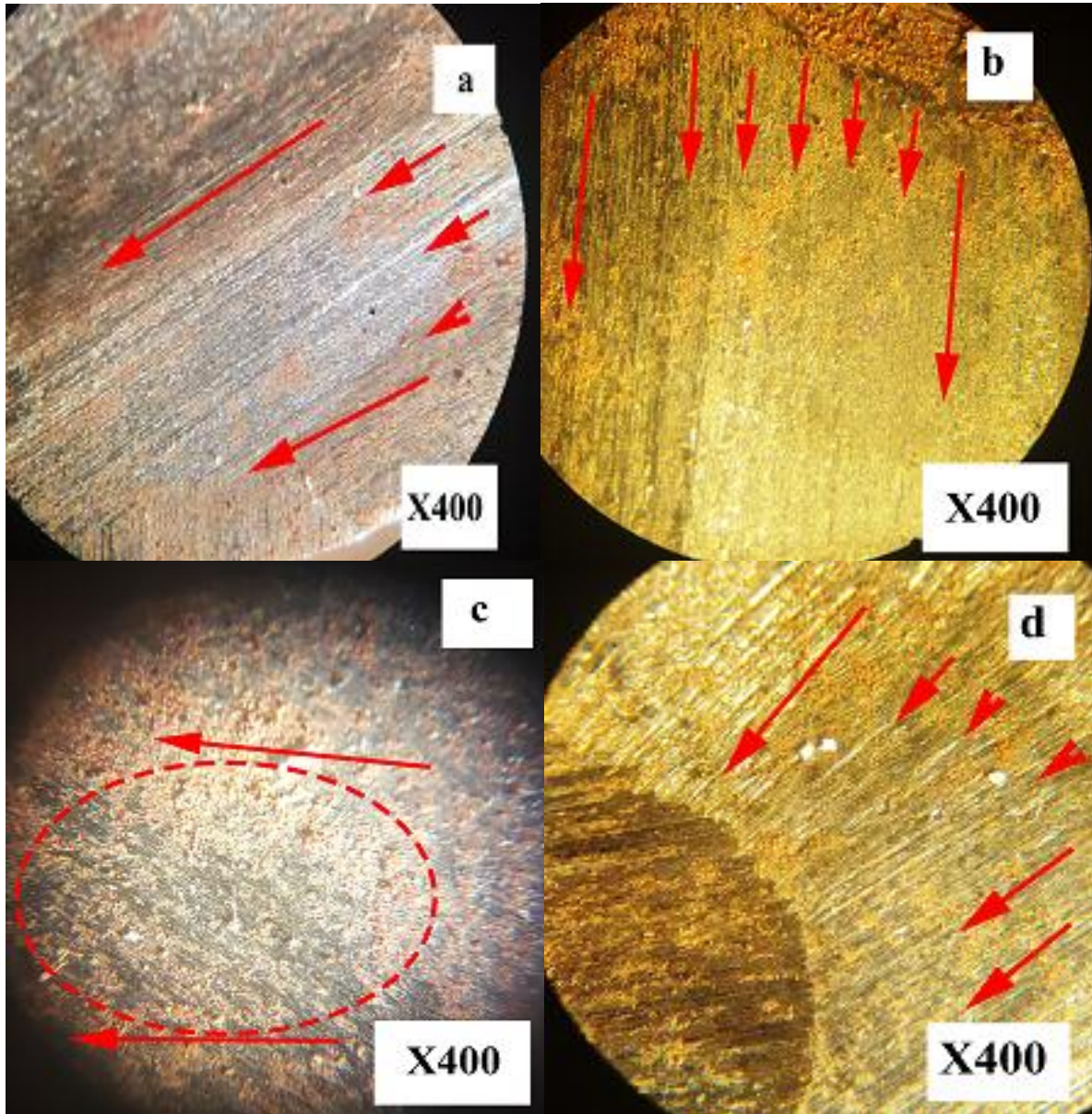
**Figure III.3.** Perte de masse en fonction du temps (30N)

On a varié la charge à 30N, on remarque une perte de masse plus importante par rapport l'essai précédente (5N), et par contre cette fois la perte de masse de la courbe noir (0.5 m/s) est plus élevée par rapport la courbe rouge (1 m/s).

A  $t_{\min}=1\text{min}$  la perte de masse de l'ordre 0.07% pour la courbe noir (0.5 m/s) et 0.04% pour la courbe en rouge (1 m/s).

A  $t_{\max}=30\text{min}$  la perte de masse est de l'ordre 1.49% pour la courbe noir (0.5 m/s) et 1.19% pour la courbe en rouge (1 m/s).

## III.3.2. La Microstructure des dépôts sans traitement thermique (ST) :



**Figure III.4.** Microstructure des dépôts sans traitement thermique après l'essai de l'usure.

Dépôts	Charge appliqué (N)	Vitesse de frottement (tr/min)
<b>a</b>	<b>5</b>	<b>90</b>
<b>b</b>	<b>30</b>	<b>90</b>
<b>c</b>	<b>5</b>	<b>180</b>
<b>d</b>	<b>30</b>	<b>180</b>

**Tableau III.1 : les charges et vitesses appliques pour les dépôts sans traitement thermique**

Les observations métallographiques effectuées au niveau des dépôts issus de l'acier inoxydable X6CrNi18-8 sans traitement thermique, nous montre que la morphologie de chaque échantillon :

- **Dépôt a (5N, 90tr/min):**

L'usure de la surface est très faible dans ce cas, on remarque la formation des petits striés douce convergés sur la surface résultant des deux plus petites charges et vitesses utilisé.

- **Dépôt b (30N, 90tr/min):**

On augmentant la charge à 30N l'observation microscopique nous montre la formation du mini zones à la surface de dépôt sur la forme des petits champignons.

- **Dépôt c (5N, 180tr/min) :**

Dans ce cas on a doublé la vitesse a 180tr/min on observe la formation des mini creusements sur la surface frotté.

- **Dépôt d (30N, 180tr/min):**

Avec une charge de 30N et une vitesse de 180tr/min on remarque la formation des striés plus importantes et profonde sur la surface qui cause une usure plus grande dans ce cas.

## III.3.3. Dépôts traité à 950°C :

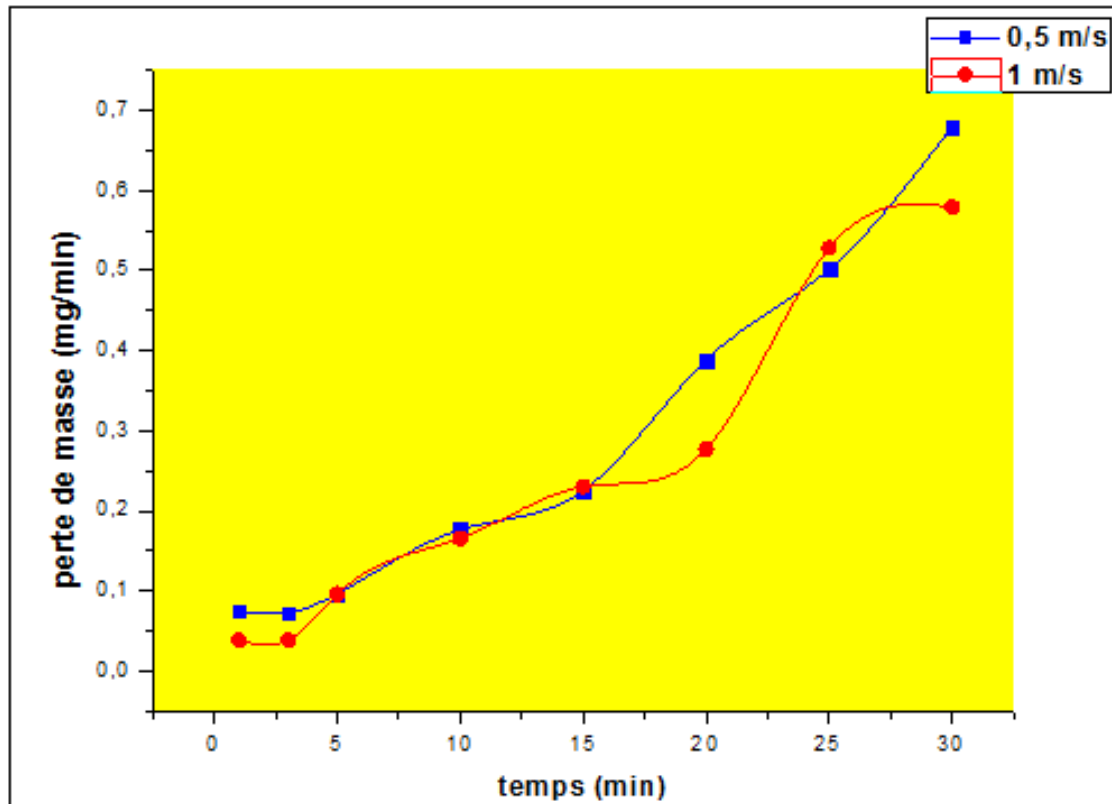


Figure III.5. Perte de masse en fonction du temps (5N)

Pour ces graphes on remarque une augmentation significative de la perte de masse en fonction du temps de glissement.

Aucune influence de la vitesse de glissement sur le comportement tribologique de nos échantillons.

- Pour  $t_{\min}=1$  min la perte de masse est de l'ordre 0.07% pour la courbe en bleu (0.5 m/s) et 0.03% pour la courbe en rouge (1 m/s).
- Pour  $t_{\max}=30$  min la perte de masse est de l'ordre 0.67% pour la courbe en bleu (0.5 m/s) et 0.57% pour la courbe en rouge (1 m/s).

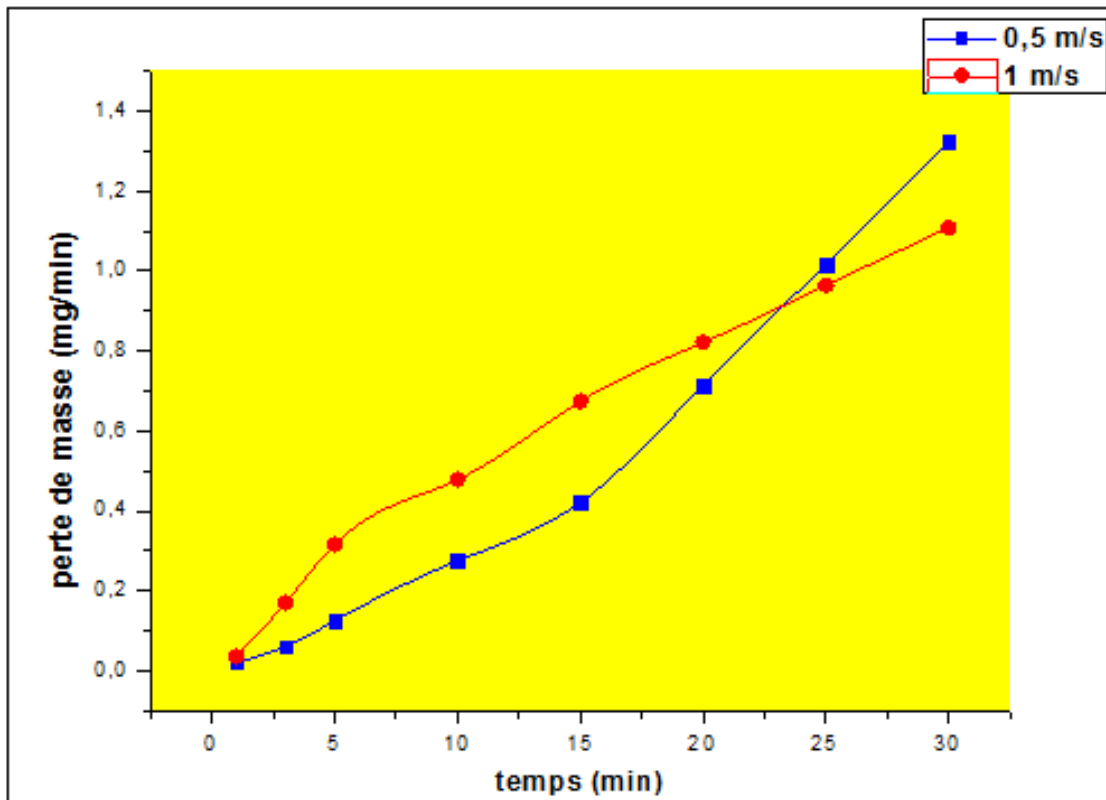


Figure III.6. Perte de masse en fonction du temps (30N)

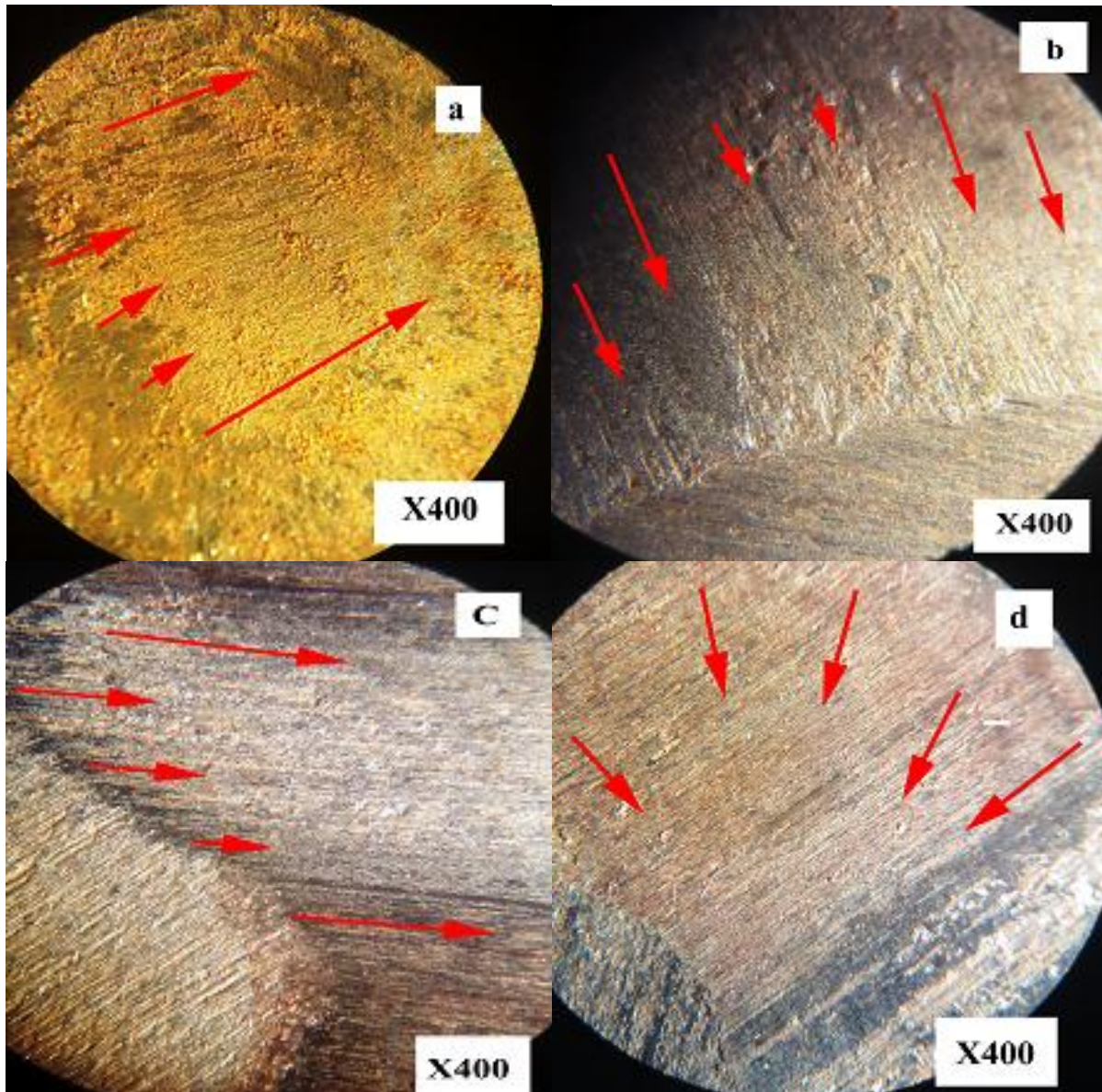
Même essai précédente mais avec une charge de 30N, on remarque une perte de masse plus importante par rapport l'essai (5N) et un peu harmonique en fonction de temps pour les deux courbes.

- Pour  $t_{\min}=1$  min la perte de masse est de l'ordre 0.02% pour la courbe en bleu (0.5 m/s) et 0.03% pour la courbe en rouge (1 m/s).



- Pour  $t_{\max}=30\text{min}$  la perte de masse est de l'ordre 1.32% pour la courbe en bleu (0.5 m/s) et 1.1% pour la courbe en rouge (1 m/s).

### III.3.4. La Microstructure des dépôts traités à une température de 950°C :



**Figure III.7.** Microstructure des dépôts traités à 950°C après l'essai de l'usure.

Dépôts	Charge appliqué (N)	Vitesse de frottement (tr/min)
A	5	90
B	30	90
C	5	180
D	30	180

**Tableau III.2** : les charges et vitesses appliques pour les dépôts traités à 950°C.

La morphologie des dépôts issus de l'acier inoxydable X6CrNi18-8 traité à 950°C Après une observation métallographique :

- **Dépôt a (5N, 90 tr/min):**

Les traces d'usure commencent à apparaitre sous la forme des stries avec un enlèvement de la matière très faible.

- **Dépôt b (30N, 90 tr/min) :**

On a augmenté la charge à 30N, on remarque La formation des stries sur la surface frottée avec un faible enlèvement de matière.

- **Dépôt c (5N, 180 tr/min):**

Dans ce cas on a augmenté la vitesse à 180 tr/min, on peut voir clairement les stries qui sont devenus plus larges et plus profondes avec un enlèvement de matière plus important.

- **Dépôt d (30N, 180 tr/min):**

Pour une charge de 30N et une vitesse de 180 tr/min, on remarque un grand enlèvement de matière sur la zone frotté et la formation des stries très rapprochées et profonde sur la surface.

### III.4. Morphologie de la corrosion :

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 7 jours, 14 jours et 21 jours, 28 jours et à la fin des immersions, on présentera la perte de masse relative sous forme d'un histogramme pour les deux échantillons non traité et traité à 950°C.

#### III.4.1. Métallographie des deux dépôts :

On présente la perte de masse sous forme d'un histogramme pour les différents échantillons non traité et traité avec l'observation microscopique

##### a- Métallographie des dépôts après 7 jours :

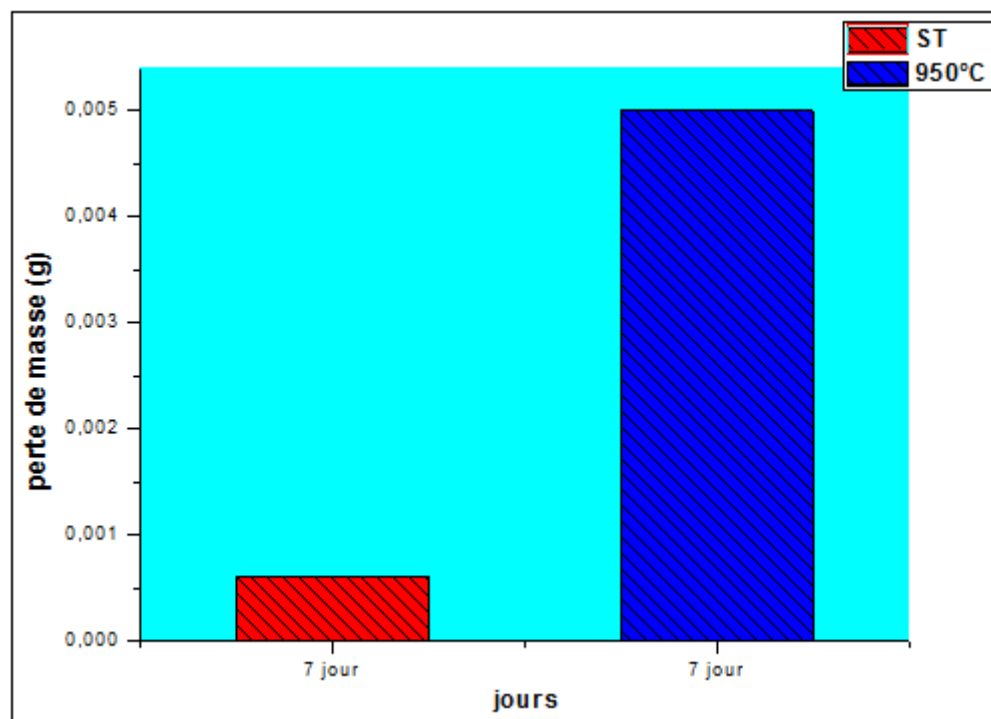


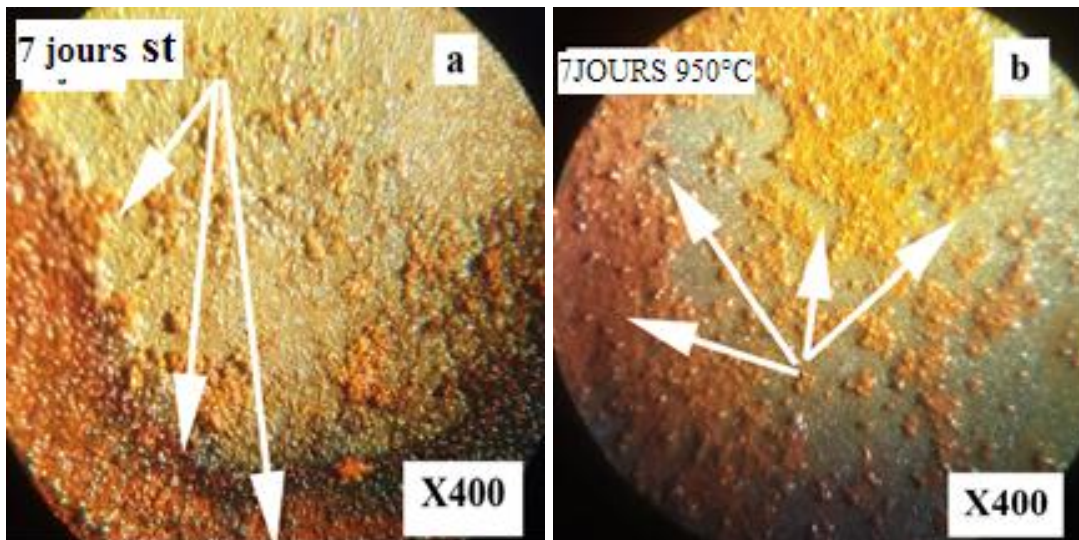
Figure III.8. La perte de masse des échantillons à 7 jours.



D'Après la figure (III.7) on remarque qu'en termes de perte de masse que l'échantillon traité à 950°C à une valeur plus importante qui atteint 0.005g, alors que l'échantillon non traité (ST) et une de valeur 0,0005g moins importante que l'échantillon traité à 950°C.

- Nous avons fait des micrographies sur le microscope optique pour effectuer une analyse des surfaces.

L'observation au microscope optique des différents échantillons après 7 jours du test électrochimique, nous montre les microstructures suivant :



**Figure III.9. :** Microstructure des différents échantillons obtenus après 7 jours.

**a:** non traité (ST) ; **b:** traité à 950°C

D'après la figure (III.8- a) échantillon non traité : on remarque l'apparition de couche de corrosion dans l'extrémité de la surface corrodé avec une couleur rouge brique qui résulte de l'existence d'oxyde de fer II ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

D'après la figure (III.8- b), on remarque pour l'échantillon traité à (950°C), l'apparition de deux type de couches de corrosion sur toute la surface corrodé de la pièce, une de couleur jeune qui résulte de la présence d'oxyde de fer III ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), et une autre de couleur rouge qui résulte de la présence de l'oxyde de fer II ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

L'échantillon traité 950 °C a créé deux types d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ce qui explique que cet échantillon traité a créé une couche d'oxyde de chrome qui lui permet de protéger sa surface.

La couche d'oxyde qui est formée au niveau de la surface de l'échantillon traité à 950°C, est appelée le film passif et riche en chrome, celle-ci consiste à avoir un rôle protecteur grâce à la formation d'une couche d'oxyde de chrome.

#### b- Métallographie des dépôts après 14 jours :

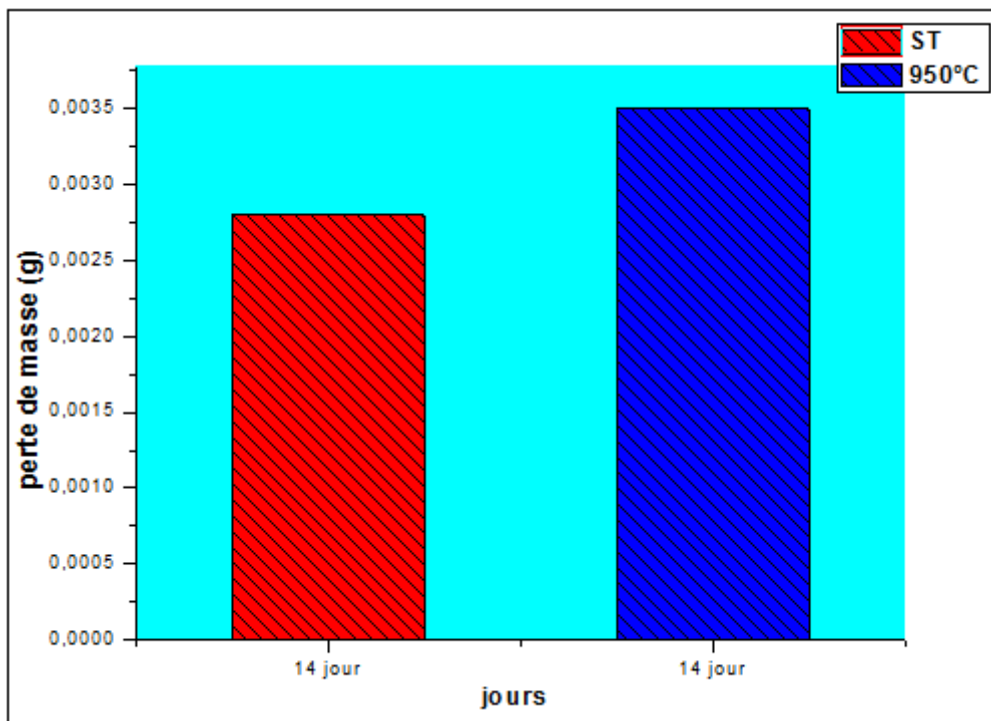


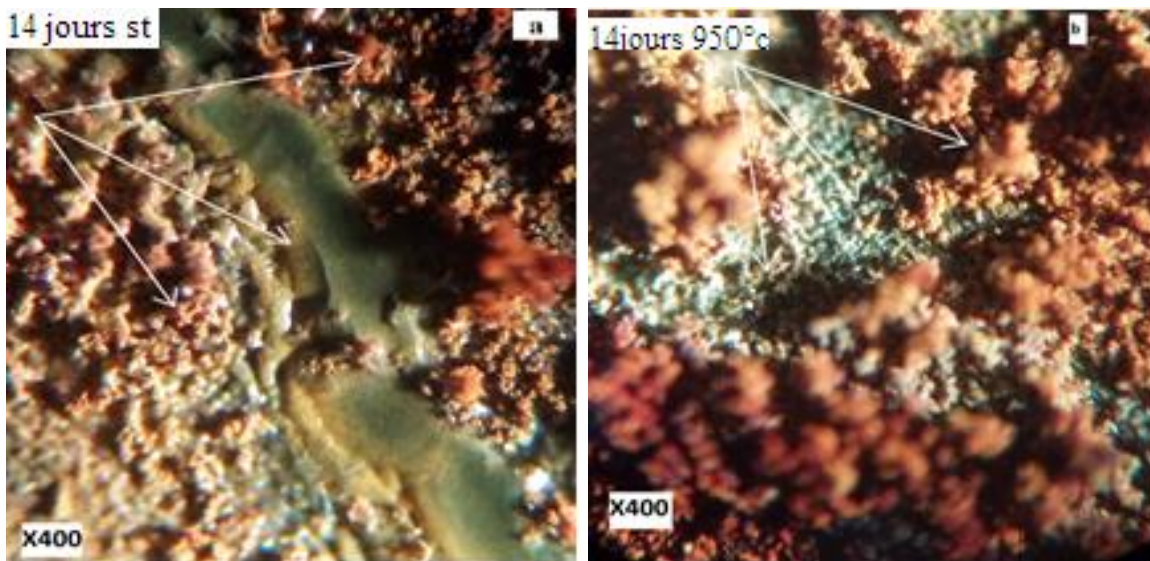
Figure III.10. : La perte de masse des échantillons à 14 jours.

D'après la figure(III.9) on remarque qu'en termes de perte de masse que l'échantillon traité à 950°C montre une diminution de la perte de masse de 0,005g jusqu'à 0,0035g par rapport au test

précédent, en revanche l'échantillon non traité (ST) a marqué une augmentation de perte de masse de 0,0005g jusqu'à 0,0027g par rapport au test de 7 jours.

On souligne aussi d'après ces histogrammes que l'échantillon traité à 950°C sa perte de masse est plus élevée (0,0035g) comparant à l'échantillon non traité (0,0027g).

L'observation au microscope optique des différents échantillons après 14 jours du test électrochimique, nous montre les microstructures suivant :



**Figure III.11.** : Microstructure des différents échantillons obtenus après 14 jours.

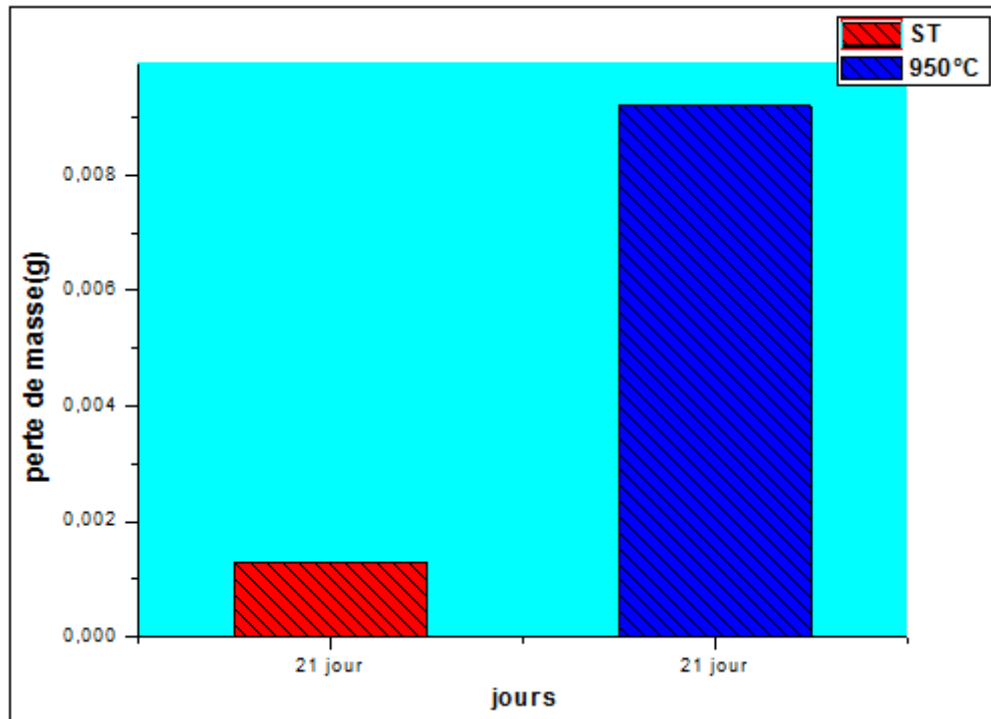
**a:** non traité (ST) ; **b:** traité à 950°C

D'après la figure (III.10-a) échantillon non traité : on remarque l'augmentation de l'épaisseur des couches de corrosion dans la surface par rapport au test précédent, on observe aussi l'apparition de film d'oxyde de chrome non homogène avec la couleur vert.

D'après cette figure (III.10-b) on remarque la morphologie de échantillon traité a 950°C que la densité de la couche d'oxydation est augmenté par rapport au test précédent à 7 jours, ainsi que le film d'oxyde de chrome.

On constate que l'échantillon non traité a créé aussi une couche de film d'oxyde de chrome mais moins homogène par rapport à l'échantillon traité à 950°C.

**c- Métallographie des dépôts après 21 jours :**



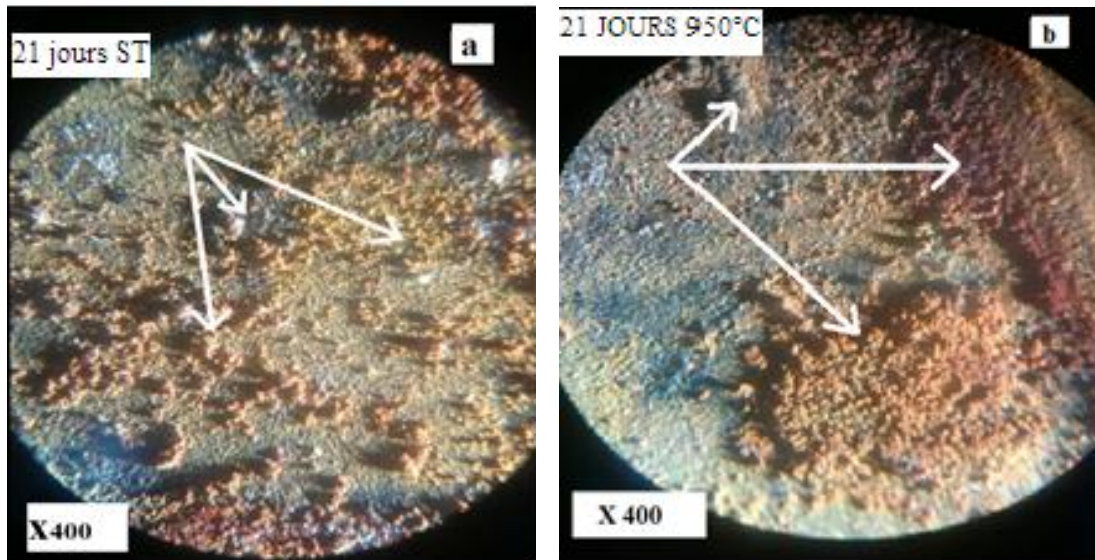
**Figure III.12.** La perte de masse des échantillons à 21 jours.

D'Après la figure (III.11) on remarque qu'en termes de perte de masse d'échantillon traité à 950°C a augmenté de 0,0035g jusqu'à 0,009g par rapport au deux test précédent, en revanche l'échantillon non traité (ST) sa perte de masse a chuté de 0,0027g jusqu'à 0,0017g par rapport au test de 14 jours par contre par rapport au 1<sup>er</sup> test il est mieux.

On conclue d'après ces histogrammes que l'échantillon traité à 950°C sa perte de masse a augmenté de nouveau après une petit dégradation dans le teste précédent, contrairement a l'échantillon non traité qu'est diminué encoure une fois.



L'observation au microscope optique des différents échantillons après 21 jours du test électrochimique, nous montre les microstructures suivant :

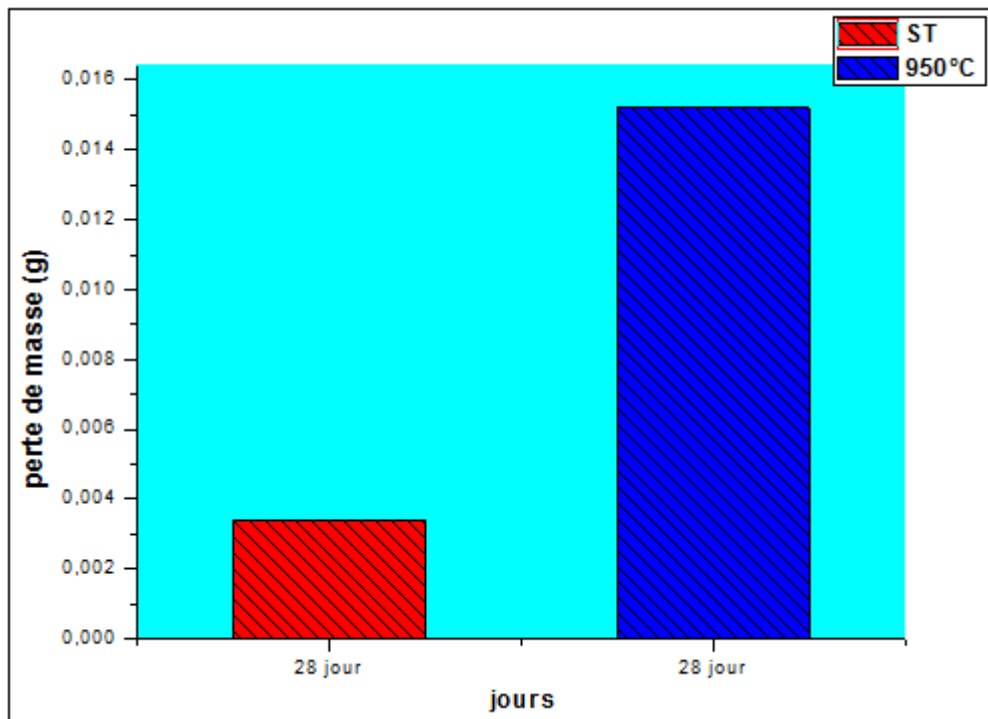


**Figure III.13.** : Microstructure des différents échantillons obtenus après 21 jours.

**a:** non traité (ST) ; **b:** traité à 950°C

La figure (III.12) nous montre que la couche d'oxyde protectrice (l'oxyde de chrome) de l'échantillon traité à 950°C et 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) d'échantillon non traité décroît par rapport au jours précédent, et l'échantillon non traité présente une densité de la couche d'oxyde protectrice (l'oxyde de chrome) faible par rapport à l'échantillon traité à 950°C. On constate que l'échantillon traité à 950°C présente une couche d'oxyde protectrice adhérente et devenue dense et à croissance par rapport au non traité qui est faible et lente en fonction de temps.

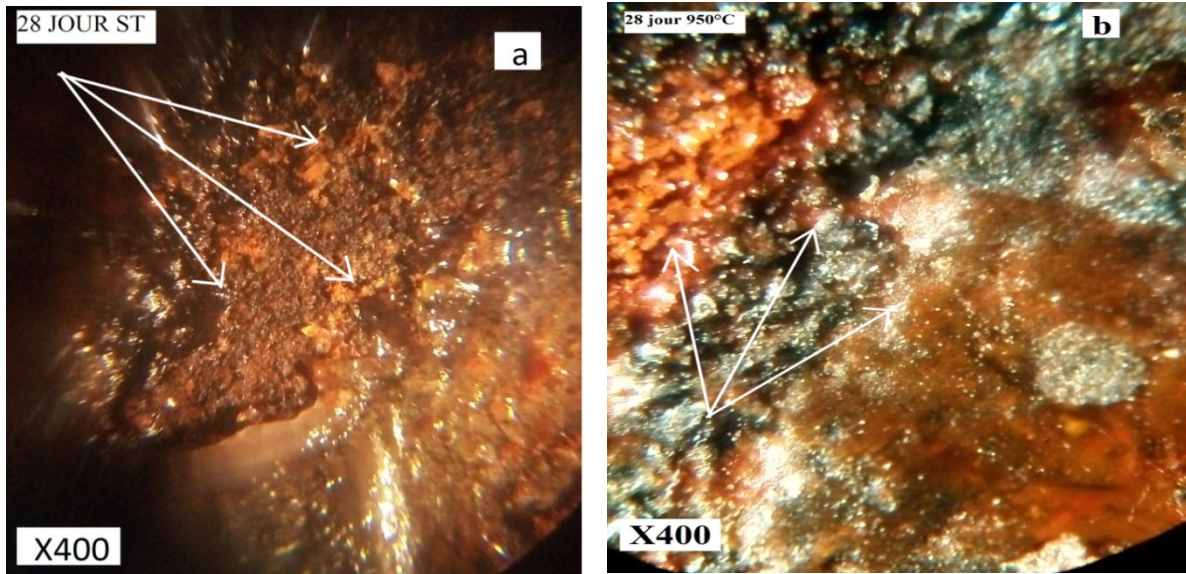
## d- Métallographie des dépôts après 28 jours :



**Figure III.14.** La perte de masse des échantillons à 28 jours.

D'Après la figure (III.13) on remarque qu'en termes de perte de masse d'échantillon traité à 950°C augmente légèrement de 0.009g jusqu'à 0.016g par rapport au test précédent, en revanche l'échantillon non traité (ST) sa perte de masse a augmenté à une valeur plus élevée de 0,0017g jusqu'à 0,0035g par rapport au test précédent.

L'observation au microscope optique des différents échantillons après 28 jours du test électrochimique, nous montre les microstructures suivant :



**Figure III.15. :** Microstructure des différents échantillons obtenus après 28 jours.

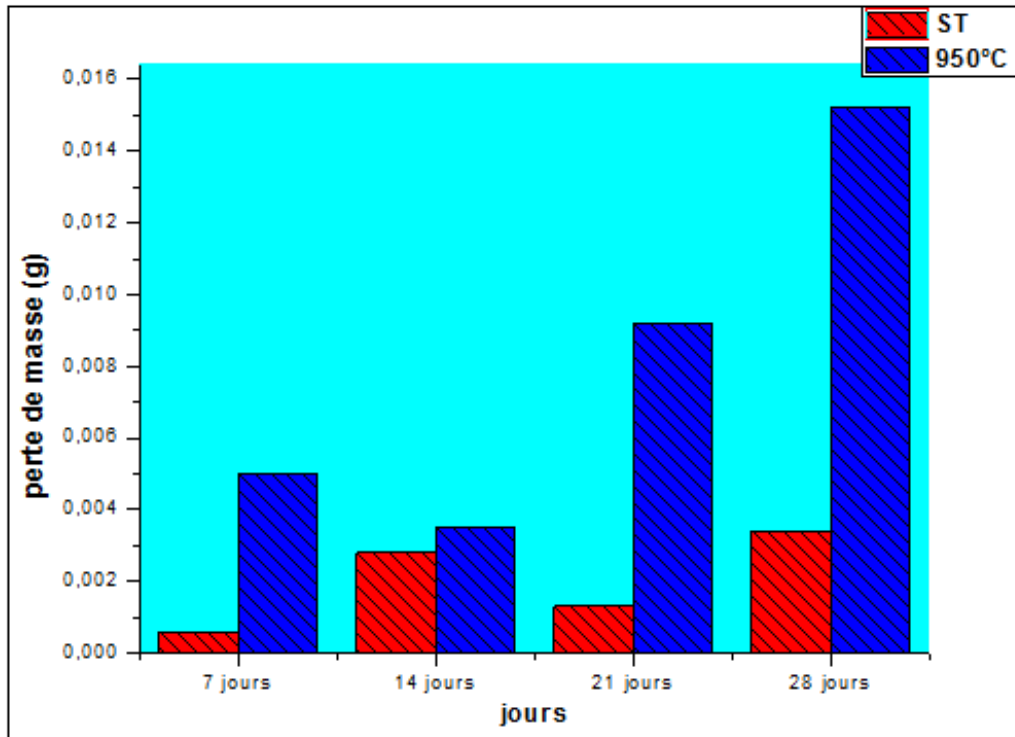
La figure (III.14) nous montre que la couche d'oxyde protectrice (l'oxyde de chrome) de l'échantillon traité (b) à 950°C et semblent être beaucoup plus denses par rapport au test précédent, on remarque que l'échantillon non traité (a) a ajouté la densité des couches d'oxydation (l'oxyde de fer II, couleur rouge), l'échantillon non traité présente une densité de la couche d'oxyde protectrice (l'oxyde de chrome) faible dans ce test.

On constate que l'échantillon traité à 950°C présente une couche d'oxyde protectrice adhérente et devenue dense et à croissance par rapport au non traité qui est faible et lente en fonction de temps.

Après 28 jours de teste de corrosion on remarque que la couche d'oxyde protectrice d'échantillon traité à 950°C ce développe en fonction de temps, autrement dit il se développe avec la densité de corrosion donc c'est une protection efficace à la corrosion.

Pour l'échantillon non traité en remarque que la couche d'oxyde protectrice elle se développe faiblement en fonction de temps.

## E - Métallographie des dépôts globale :



**Figure III.16.** La perte de masse des échantillons pendant tout le teste.

Cet histogramme global nous montre le développement de perte de masse des deux dépôts en fonction de temps :

L'immersion des dépôts pour des différents jours nous a permis de connaître l'évaluation de perte de masse pour chaque échantillon sous l'influence du phénomène de corrosion :

Pour le dépôt non traité on remarque qu'il possède un comportement plus stable en fonction de temps, une perte de masse moins de 0,001 g dans 7 jours et 0,003 g dans 28 jours

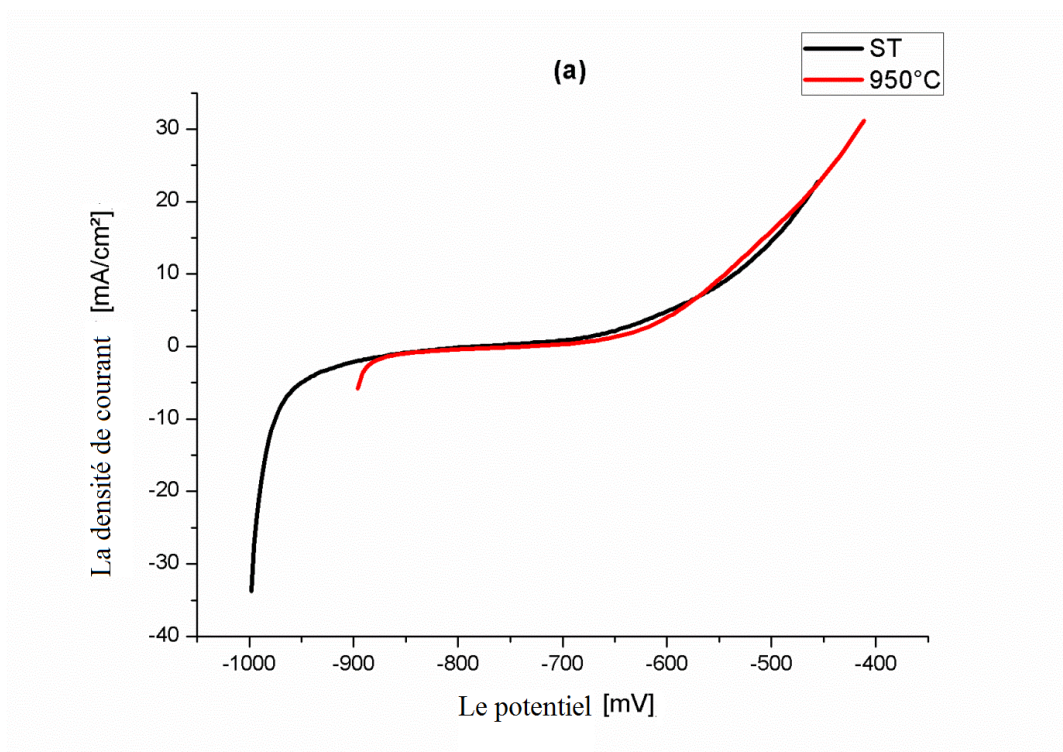
Pour le dépôt traité à 950°C on remarque une croissance de perte de masse en fonction de temps qui commence par 0,005 g dans 7 jours et finira par 0,015 g dans 28 jours.



## III.5. Les courbes anodique et cathodique :

## III.5.1. La courbe anodique:

**Anode** = électrode où se produit la réaction d'oxydation (dissolution du métal), où le courant passe du métal vers la solution.



**Figure III.17.** : Courbe linéaire globale.

La figure (III.16) présente les courbes de polarisation tracées dans le domaine anodique.

On constate 3 zones différentes dans cette courbe :

Zone un de (-1000 jusqu'à -900) : on remarque dans cette zone que quand on augmente le potentiel, la densité de courant d'échantillon non traité augmente en premier (-35 à -5 ma/cm<sup>2</sup>), par contre l'échantillon traité à 950°C ne marque aucune présence dans cette zone.

Zone deux (-900 jusqu'à -650 mA/m<sup>2</sup>) : on remarque dans cette zone l'échantillon traité à 950°C viens d'apparaître avec une augmentions faible dans la densité de courant (-5 à 0 mA/cm<sup>2</sup>), et en remarque aussi pour le non traité une augmentions très faible (-5 à 0 mA/m<sup>2</sup>), on souligne aussi un palier stable pour c'est deux échantillons avec une densité de courant (0 mA/m<sup>2</sup>).

Zone trois (-650 jusqu'à -400) : on remarque une augmentation linéaire dans la densité de courant pour les deux courbe (0 à 20 mA/m<sup>2</sup>) après en observe la stabilisation d'échantillon non traité par contre l'échantillon traité à 950°C a continué son augmentions jusqu'à 30 mA/m<sup>2</sup>.

L'examen comparatif de ces deux courbes montre que la dissolution de l'acier inoxydable non traité dans le milieu NaCl 3,5% commence bien avant l'acier inoxydable traité à 950°C.

### III.5.2. La courbe cathodique :

**Cathode** = électrode où se produit la réaction de réduction (déposition à la surface du métal), où le courant passe de la solution vers le métal.

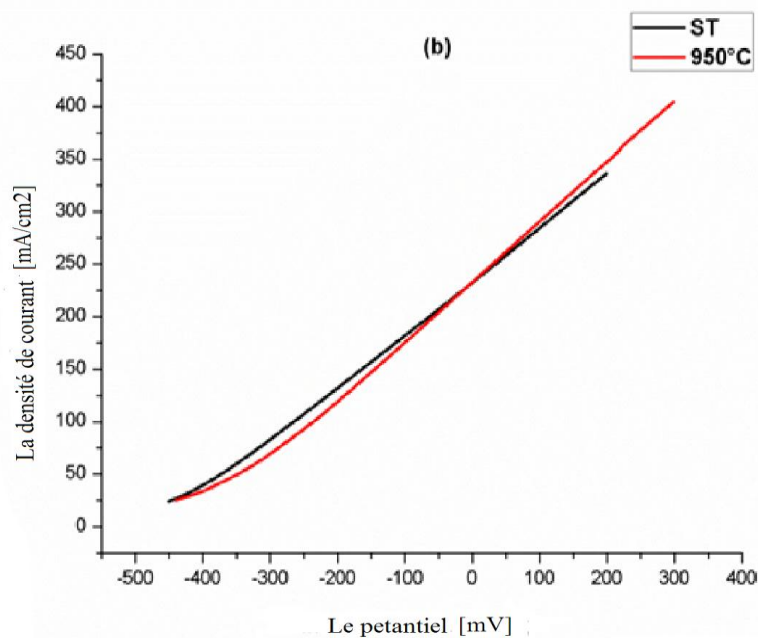


Figure III.18. : Courbe de polarisation cathodique.

La Figure (III.17) reprisant les courbes de polarisation tracées dans le domaine cathodique :

On constate la réaction de réduction de ces deux courbes qui commencent avec la même densité de courant ( $25 \text{ mA/m}^2$ ), contrairement pour le potentiel qu'en trouve l'échantillon non traité (-470) a commencé avons l'échantillon traité à  $950^\circ\text{C}$  (-440). après ce début en remarque l'augmentation linaire pour c'est deux courbes jusqu'à ( $350 \text{ mA/m}^2$ ) de densité de courant, a cette valeur en observe la densité de courant d'échantillon non traité a cessé d'augmenté et il se stabiliser, par contre l'échantillon traité à  $950^\circ\text{C}$  continue son augmentation jusqu'à ( $400 \text{ mA/m}^2$ ).

### III.6. La courbe de Tafel :

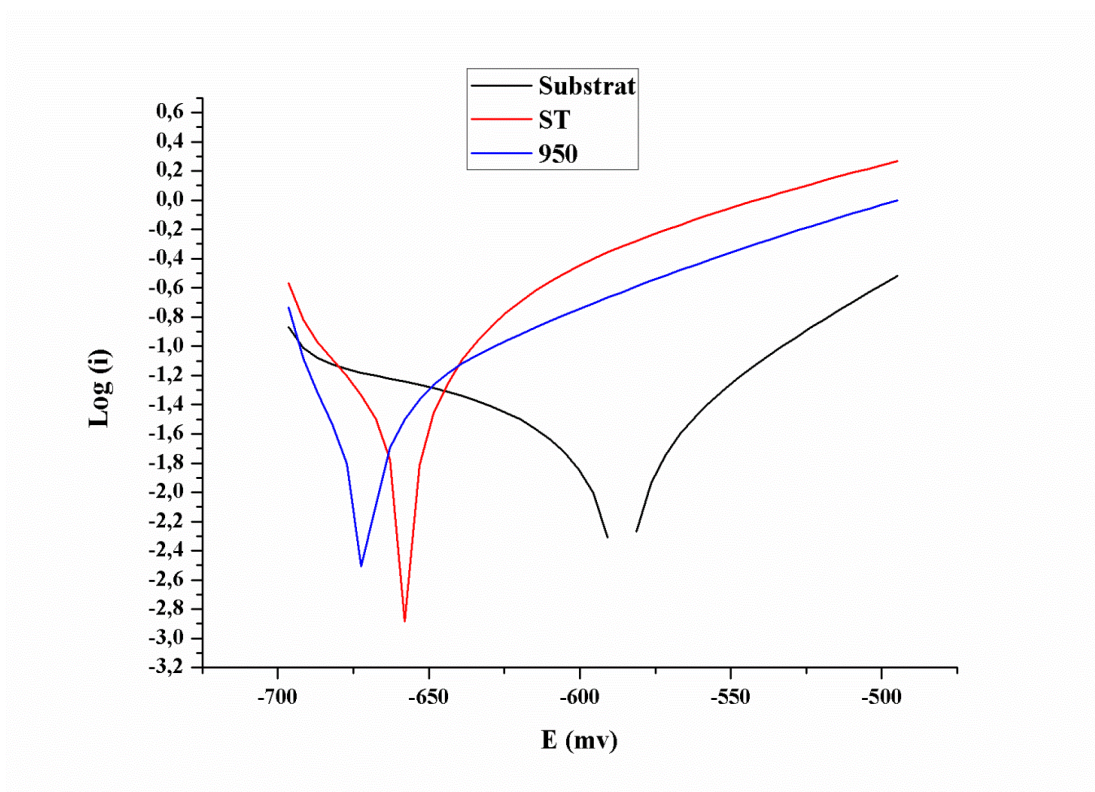


Figure III.19. : Courbe de Tafel

L'exploitation des courbes anodiques et cathodiques dans la représentation de Tafel. (Figure III.18) a permis de déterminer les paramètres de la corrosion de deux échantillons non traité et

traité à 950°C, à savoir la densité de courant de corrosion ( $I_{\text{corr}}$ ) et le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ).

Le potentiel de corrosion dans le tableau (III.3), est calculé à l'aide de la courbe précédente de Tafel (figure III.18) : 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.

Matériaux	$E_{\text{corr}}(\text{mVECS})$	$i_{\text{corr}}(\text{mA.cm}^{-2})$
Non traité	-660	2,9
Traité à 950°C	-675	2,5

**Tableaux III.3.** Le potentiel de corrosion des échantillons

Le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) des dépôts traité est déplacé vers des valeurs moins négatives, et on observe également, les valeurs de la densité de courant ( $I_{\text{corr}}$ ) d'échantillon traité à 950°C 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 non traité et l'acier simple A60, et on conclue que la polarisation est cathodique.

En comparant c'est deux échantillons traité à 950°C et non traité on trouve que l'échantillon traité à 950°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 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub> qui croît lentement grâce à un mécanisme contrôlé par la diffusion.

***CONCLUSION  
GÉNÉRALE***

## *Conclusion générale*

---

A travers les différents tests réalisés, Diffraction des rayons X, Test d'usure, Corrosion ainsi que l'observation au microscope optique on a constaté que la projection thermique est d'une importance primordiale dans la réalisation des revêtements, la récupération et la rénovation des pièces mécaniques usées,

La technique de projection thermique demeure une technique de pointe dans la réalisation de couches protectrice. 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 est une étude comparative portée sur deux échantillons d'un acier inoxydable X6CrNi18-8 l'un traite a 950°C et l'autre sans traitement.

D'après les résultats obtenus et leurs interprétations on peut conclure que :

- Les diagrammes de diffraction des rayons X du revêtement X6CrNi18-8 prouvent la présence d'une solution solide cubique centrée sur le corps (bcc) (Fe, Cr, Ni) et d'oxyde Cr<sub>3</sub>O, on remarque aussi la a formation d'une fraction d'oxydes de type Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.
- L'essai tribologique effectué sous les deux charges 5 (N) et 30 (N) et les vitesses de 90 (tr/min) et 180 (tr/min) en fonction de temps nous a révélé que :
  - La perte de masse augmente avec l'augmentation de la vitesse, et de la charge Imposée et la durée de contact.
  - Le dépôt sans traitement perd plus de masse en fonction des trois paramètres (charge, vitesse et le temps) que le dépôt traité.
  - Le dépôt traité à 950°C résiste mieux aux phénomènes de l'usure que le dépôt sans traitement.

## *Conclusion générale*

---

- 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 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 950°C présente un comportement protecteur dans le milieu d'eau de mer, ce qui prouve que le revêtement est de type cathodique.
- Le dépôt traité à 950°C présente une dureté plus grande que celle du le dépôt sans traitement.



RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

## Référence bibliographique

---

- [1] **L. Grisel**, P. Osset, L'analyse du cycle de vie d'un produit ou d'un service-Applications et mise en pratique, AFNOR, Saint-Denis France 2004.
- [2] **D.E. Sokolov**, Contribution au développement de la projection thermique a très faible pression, Thèse, Université de Franche-Comté, Belfort, France, 2009.
- [3] **A.Proner**, Revêtements par projection Thermique, (éd) Techniques de l'ingénieur, M 1645, 1999.
- [4] **A. Karimi and C. Verdon**, Hydroabrasive Wear Behaviour of High Velocity Oxyfuel Tharmally Sprayed WC-M Coating, Surf. Coat .Techno l., Vol 62, 1993, p 493-498.
- [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] **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).
- [7] **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.
- [8] **Thermal Spraying: Practice, theory and application**, committee on thermal spraying, American welding society, Miami, USA.
- [9] **M. L. Thorpe**, Thermal spray application, Advanced Materials and processes, vol. 10.
- [10] **M. Khalid Fataouiz**, "Développement de modèles thermomécaniques de construction de dépôts obtenus par projection thermique", Thèse de Doctorat, Université Chouaib Doukkalli El-Jadida, Maroc, (2007).
- [11] **J. Deruelle**, Préparation des surfaces – Introduction Techniques de l'ingénieur M1435.
- [12] **R. Jules**, études des problèmes dynamiques de contact et de frottement. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France.
- [13] **M. Vardelle, S. Bansard, P. Fauchais, C. Bossourt, F.Braillard**, journée scientifique Barriere thermique, Laboratoire science des procédés et de traitement de surface (SPCTS), UMR-CNRS 6638b (ONERA 23 mai 2002), Limoges, France.
- [14] **H.L. de Villiers Lovelock**, Power/ Processing/ Structure Relationships in WC-CO Thermal Spray Coatings: a Review of the Published Literature, Thermal Spray Technology, Vol. 7 (No.3), 1998, pp357-373.
- [15] **L. Karlsson**, Stainless Steels Past, Present and Future. 2004 ESABAB, Gothenburg, Svetsamnp. 47-52.
- [16] **M. K Ahn ; H.S Know et H.M.Lee**: Quantitative comparision of the influences of tungstène and molybden on the passivité of Fe-29Cr ferritique stainless steels,elsevier.
- [17] **D. Londolt**, Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, Traité de matériaux, Ed.
- [18] **D. Londolt**, Corrosion et chimie de surfaces des métaux, Traité des Matériaux, presses polytechnique et universitaires romandes, 3e édition, Lausanne, Suisse 2003.
-

# Référence bibliographique

---

- [19] **J. Thirion**, Protection contre la corrosion, Equipements latéraux des ponts, édition des publications CTOA, Paris NOVEMBRE 1996.
- [20] **N. Bernard, P. Nedine, R. Caroline, W. Martine**, « Prévention et lutte contre la corrosion » une approche scientifique et technique, INSA Lyon, France 2004.
- [21] **G. Kheira**, Etude de corrosion et protection des équipements de production du gaz brut à HassiR'mel, Mémoire de fin d'étude, Université KasdiMerbah Ouargla, Algérie 2015.
- [22] **B. OKBA**, Comportement à la corrosion électrochimique de l'acier 32CrMoV13 nitruré par procédé plasma, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, Algérie 2008.
- [23] **S. Boukerche**, Comportement électrochimique et électrique du cuivre dans un milieu acide (HNO<sub>3</sub>), Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie 2012.
- [24] **M. Wery**, traité Matériaux métalliques, Techniques de l'Ingénieur, M1458, 1999.
- [25] **J. P. Mercier, G. Zambelli et W. Kruz**, introduction à la science des matériaux, traité des matériaux, 3e édition entièrement revue et augmentée, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse 2002.
- [26] **G. Daufin al**, Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière, INRA Editions, France 1971.
- [27] **S Amami**, La Corrosion électrochimique, Science des matériaux, (2005).
- [28] **Christian Vargel**, Corrosion de l'aluminium, 2d. Dunod, ISBN 2-10-006569-6, (2002).
- [29] [www.tel.archives-ouvertes.fr/tel-01661402/document](http://www.tel.archives-ouvertes.fr/tel-01661402/document).
- [30] **M. Reboul**, Corrosion et protection des métaux en milieu marin, Technique de l'ingénieur, COR325.
- [31] **C. Vargel**, Corrosion de l'aluminium, Première édition, Dunod, Paris, France 1999.
- [32] [www.econologie.com/fichiers/partager3/1357466155jdSYXP.pdf](http://www.econologie.com/fichiers/partager3/1357466155jdSYXP.pdf).
- [33] **C. Vargel**, Corrosion de l'aluminium, Première édition, Dunod, Paris, France 1999.
- [34] [www.primarisk.ineris.fr/sites/default/files/GIL\\_protection\\_cathodique\\_V1\\_1.pdf](http://www.primarisk.ineris.fr/sites/default/files/GIL_protection_cathodique_V1_1.pdf).
- [35] **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.
- [36] **S. Derbal**, Electrodeposition et caractérisation de couches minces métalliques ternaires CuZnSn, thèse de magistère, Université Ferhat ABBAS- Setif1, Algérie 2014.
- [37] **S. Andreia J. Popescu**, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France 2008.
-

## Référence bibliographique

---

[38] **B. Trémillon**, Electrochimie Analytique et Réaction en Solution, Tome 2, édition Masson, Paris, France 1993.

[39] **M. K Ahn ; H.S Know et H.M.Lee** :Quantitative comparision of the influances of tungstène and molybden on the passivité of Fe-29Cr ferritique stainless steels,elsevier.

[40] [www.agmc.ca/files/inoxinfo.pdf](http://www.agmc.ca/files/inoxinfo.pdf)

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

[42] **R. Jules**, compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification du tréfilage des aciers inoxydables, Thèse pour l'obtention du grade de docteur en science et génie des matériaux, école nationale supérieure des mines de Paris, France 2006.

[43] **R. Younes, A. Amar**, influence des post-traitements sur la tenue à l'usure d'un dépôt à base du fer réalisé par projection thermique, Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia, Algérie 2012.

[44] **M. Akli, A. Soualmi**, influence des paramètres de projection sur la tenue à l'usure d'un dépôt à base du nickel obtenu par projection thermique, mémoire de fin d'études, université de Bejaia, Algérie 2013.

---

# ANNEXE

## Résumé

*La technique de rechargement par projection thermique offre l'opportunité de réaliser, sur des pièces mécaniques, des revêtements métalliques diversifiés. Les revêtements obtenus par projection thermique sont largement employés pour modifier les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des surfaces des pièces industrielles.*

*Ce travail porte sur l'influence de poste-traitements sur la résistance à l'usure d'un premier dépôt traité à 950°C réalisé par projection thermique en utilisant le procédé à arc électrique et un deuxième dépôt sans traitement pour un acier de construction mécanique A60. On mise en évidence l'influence de la sous couche d'accrochage en Fer-Cr-Ni.*

## Abstract

*The technique of recharging by thermal spraying offers the opportunity to realize, on mechanical parts, diversified metallic coatings. Thermally sprayed coatings are widely used to modify the physical, chemical and mechanical properties of the surfaces of industrial parts.*

*This work is about the influence of post-treatments on the wear resistance of a first deposit treated at 950 ° C by thermal spraying using the electric arc process and a second deposit without treatment for a structural steel mechanical A60. The influence of the undercoat layer in Fer-Cr-Ni is highlighted.*

## ملخص

*يمنحنا استخدام طريقة المعالجة الحرارية الفرصة لتلبيس الطبقات على القطع الميكانيكية.*

*عملنا هذا يتمحور على تأثير المعالجة الحرارية على مقاومة التآكل لعينة اولى تتم معالجتها عند درجة حرارة 950°C عن طريق الرش الحراري باستخدام عملية القوس الكهربائي وعينة ثانية من دون معالجة حرارية للصلب المستعمل للإنشاءات الميكانيكية A60. حيث يتم تسليط الضوء على تأثير الطبقة السفلية المتكونة من Fer-Cr-Ni.*