

**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 :**

**KOUCHE Yahia**

**LIDRICI Oualid**

## **Thème**

---

**Etude tribochimique des dépôts à base Ni obtenus par la  
technique de projection thermique.**

---

30/06/2019 Devant le jury composé de:

Président : DR.dj.amari

Rapporteur : PR. Bradai M. A.

Examineur : DR.r.younes

**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 M..A.BRADAI, notre promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant De soins à la réalisation de ce mémoire*

*Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.*

*Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail. Mr. en tant que Président de jury, ainsi qu'aux examinateurs.*

*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 nos pères, la plus belle marque de reconnaissance et d'encouragement qu'on puisse leur offrir est notre réussite.*

*À nos très chère mère les être les plus nobles qui ont sacrifié les plus belles années de leur vie.*

- *À Ma femme*
- *À nos sœurs.*
- *À nos frères.*
- *À nos grands parents.*
- *À nos meilleures amies.*
- *À toutes camarades de notre section.*

kouche yahia

# Dédicace

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

*À nos pères, la plus belle marque de reconnaissance et d'encouragement qu'on puisse leur offrir est notre réussite.*

*À nos très chère mère les être les plus nobles qui ont sacrifié les plus belles années de leur vie.*

- *À nos sœurs.*
- *À nos frères.*
- *À nos grands parents.*
- *À nos tantes.*
- *À tout les membres de nos familles.*
- *À nos meilleures amies.*
- *À tout les camarades de notre section.*

***LISTE***

***DES***

***TABLEAUX***

## *Liste des tableaux*

---

<b>Tableau I.1:</b> Composition chimique minérale de l'eau de mer .....	33
<b>Tableau I.2:</b> Conductivité de l'eau de mer ( $\mu\text{s.cm}^{-1}$ ).....	34
<b>Tableau I.3:</b> PH de l'eau de mer.....	34
<b>Tableau II.1:</b> Analyse du substrat par la fluorescence des rayons X.....	40
<b>Tableau II.2:</b> Composition et caractéristique de ProXon21021(P21).....	41
<b>Tableau II.3:</b> Composition et caractéristique de ProXon21031(P31).....	41
<b>Tableau II.4:</b> Paramètres de projection utilisé.....	43

***LISTE***

***DES***

***FIGURES***

## *Liste des figures*

---

<b>Figure I.1</b>	Représentation schématique des procédés VIM et VAR.....	6
<b>Figure I.2</b>	Microscopie optique d'un superalliage MCNG après une étape de Solidification monocristalline – Coupe perpendiculaire à l'axe <001>.....	8
<b>Figure I.3</b>	Micrographies MEB de carbures primaires et de carbures secondaires dans L'Inconel71.....	10
<b>Figure I.4</b>	Diagramme d'équilibre de phase Ni-Cr.....	11
<b>Figure I.5</b>	Premières appareillages de projection.....	12
<b>Figure I.6</b>	Le procédé de projection thermique.....	13
<b>Figure I.7</b>	Schéma de principe de la projection thermique à flamme.....	14
<b>Figure I.8</b>	Schéma de principe de la projection thermique HVOF.....	15
<b>Figure I.9</b>	Schéma de principe d'une torche à plasma soufflé.....	16
<b>Figure I.10</b>	Schéma de principe de la projection par arc électrique.....	17
<b>Figure I.11</b>	Méthodes générales de dépôt de couches minces sous vide.....	19
<b>Figure I.12</b>	Schéma conventionnel d'un pulvérisateur cathodique.....	20
<b>Figure I.13</b>	Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique...	23
<b>Figure I.14</b>	Représentation schématique d'un tribosystème.....	29
<b>Figure I.15</b>	Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides.....	29
<b>Figure I.16</b>	Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive d'après.....	31
<b>Figure I.17</b>	Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive.....	31
<b>Figure I.18</b>	Usure par fissuration (cas des matériaux ductiles).....	32
<b>Figure I.19</b>	Usure par fissuration (cas des matériaux fragiles).....	32
<b>Figure I.20</b>	influence du pH sur le taux de corrosion.....	36
<b>Figure I.21</b>	évolution de la teneur en oxygène dissous, de la salinité, de la température et du pH en fonction de la profondeur.....	38
<b>Figure I.22</b>	Variation du taux de corrosion en fonction de la vitesse d'écoulement.....	39
<b>Figure I.23</b>	Schéma descriptif d'une Cellule électrochimique.....	41
<b>Figure I.24</b>	Dispositif de mesure d'une courbe de polarisation.....	41
<b>Figure II.1</b>	Echantillon utilisé pour la projection.....	44
<b>Figure II.2</b>	Schéma du pistolet à flamme-poudre.....	46
<b>Figure II.3</b>	Différentes types de polisseuses.....	46
<b>Figure II.4</b>	Microscope Optique.....	48
<b>Figure II.5</b>	Dispositif diffraction X : X'PERT PRO MRD de chez PANalytical.....	49
<b>Figure II.6</b>	Représentation du dispositif d'usure utilisé.....	50
<b>Figure II.7</b>	balance analytique.....	51
<b>Figure II.8</b>	Dispositif de mesure d'une courbe de polarisation potentiodynamiques....	53
<b>Figure III.1</b>	Spectre DRX et micrographie des dépôts issus de la poudre d'alliage Ni-Cr-Al et Ni-Cr-Al-Fe-Mo observé au MEB.....	55
<b>Figure III.2</b>	courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon A60 pour une vitesse 0.5m/s et d'une charge de 5 et 30 N....	56

---

## *Liste des figures*

## *Liste des figures*

---

<b>Figure III.3</b>	courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon A60 pour une vitesse 1m/s et d'une charge de 5 et 30 N.....	57
<b>Figure III.4</b>	courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon P21 pour une vitesse 0,5m/s et d'une charge de 5 et 30 N....	57
<b>Figure III.5</b>	courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon P21 pour une vitesse 1m/s et d'une charge de 5 et 30 N.....	58
<b>Figure III.6</b>	courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon P31 pour une vitesse 0,5m/s et d'une charge de 5 et 30 N....	58
<b>Figure III.7</b>	courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon P31 pour une vitesse 1m/s et d'une charge de 5 et 30 N.....	59
<b>Figure III.8</b>	courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon A60 pour une vitesse 0,5m/s et d'une charge de 5 et 30 N....	60
<b>Figure III.9</b>	courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon A60 pour une vitesse 1m/s et d'une charge de 5 et 30 N.....	60
<b>Figure III.10</b>	courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon de P21 pour une vitesse 0,5m/s et d'une charge de 5 et 30 N.....	61
<b>Figure III.11</b>	courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon de P21 pour une vitesse 1m/s et d'une charge de 5 et 30 N.....	61
<b>Figure III.12</b>	courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon de P31 pour une vitesse 0.5m/s et d'une charge de 5 et 30 N.....	62
<b>Figure III.13</b>	courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon de P31 pour une vitesse 1m/s et d'une charge de 5 et 30 N.....	62
<b>Figure III.14</b>	Evaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon de P31 pour une vitesse 1m/s et d'une charge de 5 et 30 N.....	63
<b>Figure III.15</b>	faciès d'usure des deux l'échantillon acier P21 et P31 après usure a une vitesse de glissement de 1m/s à deux charges 30N dans un régime sec: a)30 N/ 180 (tr/min), b) 30 N / 180 (tr/min).....	64
<b>Figure III.16</b>	La perte de masse d'échantillon non traité A60.....	65
<b>Figure III.17</b>	La perte de masse d'échantillon non traité A60.....	66
<b>Figure III.18</b>	La perte de masse d'échantillon traité p21.....	67
<b>Figure III.19</b>	Images de corrosion de l'échantillon traité P21.....	68
<b>Figure III.20</b>	La perte de masse d'échantillon traité P31.....	69
<b>Figure III.21</b>	Images de corrosion de l'échantillon traité P31.....	70
<b>Figure III.22</b>	La perte de masse des échantillons traité P31, P21 et non traité A60.....	71
<b>Figure III.23</b>	Courbe de polarisation anodique.....	72
<b>Figure III.24</b>	Courbe de polarisation cathodique.....	73
<b>Figure III.25</b>	Le tracé de Tafel.....	74

# ***SOMMAIRE***

# Sommaire

---

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I: Recherche bibliographique</b>	
<b>I.1 Les superalliages à base nickel.....</b>	<b>1</b>
I.1.1 Définition.....	1
I.1.2 Domaine d'utilisation des superalliages a base nickel.....	2
I.1.2.1 Autres domaines d'utilisation.....	2
I.1.3 Procèdes de formation des superalliages.....	3
I.1.3.1 Elaboration et mise en forme.....	3
I.1.3.2 Techniques de fusion VIM et VAR.....	3
I.1.3.3 Métallurgie des poudres.....	4
I.1.3.4 Structure de solidification.....	5
I.1.4 Les alliages base nickel.....	6
I.1.4.1 Influence des éléments d'alliage sur la structure des superalliages.....	7
I.1.4.2 Modes de durcissement des superalliages.....	7
I.1.4.3 Les carbure.....	7
.1.5 Diagramme d'équilibre nickel-chrome.....	8
<b>I.2 Projection thermique.....</b>	<b>9</b>
I.2.1 Interdiction:.....	9
I.2.2 Historique .....	9
I.2.3 Principe de la projection thermique.....	10
I.2.4 Les différents types de procédés de projection thermique .....	11
I.2.4.1 Projection à la flamme.....	11
I.2.4.2 Projection par HVOF.....	12
I.2.4.3 Projection par HVAF .....	13
I.2.4.4 projection par plasma.....	14
I.2.4.5 projection par ARC électrique.....	14
I.2.5 Les facteurs influençant la projection thermique.....	15
I.2.6 Les caractéristiques générales des revêtements (dépôts).....	15
I.2.7 Méthodes de production des revêtements.....	16
I.2.7.1 Dépôt d'atomes de molécules ou d'ions.....	16
I.2.7.2 Dépôt de particules solides ou liquides.....	17
I.2.7.3 Déposition chimique et physique en phase vapeur.....	17

---

# Sommaire

# Sommaire

---

I.2.8 Influences des paramètres de projection sur le dépôt.....	19
I.2.9 Formation et structure d'un dépôt réalisé par la projection thermique.....	20
I.2.10 La préparation des surfaces.....	22
I.2.10.1 La propreté des surfaces.....	22
I.2.10.2 La rugosité.....	22
I.2.10.3 Le préchauffage.....	23
I.2.11 Les modes de préparation des surfaces.....	23
I.2.11.1 Le dégraissage.....	23
I.2.11.2 Le décapage.....	24
I.2.11.3 Le sablage.....	25
I.2.12 La tribologie.....	25
I.2.12.1 système tribologique.....	26
I.2.12.2 Le circuit tribologique.....	27
I.2.13 Mécanisme de dégradation de surface.....	28
I.2.13.1 L'usure.....	28
<b>I.3 La corrosion.....</b>	<b>31</b>
I.3.1 Définition de la corrosion.....	31
I.3.2 Processus de la corrosion.....	32
I.3.2.1 La corrosion en milieu humide.....	32
I.3.2.2 La corrosion sèche.....	33
I.3.3 L'eau de mer.....	33
I.3.3.1 Conductivité électrique.....	34
I.3.3.2 pH.....	34
I.3.3.3 Oxygène dissous.....	35
I.3.3.4 La température.....	36
I.3.3.5 La vitesse du mouvement de l'eau de mer.....	36
I.3.4 Méthodes électrochimiques.....	37
I.3.5 La cellule électrochimique.....	38
<b>Chapitre II : Matériaux et technique expérimentale.</b>	
<b>II. Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>II.1 Matériaux utilisés.....</b>	<b>40</b>
II.1.1 Substrat.....	40

---

# Sommaire

# Sommaire

---

II.1.2 Revêtements réalisés.....	40
<b>II.2 Présentation des échantillons.....</b>	<b>41</b>
II.2.1 Elaboration des échantillons.....	41
<b>II.3 Préparation des surfaces à revêtir.....</b>	<b>42</b>
II.3.1 Dégraissage.....	42
II.3.2 Grenailage.....	42
II.3.3 Préchauffage .....	42
<b>II.4 Réalisation des dépôts.....</b>	<b>43</b>
II.4.1 Paramètres de projection.....	43
II.4.2 Procédé d'élaboration des revêtements par la projection flamme-poudre.....	43
<b>II.5 Observation métallographique.....</b>	<b>44</b>
II.5.1 Préparation des échantillons pour l'observation métallographique.....	44
II.5.2 Le microscope métallographique.....	45
II.5.2.1 Système de Fonctionnement .....	45
II.5.2.1.1 Préparer l'observation.....	45
II.5.2.1.2 Réaliser les réglages.....	45
II.5.2.1.3 Utiliser les objectifs.....	45
II.5.2.1.4 Rechercher puis centrer la région la plus favorable de l'objet.....	45
II.5.3 Diffraction des rayons X (D.R.X) .....	46
<b>II.6 Caractérisation mécanique (tests d'usure).....</b>	<b>47</b>
II.6.1 Principe du teste d'usure.....	47
II.6.1.1 La perte de masse .....	47
II.6.1.2 Représentation du dispositif d'usure .....	47
II.6.1.3 Optimisation et réalisation du test d'usure .....	48
II.6.1.4 Paramètres et conditions expérimentales de frottement .....	49
II.6.1.5 Evaluation de l'usure des pions (frotteur).....	49
<b>II.7 Caractérisation électrochimique.....</b>	<b>50</b>
II.7.1 L'électrode de travail.....	50
II.7.2 L'électrode de référence.....	50
II.7.3 L'électrode auxiliaire.....	50
II.7.4 Milieu d'essai.....	51
<b>II.8 Méthode d'étude électrochimique.....</b>	<b>51</b>

---

# Sommaire

# Sommaire

---

II.8.1 Polarisation potentiodynamiques.....	51
<b>Chapitre III : résultats et discussions</b>	
<b>III. Introduction.....</b>	<b>53</b>
<b>III.1 Analyse structural des dépôts P21 et P31 obtenue par diffraction au rayons x.....</b>	<b>53</b>
<b>III.2 Caractérisation tribologique des dépôts P21 et P31.....</b>	<b>55</b>
III.2.1 : Perte de masse en fonction du temps à des vitesses de glissement 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 5N et 30N pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec.....	55
III.2.2 : La température en fonction du temps à des vitesses de glissement 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 5N et 30N pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec.....	58
III.2.3 : Trace d'usure des dépôts P21 et P31 sous différente charge.....	62
<b>III.3 Caractérisation électrochimiques des dépôts P21 et P31.....</b>	<b>63</b>
III.3.1 : Perte de masse en fonction du temps pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec.....	63
III.3.2 : étude comparative des pertes de masse en fonction du temps pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec.....	69
III.3.3 : courbe de polarisation anodique pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec .....	70
III.3.4 : courbe de polarisation cathodique pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec .....	71
III.3.5 : courbe de potentiel-dynamométrique pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec .....	72
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>75</b>

***INTRODUCTION***  
***GÉNÉRALE***

### **Introduction générale :**

Les ingénieurs doivent aujourd'hui faire face à la concurrence car les objectifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs ont pour buts : la maximisation du rendement, minimisation des coûts et l'amélioration des performances pour assurer une productivité de qualité. C'est pour cela, qu'ils sont de plus en plus préoccupés par la durabilité de la pièce vu que les pièces constitutives de machines ou d'équipement doivent résister à des sollicitations nombreuses :

- Sollicitations internes : contraintes mécaniques, fatigue, fluage ...etc.
- Sollicitations externes : frottement, abrasion, température, érosion ...etc.
- Sollicitations environnementales : corrosion, oxydation, attaque chimique, chaleur...etc.

Dans notre étude on a utilisé un substrat qui est l'acier A60 de nuance E335 non allié d'usage courant en mécanique générale. Non traité, il offre une bonne résistance mécanique.

L'objectif de notre travail consiste à étudier la tribochimie des dépôts à base Ni obtenus par la technique de projection thermique flamme-poudre sur un acier de construction (A60).

Ce mémoire va donc présenter l'ensemble des travaux qui ont été réalisés en amont sur deux éprouvettes, l'une est le dépôt (P 21) et l'autre est le dépôt (P 31), en vue d'évaluer l'influence de la vitesse de glissement et la charge imposée.

Pour présenter ce travail, notre projet est organisé en trois chapitres :

**Le premier chapitre**, en première partie, est une étude bibliographique permettant de présenter les superalliages à base nickel et on termine par la structure des matériaux. Et en deuxième partie est une présentation de différents types de projection thermique, l'influence des paramètres de projection sur la qualité des dépôts, et aussi une présentation des différents aspects de l'usure. Et en troisième partie est une exposition des connaissances de base de la corrosion, ainsi que les différentes techniques de protection.

**Le deuxième chapitre**, décrit la stratégie expérimentale qui concerne l'élaboration des matériaux, les paramètres de projection à respecter, les opérations de préparation de la surface ainsi que les matériaux utilisés, suivi d'un test d'usure qui donne la perte de masse en fonction de la charge. Une analyse microstructurale des dépôts à également été effectuée par le microscope optique.

**Le troisième chapitre**, est consacré aux résultats expérimentaux et leurs interprétations. Les tests d'usure sont présentés sous forme des courbes de perte de masse et de température en fonction du temps, de la charge imposée et de la vitesse de glissement.

En fin nous terminons par une conclusion générale.

# ***CHAPITRE I***

## ***ELÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES***

## I.1 superalliages :

Le terme "superalliages" désigne une large gamme d'alliages à base de nickel, de cobalt ou de fer, qui fonctionnent très bien à haute température. Une définition générale a été donnée par Chester T. Sims en 1972 [1] : « Un superalliage est un alliage basé sur les éléments du groupe VIIIA du tableau périodique, développé pour une utilisation à température élevée, combinant résistance mécanique et stabilité de surface. ». Les superalliages sont donc des alliages possédant de très bonnes propriétés mécaniques (notamment en fluage) à des températures approchant le point de fusion, combinées à une très bonne résistance à la corrosion à haute température. Ils ont tout d'abord été utilisés pour les moteurs d'avion, puis pour les turbines à gaz industrielles ou marines, les moteurs de fusée, les réacteurs nucléaires, les usines chimiques et pétrochimiques.

Les superalliages à base de nickel sont nés à partir des aciers à la fin des années 20. En France, Chevenard eut l'idée d'ajouter de l'aluminium et du titane à un acier contenant un fort pourcentage de nickel, ce qui engendra un renforcement par formation de précipités d'une phase de type Ni<sub>3</sub>Al. La même année aux Etats-Unis, Bedford, Pelling et Merica firent la même chose avec un alliage nickel-chrome 80/20[2]. Depuis lors, des progrès ont été accomplis non seulement dans l'amélioration de sa composition, mais également dans l'amélioration des méthodes de production et des traitements thermiques. L'utilisation du procédé de coulée dirigée et de durcissement a notamment permis de développer une nouvelle famille d'alliages, les alliages monocristallins.

**Tableau périodique des éléments chimiques**

■ IA (rouge)   
 ■ IIA (orange)   
 ■ IIIA (jaune)   
 ■ IVA (vert)   
 ■ VA (bleu)   
 ■ VIA (bleu foncé)   
 ■ VIIA (bleu très foncé)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX (bleu)   
 ■ X (bleu)   
 ■ XI (bleu)   
 ■ XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ IIIA-IV (bleu)   
 ■ VA-VII (bleu)   
 ■ VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)   
 ■ I-III (bleu)   
 ■ IV-VI (bleu)   
 ■ VII-VIII (bleu)   
 ■ IX-X (bleu)   
 ■ XI-XII (bleu)

## **I.1.1 Définition [3] :**

Les superalliages sont des alliages développés pour travailler à des très hautes températures de services, ils sont des matériaux métalliques combinant de hautes caractéristiques mécaniques dans un large domaine de températures et une excellente tenue à la corrosion et/ou l'oxydation.

On peut diviser les superalliages en trois familles :

- Alliages à base de fer-nickel-chrome.
- Alliages à base de nickel.
- Alliages à base cobalt.

Leur résistance élevée au fluage est due principalement aux trois facteurs :

- Raidissement de la matrice par addition des éléments : molybdène, tungstène, cobalt, niobium, tantale, vanadium.
- Présence d'une phase intermétallique finement précipitée.
- Présence de carbures.

## **I.1.2 Domaine d'utilisation des superalliages a base nickel :**

Les superalliages à base de Nickel représentent une part importante des matériaux utilisés dans la fabrication des moteurs aéronautiques de type turboréacteur. En effet, environ 45% des pièces des turboréacteurs sont réalisés en alliages de Nickel car ces alliages présentent généralement une bonne stabilité métallurgique en raison de la faible vitesse de diffusion des éléments, possèdent une bonne tenue à l'oxydation, et ont une bonne résistance mécanique à haute température. Pour ces raisons, les superalliages à base de Nickel sont essentiellement employés pour la fabrication des pièces situées dans les zones les plus chaudes du moteur, c'est-à-dire le compresseur haute-pression et la turbine [4].

### **I.1.2.1 Autres domaines d'utilisation [5] :**

Parmi les superalliages les plus utilisés, nous pouvons citer, en allant des températures de fonctionnement les plus basses vers les plus hautes :

- Les alliages à base nickel poly cristallins forgés ou élaborés par métallurgie des poudres (ex : Waspaloy, Inconel 718, N18), utilisés lorsque la température est comprise entre 450°C et 700°C, c'est-à-dire pour la partie haute pression du compresseur (disque, aubes, carters) et la turbine (disques et certaines aubes).

- Les superalliages à base nickel ont été développés à des aciers inoxydables austénitiques. Certaines offrent des coefficients de dilatation thermique très faibles (tel que Incoloy 909) qui les rendent particulièrement adaptés pour les arbres, bagues et carters.
- Les superalliages à base cobalt offrent une excellente résistance à la corrosion à chaud sous hautes températures comparées aux alliages à base nickel. Ils sont toute fois plus chers et plus difficiles à usiner, et de ce fait, leur utilisation se limite aux pièces de combustion dans les zones les plus chaudes du moteur .Parmi eux, nous trouvons Haynes 25 et Stellite 31.
- Les superalliages à base nickel monocristallins pour aubes de turbines dont la température de fonctionnement est comprise entre 650°C au pied d'aube et plus de 1000°C au niveau de la pale.

### **I.1.3 Procèdes de formation des superalliages :**

**I.1.3.1 Elaboration et mise en forme :** Les différentes phases pourront ou non être observées dans l'alliage à différents stades de son élaboration, donc nous introduirons ici quelques informations sur le processus d'élaboration des superalliages.

L'élaboration de l'alliage est la première étape dans le premier processus de création d'une pièce en superalliage. La phase d'élaboration permet d'obtenir un lingot de superalliages qui sera ensuite forgé, traité thermiquement et enfin usiné pour obtenir la pièce voulu.

Il y a deux façons de placer des lingots: la voie "cast" et la voie de l'extraction de poudre [4].

### **I.1.3.2 Techniques de fusion VIM et VAR :**

Vacuum induction melting (**VIM**) : fusion par induction sous vide.

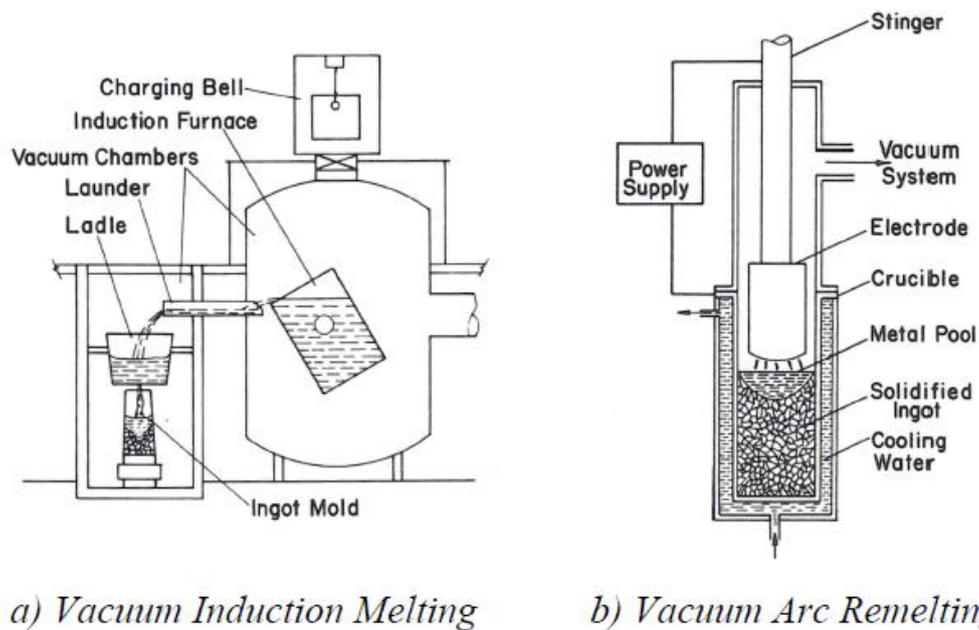
Vacuum arc remelting (**VAR**) : refusion à l'arc sous vide

Les superalliages sont constitués de plus de dix éléments chimiques. L'un des aspects les plus importants est de savoir comment mélanger ces éléments bien avant de pouvoir les utiliser. En fait, la qualité d'un alliage pré allié dépendra de la qualité de la pièce. Si le mélange est faible et que le produit n'est pas homogène, séparé ou traité thermiquement, ou que la configuration initiale ou le procédé de fabrication ne soit pas modifié, il peut corriger complètement l'hétérogénéité. Le processus de mélange des différents éléments est la pierre angulaire de tout le processus, conduisant à l'acquisition des propriétés mécaniques requises.

Les premiers supraconducteurs, dérivés d'acier austénitique, ont été fabriqués à partir de mélanges obtenus dans le four à arc électrique. Le développement de la fusion des fours à induction à four sous vide (FMI), (**Figure I-1**), a permis de mieux contrôler l'ajout d'éléments

tels que l'aluminium et le titane, en fonction des caractéristiques des superalliages. Sous l'air, l'introduction de ces réactifs avec de l'oxygène, de l'hydrogène et de l'azote peut conduire à des produits peu allongés en raison de séparations importantes.

L'application du procédé VIM à l'élaboration des superalliages dans les années 50 a constitué une véritable révolution. Elle a permis l'introduction d'une part, d'un plus grand nombre d'éléments d'alliage et d'autre part, de concentration plus importante, conduisant ainsi à une nette amélioration de la tenue mécanique et de la tenue en température. Toutefois, les lingots ainsi produits n'étaient pas exempts de tout phénomène de ségrégation. Le procédé de refusions VAR (Vacuum Arc Remelting) [6], (**figure I.1**), Utilisé après le VIM, permettra de réduire les problèmes de rigidité rencontrés lors de l'utilisation exclusive du VIM. La plupart des superalliages sont mélangés selon la séquence VIM / VAR ou VIM / ESR (électro slag remelting= refusions sous laitier électro conducteur).



**Figure I.1** : Représentation schématique des procédés VAR et VAM : **a-** fusion par induction **b-** refusion par arc [7].

### I.1.3.3 Métallurgie des poudres :

L'exigence des motoristes d'obtenir des matériaux pour disques toujours plus performants a conduit au développement de superalliages de plus en plus chargés en éléments d'addition : les concentrations en éléments réfractaires comme le tungstène et le molybdène ont été relevées pour accroître le durcissement de solution solide tandis que l'augmentation des teneurs en aluminium, titane, niobium et tantale a permis d'obtenir des alliages à plus forte

fraction de phase  $\gamma'$ . Toutefois, l'amélioration des propriétés mécaniques ne peut avoir lieu que si le matériau peut être mis en forme correctement ! Or, l'utilisation du procédé classique par coulée et forgeage pour élaborer ces compositions fortement chargées en éléments d'alliages, ne permet pas d'éviter les ségrégations chimiques qui vont modifier localement la composition de l'alliage et constituer éventuellement des sites préférentiels d'amorçage de fissure sous certaines sollicitation mécanique. La technique de la métallurgie des poudres, qui consiste en la pulvérisation de lingots d'éléments pré alliés, permet de limiter la taille de ces ségrégations à grande échelle : la clé de ce mode de production réside en effet en une très grande vitesse de solidification depuis l'état liquide, ce qui évite notamment les ségrégations dans les particules pré alliées, chaque gouttelette solidifiée ayant la même composition moyenne. Il en résulte une microstructure plus fine et plus homogène qui facilite le travail à [8].

L'application principale de la technique « Métallurgie des poudres » (MDP ou PM pour Power Métallurgie) est la production de disque de turbine et de compresseur haute pression des turboréacteurs, pièces soumises à de fortes contraintes, particulièrement sensibles à la présence de défauts. Les alliages obtenus par métallurgie des poudres présentent donc des propriétés mécaniques supérieures aux alliages coulés mais ont un prix de revient plus élevé.

De ce fait, l'utilisation de cette technique reste limitée. Chez Snecma par exemple, seuls les disques des moteurs militaires M88 sont fabriqués en superalliages MDP.

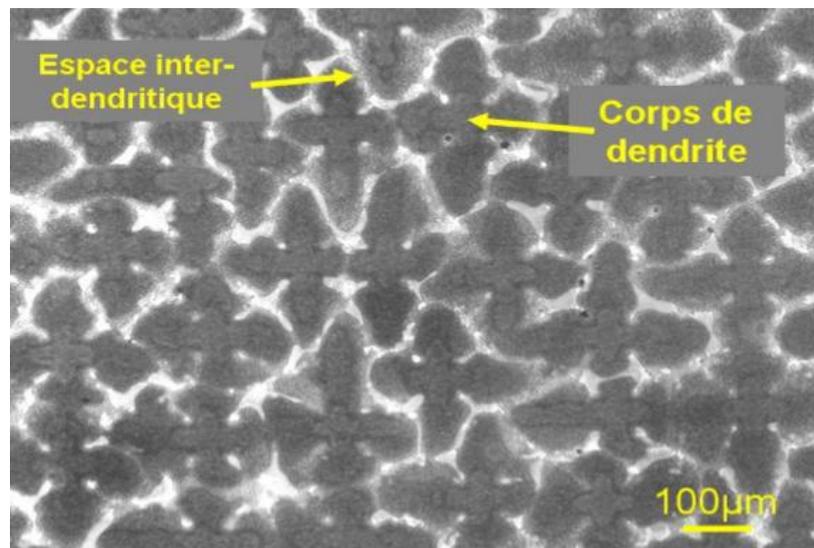
#### **I.1.3.4 Structure de solidification :**

Nous verrons plus loin que les procédés d'élaboration des superalliages à base de nickel ont considérablement évolué durant ces dernières décennies [2-8]. L'évolution de ces processus a permis d'augmenter les propriétés mécaniques des superalliages à haute température. Après illustration, les superalliages à base de nickel ont une structure dendritique (**Fig. I.2**). Les bras de dendrite se développent noyau et leurs branches secondaires dans les directions  $\langle 100 \rangle$ ... Les bras de dendrite présentent une microstructure fine  $\gamma / \gamma'$ , tandis que dans les espaces inter dendritiques, la microstructure  $\gamma / \gamma'$  est plus grossière. On peut également observer, dans ces espaces inter dendritiques, des phases  $\gamma'$  massives, qui ne contribuent pas au durcissement de l'alliage. Cette structure dendritique provient du rejet de certains éléments de la phase solide vers la phase liquide lors de la solidification de l'alliage. Les éléments comme le nickel, le tungstène, le rhénium ou le ruthénium ne sont pas rejetés dans la phase liquide, et se répartissent préférentiellement dans les corps de dendrite après solidification. Les autres

éléments ont donc tendance à ségréger dans les espaces inter dendritiques de l'alliage. Ainsi, un traitement thermique de mise en solution est effectué après l'élaboration des superalliages à base de nickel pour homogénéiser leur microstructure. Ce traitement permet de dissoudre les précipités  $\gamma'$ , formés en sortie de procédé d'élaboration, dans la phase  $\gamma$ . Le refroidissement de ce traitement thermique permet ensuite de reformer les précipités de phase  $\gamma'$  de manière homogène. Ce traitement thermique permet également de limiter la ségrégation chimique des éléments dans les bras de dendrite, par diffusion dans la solution solide  $\gamma$ -Ni. Généralement, des traitements thermiques de revenus sont effectués à la suite du traitement thermique de mise en solution. Ces traitements, conduits à des températures inférieures, permettent d'augmenter la limite d'élasticité des superalliages en modifiant la taille des précipités de phase  $\gamma'$ .

**Précipités  $\gamma'$**  : Cette phase de structure cristallographique cubique simple de type.

**Matrice austénitique  $\gamma$**  : C'est une solution solide austénitique désordonnée. Le réseau de sa structure est cubique à faces centrées.



**Figure I.2** : Microscopie optique d'un superalliage MCNGa près une étape de Solidification monocristalline – Coupe perpendiculaire à l'axe  $\langle 001 \rangle$ .

#### I.1.4 Les alliages base nickel [9]:

Les alliages base-nickel sont des matériaux métalliques complexes dotés d'une tenue mécanique à haute température et d'une résistance à l'oxydation ou à la corrosion à chaud. Ces superalliages sont élaborés par fonderie de précision ou par métallurgie des poudres. Ils

sont utilisés généralement pour élaborer des pièces des turbines à gaz industrielles ou marines et de turbomachines aéronautiques. Dans les superalliages base nickel, on distingue plusieurs éléments capables de fournir différentes phases et microstructures développées selon un traitement thermique choisi. La particularité des superalliages réside dans la cohérence cristallographique entre la structure de la matrice austénitique FCC  $\gamma$  et la phase  $\gamma'$   $\text{Ni}_3$  (Al, Ti). Toutes les deux ont une structure cubique à faces centrées dont les paramètres cristallographiques sont très proches.

La matrice de nickel (structure  $\gamma$ ) est caractérisée par sa résistance aux forces de fluage élevées Température. L'aluminium et le chrome sont des éléments importants qui favorisent la résistance à l'oxydation et la corrosion à chaud en raison de la présence d'oxygène ou de contaminants (Na, Ca, ...). Le tantale, le molybdène et le tungstène améliorent le durcissement en formant des solutions solides. La dureté a également été améliorée par précipitation de carbures (Cr, Mo, Nb, W, Ti) ou par dépôt du  $\text{Ni}_3\text{Ni}$  (Al, Ti) stable à 1100 ° C. Du hafnium est ajouté pour améliorer la ductilité des alliages et réduire les risques de fissuration à chaud. L'ajout de cobalt a pour but d'améliorer la résistance thermique et la facilité d'application (soudabilité).

### **I.1.4.1 Influence des éléments d'alliage sur la structure des superalliages :**

Les superalliages base nickel actuels sont composés de plus de dix éléments chimiques. Il existe un grand nombre de compositions différentes. Toutefois, ils ont tous une base commune i.e. entre 10 à 20% de chrome, jusqu'à 8% d'aluminium et de titane, de 5 à 10% de cobalt (pourcentages massiques) et des faibles quantités de bore, carbone et zirconium. Les éléments classiques que l'on trouve ajoutés à différentes teneurs à cette base sont le molybdène, le tungstène, le fer, le niobium et le tantale [6]. Dans les structures en superalliage avec du nickel, ces éléments peuvent être classés en trois groupes:

- Facteurs préférentiels dans la formation de phase  $\gamma$ : Ni, Co, Fe, Cr, Mo, W,
- Facteurs préférentiels dans la formation de phase  $\gamma'$ : Al, Ti, Nb, Ta,
- Éléments qui tendent à se séparer aux joints de grains: C, B, Zr, Hf.

### **I.1.4.2 Modes de durcissement des superalliages [10]:**

Les superalliages sont renforcés selon 3 mécanismes :

- Le durcissement par précipitation de phase ordonnée  $\gamma'$  est le mode de durcissement majeur des alliages à base nickel. La taille, la morphologie et la répartition des précipités pour une

fraction volumique donnée vont conditionner les propriétés du matériau, particulièrement la limite d'élasticité, le durcissement par écrouissage, la rupture, la tenue en fatigue et la vitesse de fissuration, mais aussi le fluage. Les microstructures obtenues dépendent du choix des températures de traitement, de la vitesse de refroidissement lors de la trempe et de la durée des traitements de précipitation.

- Les précipitations de carbures et de moles se produisent principalement au niveau des joints de grains pour améliorer l'ancrage. Ces éléments ne sont généralement pas sensibles aux traitements thermiques et ne présentent pas de risque de brûlure, c'est-à-dire de fonte de la matrice environnante.
- La dureté de la solution solide est obtenue en déformant le réseau cristallin cristallin d'atomes lourds tels que le tungstène ou le molybdène, avec des diamètres importants et des vitesses de diffusion du nickel faibles.

### I.1.4.3 Les carbures [4]:

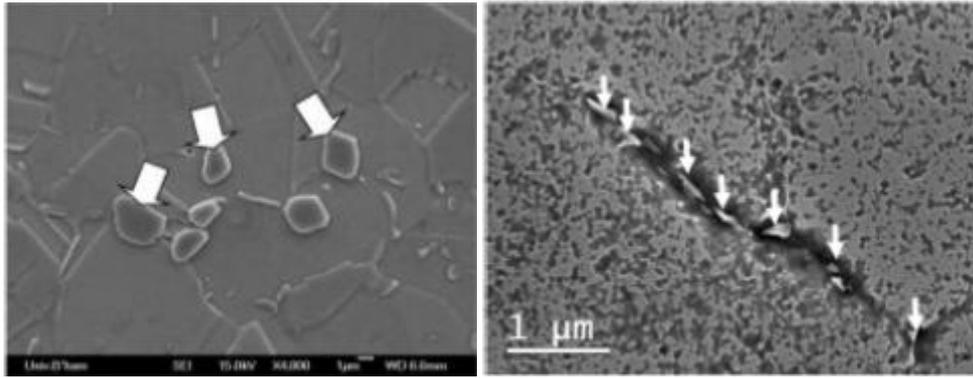
Plusieurs types de carbures précipitent dans les superalliages à base de nickel : les carbures primaires de types MX (NBC, Ti(C, N)), et les carbures secondaires de type  $M_6C$  et  $M_{23}C_6$ .

Les carbures ou carbonitrides primaires se forment lors de la solidification du lingot. Ceux-ci précipitent dans les espaces interdendritique dans lesquels s'est créée une ségrégation des éléments comme le Niobium, le Molybdène et le Titane. Les carbures et les carbonitrides ont une taille similaire qui peut atteindre 10  $\mu\text{m}$ , mais ils présentent des morphologies différentes : globulaire pour les carbures et cubique pour les carbonitrides. Toutefois ces deux phases adoptent la même structure cristalline B1 de réseau cubique à faces centrées. La température de solvus des carbures primaires est supérieure à la température de solidus (voir même de la température de liquidus) de l'alliage, ce qui fait qu'ils restent présents même après traitement thermique à haute température de l'alliage.

Les carbures secondaires apparaissent lors de maintiens à haute température. Leur composition est de type  $M_6C$  et  $M_{23}C_6$  où M est une combinaison des éléments Chrome, Molybdène et fer.

La précipitation des carbures primaires permet, dans certains alliages, notamment ceux élaborés par métallurgie des poudres, d'ancrer les joints de grains et de limiter leur mobilité.

La précipitation des carbures secondaires sur les joints de grains permet également d'améliorer la tenue en fluage des alliages, lorsqu'ils ne forment pas un film continu dans les joints, en limitant le glissement des joints de grains (**Figure I.3**).



Carbure primaire de type MC.

Carbure secondaire de type  $M_{23}C_6$  Précipités le long d'un joint de grains.

**Figure I.3:** Micrographies MEB de carbures primaires et de carbures secondaires dans L'Inconel718 [11].

### I.1.5 Diagramme d'équilibre Nickel-chrome :

Selon le diagramme de phase Ni-Cr, le point de fusion du nickel-chrome à 101325 Pa est de 1455°C et 1907°C, respectivement. Le système de diodes Ni-Cr contient une réaction de fusion facile à 1345°C et une composition liquide à 51%. Deux croix: Le nickel cubique à faces centrées et le BCC se forment lors de l'interaction de l'émotion, comme le montre la (Figure I.4) du diagramme suivant:

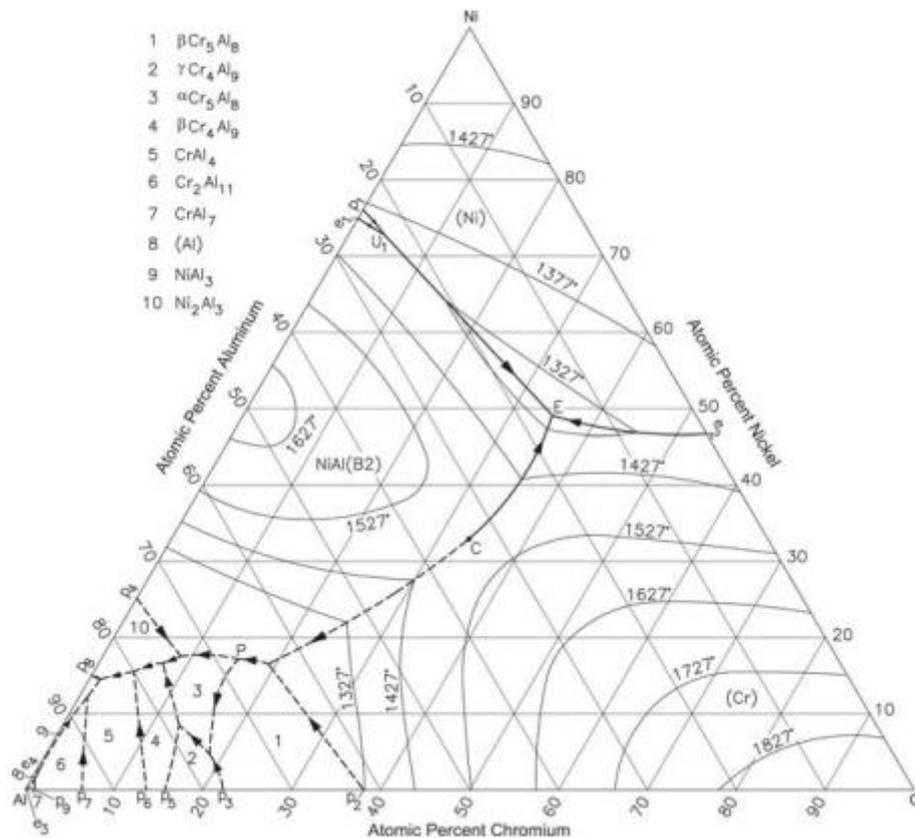


Figure I.4 : Diagramme d'équilibre de phase Ni-Cr-al

## I.2 Projection thermique :

### I.2.1 Introduction :

La projection thermique fait partie des procédés de traitement du surface par voie sèche lors duquel un revêtement est appliqué à haute température et grande vitesse sur un objet métallique, pour augmenter sa résistance à la corrosion et/ou améliorer sa conductivité électrique ou thermique. Elle permet de réaliser des revêtements épais (généralement de quelques dizaines de micromètres à quelques centaines) de natures très variées sur des substrats (pièce à revêtir) tout aussi variés. Divers procédé existent ; les opérateurs sont dits métalliseurs. Ils sont souvent exposés à l'inhalation de métaux toxique , plus ou moins selon le procédé utilisé , selon l'environnement de travail , et selon le bon port des protections respiratoires et autres[12].

### I.2.2 Historique :

L'invention de la projection thermique est attribuée à Max Ulrich Schoop, un ingénieur Suisse. Son idée était de réaliser des revêtements adhérents à partir d'impacts de particules

issus d'une poudre chauffée venant s'écraser sur la pièce à traiter (substrat), pour réaliser des dépôts métalliques denses. Cette idée lui aurait été inspirée de l'observation de ses enfants tirant à la carabine sur le mur de son jardin où les balles de plomb formaient des impacts écrasés[13]. Il dépose deux brevets en Allemagne et en Suisse en 1909. Dans les revendications des brevets, le terme de projection thermique est défini comme « une méthode où le métal liquide est pulvérisé sur la surface au moyen d'une substance gazeuse sous pression ». Les brevets de M.U. Schoop décrivent comment réaliser des dépôts de cuivre, d'argent, d'étain, de zinc, d'aluminium et d'autres alliages sur pratiquement tout types de substrats ( métal ,bois ,verre, papier, tissus)par un apport de poudres finement divisées traitées par une flamme soufflante. Un gaz porteur peut aussi être utilisé pour accélérer et diriger le jet de poudres. Schoop voit dans son invention un procédé pratique et peu onéreuse dans l'application des revêtements anti-rouille sur les ponts et les coques des navires. L'utilisation d'un plasma comme source de chaleur n'apparaît que dans les années 60 dans un contexte d'émulation autour des plasmas thermiques générés par arc électrique [14]. Les premiers brevets sont ceux de Gabriel M. Gianni ni en 1960 et de Robert M. Gage en 1962 [15]. Ils s'inspirent du générateur plasma haute température de H. Gerdien et A. Lotz 1922[16].

**(Figure I.5)**

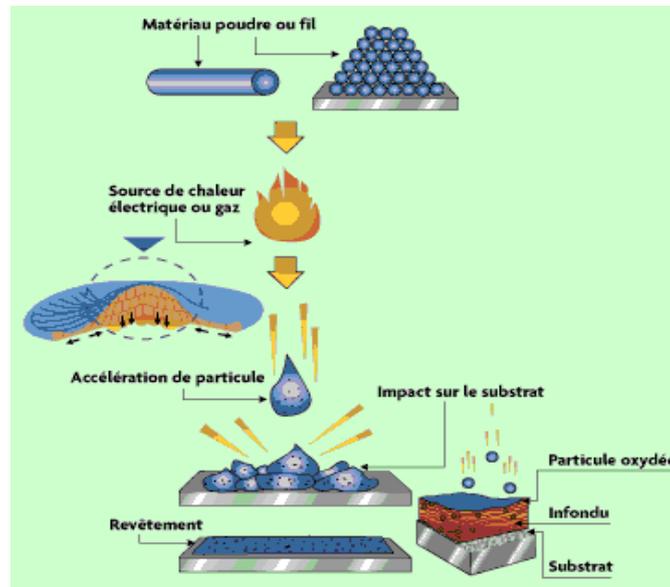


**Figure I.5 :** Premières appareillages de projection.

### I.2.3 Principe de la projection thermique :

Le principe de la projection thermique basée sur l'introduction de la matière à projection dans une source d'enthalpie dotée d'énergie cinétique. Tous les systèmes de projection thermique possèdent un gaz vecteur servant accélérer et transporter jusqu'au substrat de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) qui peuvent être à l'état liquide, pâteux voire solide. Ce gaz vecteur peut être aussi source enthalpique, permettant de chauffer ces particules jusqu'au

point de fusion. D'autres procédés utilisent un arc électrique pour fondre le matériau. Les particules ainsi projetées sur le substrat s'écrasent selon leur vitesse, état physique, température etc. L'accumulation des particules sur le substrat permet de réaliser le revêtement [17,18]. (Figure I.6)



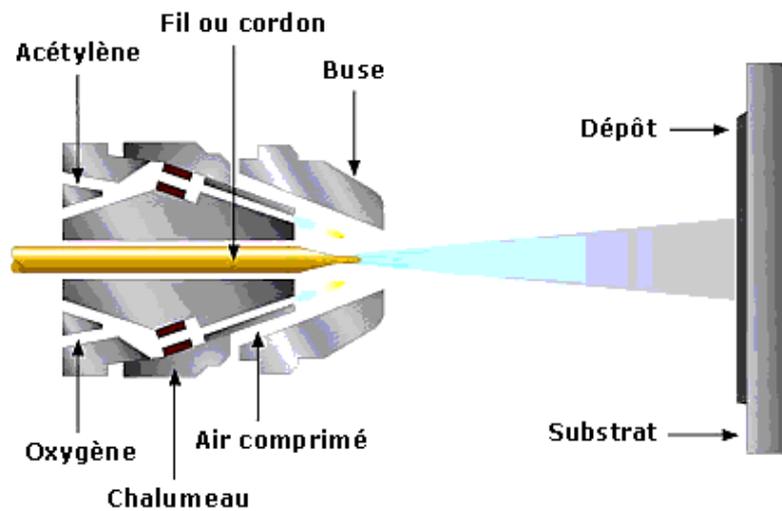
**Figure I.6 :** Le procédé de projection thermique.

#### I.2.4 Les différents types de projection thermique :

Il existe de nombreuses manières de réaliser la projection thermique mais les plus couramment utilisées dans l'industrie sont dites par projection par chalumeau, par arc électrique ou encore « High Velocity Oxy-Fuel » HVOF et HVAF ou au plasma [19].

##### I.2.4.1 Projection la flamme :

Parmi les techniques de projection thermique, la projection à la flamme est la plus polyvalente et la moins coûteuse. Elle permet aussi de projeter une grande variété de compositions chimiques en autant qu'elle se retrouve sous forme de fil ou de poudre. Le procédé utilise la réaction chimique entre l'oxygène et un gaz carburant (acétylène, hydrogène) pour produire une source de chaleur. Cette source thermique crée la flamme. Dans le cas où le matériau d'apport est forme de fil, la fonction de la flamme est de fondre le matériau et de la projeter par de l'air comprimé. Ce procédé de métallisation est limité à des matériaux à bas point de fusion en raison de la production limitée de chaleur par le piston. Les vitesses de projection sont relativement faibles comparées aux autres équipements, ce qui fait que les revêtements sont plus poreux et moins adhérents au substrat [20]. (Figure I.7)

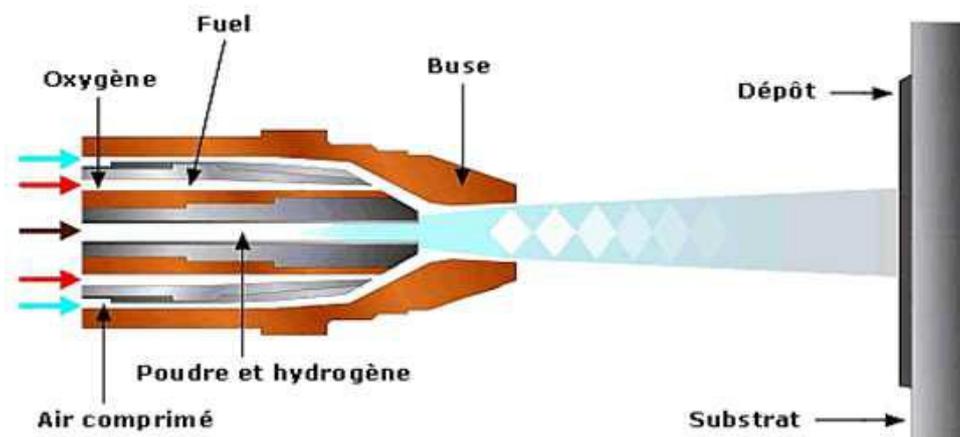


**Figure I.7:** Schéma de principe de la projection thermique à flamme.

#### I.2.4.2 Projection par HVOF (High Velocity Oxy-Fuel):

La projection thermique de type HVOF est un procédé de projection à la flamme supersonique dans lequel l'énergie est nécessaire pour apporter la particule dans un stade semi fondu. L'accélération du produit d'apport est obtenue par la combustion d'un carburant sous forme gazeuse (propane, propylène, hydrogène, gaz naturel) ou liquide (kérosène) et d'oxygène. Les gaz brûlés dans une chambre de combustion sont accélérés pour atteindre une vitesse plus grande que la vitesse du son à la sortie de la buse. Les températures et les accélérations atteintes par la flamme permettent de projeter les particules sur le substrat afin d'atteindre une plus grande densité que les autres procédés. Le HVOF offre une excellente adhérence sur le substrat, ainsi qu'une faible porosité du dépôt. La relativement basse température ( $3000\text{C}^\circ$ ) amène des avantages pour certains matériaux, par exemple, moins de décarburation pour les poudres de carbures et moins d'oxydation pour les poudres métalliques. Ceci permet d'obtenir d'excellentes propriétés mécaniques du revêtement : haute densité, forte adhérence, très bonne résistance à l'usure et à la corrosion [21].

**(Figure I.8)**



**Figure I.8 :** Schéma de principe de la projection thermique HVOF.

#### I.2.4.3 Projection par HVAF (High Velocity Air Fuel):

Le processus à grand vitesse air-carburant, appelé communément HVAF, est un processus de pulvérisation thermique utilisé pour le dépôt de revêtement à haute performance de carbures cémentés et de poudres métalliques. On l'utilise pour la protection des pièces contre l'abrasion, l'érosion et la corrosion. C'est un processus de pulvérisation à chaud qui est plus froid que le HVOF, mais plus chaud que le cold spray. Le pistolet HVAF utilise l'injection axiale de poudre dans un jet air-carburant à une température d'environ 1900°C à 2500°C. Il fonctionne avec un gaz combustible et de l'air comprimé (fourni par un compresseur d'air de 400 CFM à 120 PSI). Par conséquent, le processus peut appliquer efficacement les matériaux à base de carbure. Le carbure de tungstène est le matériau prédominant appliqué par HVAF pour la résistance à l'usure par abrasion. Le HVAF empêche la surchauffe de la matière en poudre, en contact avec les jets chauds de processus de projection thermique conventionnels (tels que le plasma ou le HVOF). En conséquence, les particules sont surtout solides à l'impact sur le substrat, ce qui ralentit hautement la diffusion de l'oxygène. Ce procédé permet d'appliquer des métaux pratiquement sans oxydation tout comme le Cold Spray. Tous les matériaux communs de projection de poudre peuvent être appliqués avec le HVAF, à l'exception de la céramique. Le HVAF peut appliquer le métal, le carbure et autres alliages de poudres métalliques sur une plage d'épaisseurs de 5 à 53 microns. L'efficacité de dépôt (DE) est de 50 à 75 % pour les poudres de carbure et de 60 à 85 % pour les poudres métalliques [22].

#### I.2.4.4 Projection par Plasma :

Le procédé par plasma est composé d'une anode ainsi que d'une cathode qui est toutes deux refroidies par un câble d'eau. Un arc électrique est amorcé par haute fréquence et entretenu par une source de courant électrique à basse tension. Ilya dissolution des molécules de gaz (argon ou azote et hydrogène ou hélium) qui s'ionisent et forment un arc électrique. Lorsque les gaz passent au travers de l'anode, ceux-ci prennent de l'expansion. Cette dilatation provoque un blocage de l'anode forçant les gaz à sortir vers la cathode. Accélérées et fusionnées les particules sont projetées sur la surface à revêtir avec une énergie cinétique très important permettent une adhérence optimal. La projection thermique plasma est un procédé pour les matériaux à haut point de fusion. Il offre une très bonne qualité de revêtement [23]. (Figure I.9)

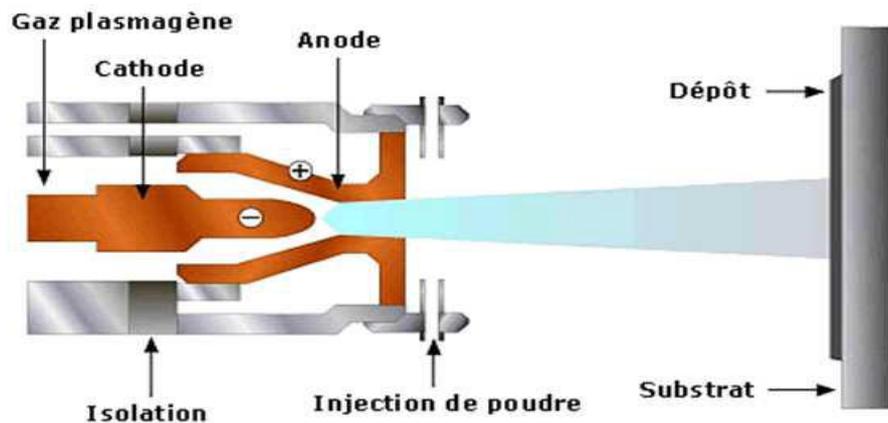


Figure I.9 : Schéma de principe d'une torche à plasma soufflé.

#### I.2.4.5 Projection par ARC électrique :

Le principe de ce procédé consiste à créer un arc électrique entre deux fils métalliques agissant comme deux électrodes. Un jet d'air comprimé, situé dans l'axe du point de création de l'arc, pulvérise le métal fondu sur le substrat. L'un des avantages de l'arc est que deux fils de natures différentes peuvent être utilisés simultanément pour produire un alliage spécifique à une application. Ce type de revêtement industriel est plus dense et offre une meilleure adhérence que celui obtenu par la projection à la flamme, en raison d'une vitesse de particules plus élevée [24]. (Figure I.10)

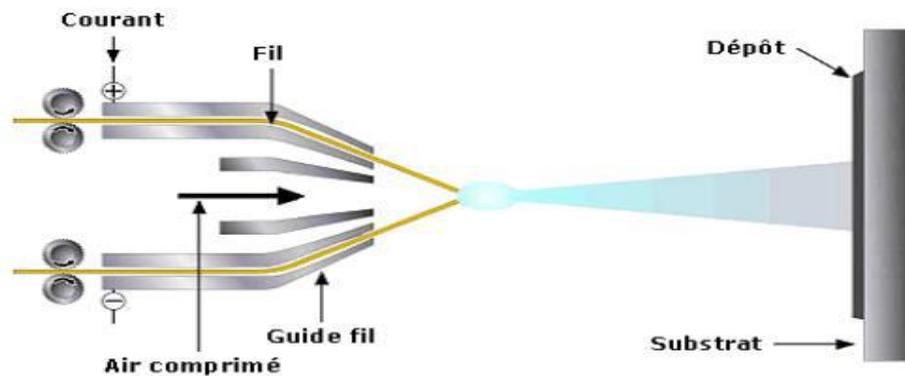


Figure I.10 : Schéma de principe de la projection par arc électrique.

### I.2.5 Les facteurs influençant la projection thermique :

Les propriétés d'un revêtement sont différentes de celles du matériau projeté, car ce dernier subit des contraintes et variations importantes pendant sa projection. Il est granuleux, l'égerment oxydé poreux, dur et résistant aux efforts de compression. Il convient donc de bien gérer les paramètres de la projection, qui influencent directement les propriétés du dépôt et sont différents suivant le procédé employé. Quel que soit le mode de projection employé, il existe toujours un réglage type de paramètres, préconisé par leurs constructeurs, pour des utilisations dites «classiques». Néanmoins, on peut faire varier ces indications, pour modifier le revêtement suivant l'usage pour lequel il est prévu, en le rendant soit :

-Plus ou moins oxydé.

- Plus ou moins poreuse.

-Plus ou moins dur.

-Plus ou moins ductile.

Les paramètres sont liés entre eux et doivent harmonisés. La variation de l'un, devant être composé par la modification d'un autre. Le détail de réglage des paramètres ci-dessous indique l'influence de chacun d'eux sur le résultat du travail obtenu.

### I.2.6 Les caractéristiques générales des revêtements (dépôt) :

#### ➤ L'oxydation et la porosité :

Les particules métalliques en fusion s'oxydent pendant leur trajet de la buse au support. Même si la distance est courte, de 150 à 200 mm et que la durée du parcours n'est que 1

millième de second, elles subissent l'action chimique des gaz environnants (air mélangé au gaz de combustion). Ceci entraîne une baisse de densité au dépôt de 10% environ par rapport au matériau projeté. Cette porosité peut être un avantage dans le cas d'un rechargement de surface, puisqu'elle crée des rétentions possibles pour l'absorption d'un lubrifiant souvent bénéfique en mécanique. Par contre, elle devient néfaste en protection de surface, ou son manque de compacité est handicap pour l'étanchéité du revêtement.

➤ **La dureté et la ductilité :**

Les particules sont soumises à un martelage du aux impacts des suivantes, ce qui entraîne un phénomène d'érouissage. Elles sont aussi soumises à un phénomène de trempe, lié à leur trajet et à la température du support. En un temps très court, la température d'un acier projeté à 1500C°, chute rapidement à 100C°, température maximale de la pièce en traitement. Il en résulte, que ci le revêtement à une grand dureté, donc une résistance importante à la compression, il a peu de résistance à la traction, à la flexion ou aux chocs répètes. Sa texture et ses caractéristiques mécaniques s'apparentent à celles d'un matériau fritté. Ainsi ses qualités dépendant étroitement de sa densité apparente.

### **I.2.7 Méthodes de production des revêtements:**

Différentes technologies de dépôt permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer les propriétés de surface. Parmi les techniques les plus utilisées nous pouvons citer : l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur 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 dépôts à propriétés physiques spécifiques (Électrique, magnétique, thermique,...).

#### **I.2.7.1 Dépôt d'atomes de molécules ou d'ions :**

Il comporte les procédés de base suivant:

- Dépôt physique en phase vapeur ou PVD (Physical Vapeur Déposition).
- Dépôt chimique en phase vapeur ou CVD (Chemical Vapeur Déposition).
- Dépôt électrochimique.

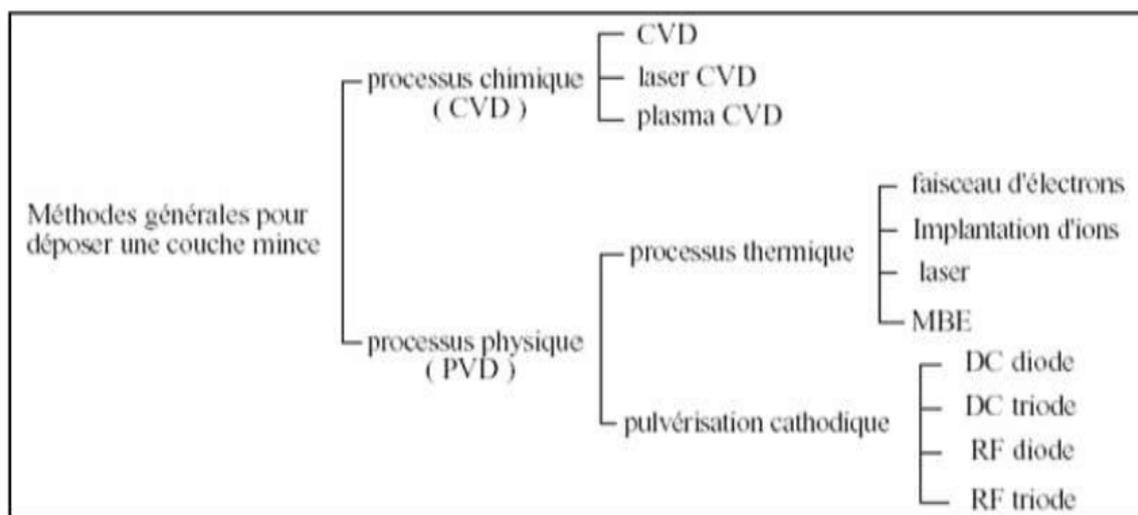
### I.2.7.2 Dépôt de particules solides ou liquides :

Dans cette catégorie entrent les procédés de projection thermique. En général, les procédés d'élaboration de revêtement font appel à trois composantes :

- Une source: c'est là qu'est concentré le matériau à déposer, qui peut être un creuset d'un évaporateur sous vide, une cible de pulvérisation ou une centrale gazeuse.
- Un substrat: c'est la pièce à revêtir et qui est le siège du phénomène de condensation.
- Un milieu: c'est le siège du phénomène de transfert de matière en phase vapeur et qui sépare la source du substrat [25].

### I.2.7.3 Déposition chimique et physique en phase vapeur :

Les principales méthodes utilisées pour fabriquer des couches minces sous vide font appel à la technique de dépôt en phase vapeur chimique CVD et de dépôt en phase vapeur physique PVD. La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la (figure I.11).



**Figure I.11:** Méthodes générales de dépôt de couches minces sous vide.

#### ➤ Dépôt physique en phase vapeur (PVD) :

Il se réalise en trois étapes, premièrement, la vaporisation de l'espèce à déposer, ensuite, le transfert de vapeur sous vide (ou travers un gaz réactif) de la source au substrat ; finalement, la condensation de la vapeur sur le substrat. Le dépôt peut se former par :

- Evaporation thermique sous vide : La vaporisation de matériau source peut être obtenue par effet Joule, par induction ou par faisceau Laser. Les dépôts sont réalisés sous vide poussé de façon à conférer une grande pureté aux couches. Le principal point faible de cette technique est qu'elle entraîne une adhérence faible. Elle est utilisée dans l'optique en décoration et pour le revêtement de substrat.
- Dépôt ionique : L'espèce à déposer est obtenue par évaporation thermique sous vide, la seule différence est que cette vapeur passe à travers une décharge lumineuse avant d'arriver au substrat, il est soumis à un bombardement par les espèces énergétiques. Ce procédé permet d'améliorer la qualité du dépôt (l'adhérence), mais cette méthode a de nombreux défauts ponctuels [26].
- La pulvérisation cathodique: Mise en évidence par Grove en 1852. Cette méthode consiste à bombarder une cible servant de cathode avec des ions en argon d'énergie suffisante pour lui arracher ses atomes (**figure I.12**).

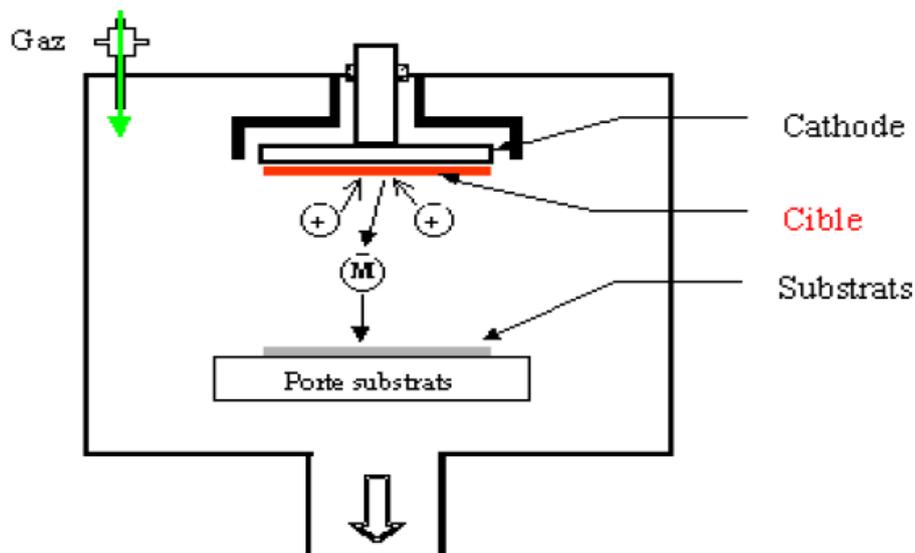


Figure I.12 : Schéma conventionnel d'un pulvérisateur cathodique.

On introduit l'argon dans l'enceinte de dépôt sous une faible pression, la cathode sur laquelle est montée la cible de pulvérisation constituée du matériau à déposer est polarisée négativement. Une décharge électrique se forme entre la cathode et les substrats, et le milieu gazeux devient ionisé, il s'ensuit la coexistence d'ions positifs négatifs et d'espèces neutres ce qu'on appelle un plasma. Sous l'effet de différence de potentiel, les ions argon attirés par la

cathode, bombardent la cible de pulvérisation. Des atomes de la cible sont alors éjectés et vont se déposer sur les substrats [27].

### ➤ **Dépôt chimique en phase vapeur (CVD) :**

Le dépôt en phase vapeur chimique (CVD) est une méthode dans laquelle le ou les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide déposé sur un substrat.

Les composés volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduits dans une enceinte où sont placés les substrats. Le film est obtenu par réaction chimique entre la phase vapeur et le substrat chauffé. Dans certains cas, une élévation de température est nécessaire pour maintenir la réaction chimique.

Le dépôt CVD est un domaine interdisciplinaire, il comprend un ensemble de réactions chimiques, un processus thermodynamique et cinétique, un phénomène de transport.

### **I.2.8 Influences des paramètres de projection sur le dépôt :**

- **Pression de l'air :** Son accroissement diminue la grosseur du grain mais augmente l'oxydation du dépôt.
- **Pression des gaz :** une pression trop des gaz augment les pertes de métal donc toutes les consommations.
- **diamètre du fil ou du cordon :** Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente le grain du dépôt et les pertes.
- **Distance de projection :** Trop faible, elle crée des turbulences des pertes et des défauts d'adhérence et surchauffe du dépôt trop grand, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence.
- **Vitesse du fil ou du cordon :** Trop grand, elle augment la cadence et grosseur du grain, trop faible, elle augment l'oxydation du dépôt.
- **Vitesse de balayage :** Trop rapide, elle augmente les pertes de métal et donne des épaisseurs de dépôt trop mince 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.

- **Angle de projection :** En principe perpendiculaire ( $90^\circ$ ), la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.
- **Débit des gaz :** Un excès d'oxygène augmente l'oxydation du dépôt, donc sa dureté est réduite sa résistance mécanique. Le dépôt devient fragile et difficile à usiner. Un excès du taux d'acétylène (flamme carburant) entraîne un charbonnage du revêtement. Dans les deux cas, on note l'usure prématurée des buses.
- **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.2.9 Formation et structure d'un dépôt réalisé par projection thermique :**

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

-Des particules infondues.

-Des pores.

-Désoxydes dans le cas de présence d'oxygène dans le matériau projeté ou dans l'environnement. Ces différents éléments ont une forte influence sur les caractéristiques du dépôt. Si la température d'élaboration avoisine la température de mise en solution du matériau, une cristallisation du dépôt a lieu et les frontières entre lamelles sont moins présentes ou disparaissent complètement, avec observation de grains. Le temps de traitement de la particule dans le jet de plasma est de l'ordre de la milliseconde. Le processus d'écrasement de la particule est très rapide, la durée entre l'impact et l'étalement d'une gouttelette est de l'ordre d'une microseconde [27]. Le mécanisme d'étalement et de solidification d'une gouttelette est fondamental pour la projection thermique car c'est une clef de la construction du dépôt [28]. Ce processus est dépendant de plusieurs paramètres :

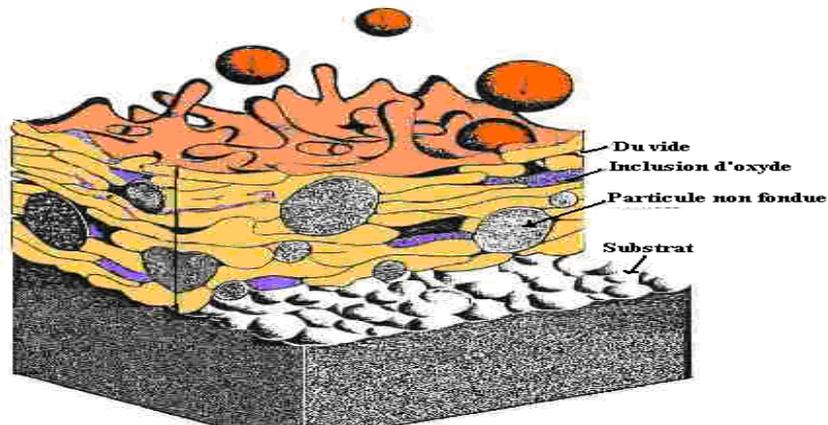
-Nature et forme du matériau.

-Température et vitesse de la particule à l'impact.

-Tension superficielle de la gouttelette.

-Nature du substrat.

-Température, rugosité, mouillabilité du substrat.



**Figure I.13 :** Schéma de principe de la construction de dépôt par projection thermique.

### I.2.10 La préparation des surfaces :

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

-Une propreté qui est un état chimique.

-Une rugosité qui est un état physique.

-Un préchauffage éventuel.

#### I.2.10.1 La propreté des surfaces :

La propreté est le constat visuel de la disparition plus ou moins importante des impuretés de toutes natures, pouvant souiller la surface d'un produit. Elle permet aussi de mettre à jour les modifications physiques éventuelles de la structure (défauts ou autres).

La métallisation exige, que la surface du support devant recevoir un futur revêtement, soit particulièrement propre, exemple de traces de calamine, de rouille, d'huile, ou de graisse, afin de ne pas nuire l'adhérence du métal d'apport. Cette propreté sera obtenue, suivant le type de

polluant de la surface, soit par un dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le cas d'opération de protection anticorrosion.

### **I.2.10.2 La rugosité :**

Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire mais pas suffisante. Il faut créer un accrochage mécanique entre le produit et le support. Celui-ci s'obtient par la réalisation d'une rugosité sur toute la surface. La rugosité est le résultat de la modification micro-géométrique d'une surface, provoqué par le bombardement intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage. Dans les deux cas, le résultat a pour effet :

- D'augmenter l'aire de contact entre substrat et le futur 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'ancrer.

La rugosité est complémentaire de la propreté.

### **I.2.10.3 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. Raison pour laquelle, un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence. Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre et surtout pour les matières plastiques qui ne sont pas conductrices de chaleur.

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

## **I.2.11 Les modes de préparation des surfaces :**

### **I.2.11.1 Dégraissage :**

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

### ➤ **Dégraissage chimique**

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

### ➤ **Dégraissage électrolytique :**

La différence principale avec le dégraissage chimique réside dans le fait que la solution aqueuse de dégraissage est utilisée comme électrolyte dans une cellule où les pièces à dégraisser sont placées soit en position d'anode, soit en position de cathode. Au niveau de ces électrodes, il se produit un dégagement gazeux, oxygène à l'anode, hydrogène à la cathode. Ces dégagement, générateurs d'une agitation locale, associés aux propriétés dégraissantes du bain, assure un excellent nettoyage de la surface et des microfissures sous-jacentes.

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

Pour pallier ces inconvénients, il existe des systèmes qui permettent d'alterner périodiquement les polarités des pièces à dégraisser. Les principaux produits alcalins utilisés sont là encore, la soude caustique, les carbonates, les phosphates et divers silicates, etc. Le choix du bain, comme pour le décapage chimique, est lié à la nature du substrat à nettoyer.

### **I.2.11.2 Décapage :**

#### ➤ **Décapage mécanique :**

Il permet d'éliminer les couches adhérentes de produits de corrosion, de calamines et, plus généralement, d'oxydes ou de revêtements protecteurs anciens mais dégradés. Les vocables spécifiques de décalaminage, dérochage, dé passivation, désoxydation, dérouillage, avivage, activation, sont souvent utilisés en pratique industrielle .Le décapage mécanique, réalisé par brossage, grattage, sablage, grenailage, microbillage... s'effectue soit à sec, soit en phase humide (sablage humide). Dans ce dernier cas, un agent passivant est ajouté à l'eau afin de « freiner » la réactivité de l'atmosphère environnante avec la surface fraîchement mise à nu

### ➤ **Décapage chimique :**

Par dissolution des couches adhérentes sur la surface et/ou du substrat sous-jacent, le décapage chimique conduit au même résultat que le décapage mécanique. On utilise un bain acide pour les pièces en acier ou en titane et un bain alcalin pour les pièces en alliage d'aluminium. Les bains acides contiennent souvent des adjuvants tensioactifs et des inhibiteurs, dits bloquants, qui évitent l'attaque excessive du substrat lorsque la surface est partiellement et localement décapée.

### ➤ **Décapage électrochimique :**

Dans le bain, généralement acide, la pièce est placée en situation d'anode. En plus de l'effet mécanique favorable du dégagement gazeux, ce procédé permet un meilleur contrôle des conditions de décapage et un gain de productivité [29].

### **I.2.11.3 Le sablage :**

Le sablage est un prétraitement mécanique permettant la création d'un état de surface rugueux. Après le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les anfractuosités de la surface et de réaliser ainsi un bon accrochage mécanique.

En contrepartie, cependant, le sablage crée des contraintes de compression dans le substrat au voisinage de la surface traitée. Le sablage se fait généralement à l'aide de particules d'abrasifs (alumine ou SiC, SiO<sub>2</sub>) qui sont entraînées par de l'air sous pression et dirigées sur le substrat.

Un nettoyage ultérieur (par ultrasons par exemple) est indispensable pour éliminer les particules abrasives incrustées dans les creux et toute trace de poussière.

Sachant que le type de particules utilisées pour le sablage joue un rôle important dans la qualité du prétraitement, l'angle d'impact lui aussi est un paramètre important pour cette

technique. C. K. Fang et al [30] ont réalisé l'érosion d'une surface d'aluminium 6063 par des particules de SiC sous trois angles différents 15, 45 et 90 °.

De nombreux inconvénients apparaissent [31] pour ces opérations compte tenu du respect de l'environnement et de l'effet négatif des résidus abrasif [32].

### **I.2.12 La Tribologie :**

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques *tribein* (frotter) et *logos* (parole, étude ou science), a été proposé en 1968 par G. Salomon pour désigner la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. La tribologie est ainsi une branche de la mécanique qui concerne le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces de contact entre deux solides. Frottement et usure se produisent à la surface entre deux solides en contact. La lubrification permet de séparer les surfaces en contact par un film lubrifiant et par conséquent de limiter l'usure. Il s'agit donc d'une science pluridisciplinaire s'appuyant à la fois sur les bases fondamentales de la mécanique et sur les acquis récents de la science des matériaux, en passant par la physico-chimie des surfaces. De tout temps, l'homme a cherché à réduire le frottement et éviter l'usure [33]. De nos jours, la tribologie est présente dans les applications industrielles les plus évoluées (adhérence du contact roue/rail [34] comme dans la vie de tous les jours (écriture avec une craie sur un tableau,...)).

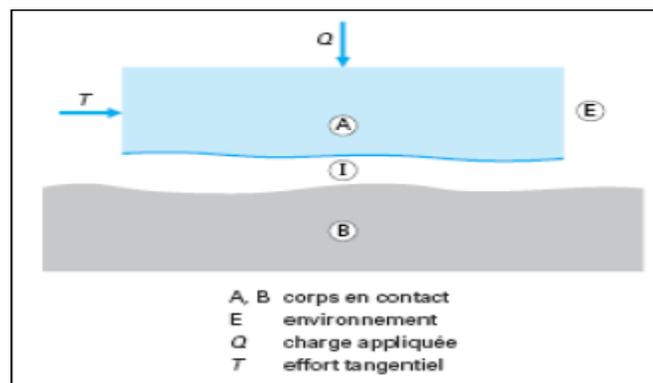
La tribologie s'est tout d'abord intéressée principalement au volume des matériaux en contact par la détermination des lois de comportement de frottement et d'usure (approche mécanique). Puis, la tribologie des surfaces a fait son apparition associée à la physico-chimie des surfaces (approche matériaux) pour enfin arriver à la tribologie des interfaces (approche complémentaire mécanique/matériaux) [35]. Cette dernière notion a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure.

La lubrification ne sera pas abordée dans ce travail. Seuls les problèmes liés au frottement et à l'usure en régime non lubrifié seront traités et plus particulièrement dans le cas de frottement en glissement sec.

#### **I.2.12.1 Système tribologique**

La tribologie des interfaces concerne le milieu inter-facial entre les deux corps en contact. On définit ainsi un contact tribologique ou tribosystème comme étant composé de trois éléments principaux (**Figure I.15**) deux solides A et B en contact (premiers corps) et le milieu inter-

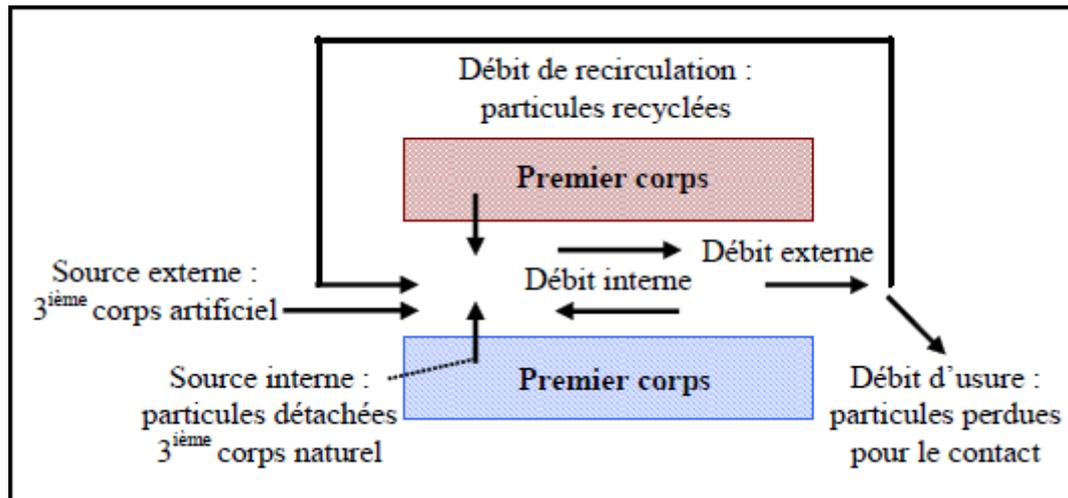
facial I désigné sous le terme de troisième corps. Ce troisième corps sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de celles des premiers corps. L'origine de ce milieu inter-facial peut être externe (lubrifiant solide ou liquide) ou interne par formation in situ (détachement de particules des premiers corps). Ce tribosystème se trouve dans un environnement E qui constitue l'ambiance de fonctionnement du contact. Des interactions entre cet environnement et le contact peuvent ainsi avoir lieu en fonction de sa composition, sa température, sa pollution éventuelle, ... [36].



**Figure I.14:** Représentation schématique d'un tribosystème.

### I.2.12.2 Le circuit tribologique :

Au cours du frottement, les particules du troisième corps sont constamment en mouvement et sont soumis à des gradients de vitesse. Cette circulation de matière à l'intérieur et à l'extérieur du contact est définie sous le terme de circuit tribologique, concept proposé par Y. Berthier [37] pour compléter celui des mécanismes d'accommodation des vitesses et comprendre la relation entre le troisième corps et l'usure dans un contact donné. Il s'agit d'une représentation en deux dimensions des débits de troisième corps dans un contact élémentaire (Figure I.16).



**Figure I.15:** Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre Deux solides.

Suivant les mécanismes de dégradation de surface qui seront décrits dans le paragraphe suivant, des particules peuvent se détacher des premiers corps du fait de leur dégradation. Il s'agit d'une source interne qui conduit à la formation d'un troisième corps naturel dans le contact (débit source interne). L'introduction d'un troisième corps artificiel (lubrifiant solide ou liquide) correspond à une source externe (débit source externe). Ces particules de troisième corps peuvent rester piégées dans le contact ou bien être évacuées hors du contact. On parlera alors de débit interne et externe. Le débit interne représente la circulation du troisième corps dans le contact. Le débit externe est le débit de troisième corps qui s'échappe du contact. Il se divise en deux composantes : un débit de recirculation lorsque les particules sont réintroduites dans le contact et un débit d'usure lorsque les particules sont définitivement perdues pour le contact et ne participent plus à l'accommodation de vitesse.

Dans cette approche, l'usure n'est pas relative à la dégradation des premiers corps (ce qui correspondrait au débit interne de troisième corps), comme cela est généralement indiqué dans la bibliographie. Elle est ici représentée par la sortie des particules hors du contact, qui deviennent alors des particules (débris) d'usure. Tant que les particules restent dans le contact, elles peuvent avoir un rôle actif à jouer (support de charge, accommodation des vitesses,...)

### I.2.13 Mécanismes de dégradation de surface :

#### I.2.13.1 L'usure :

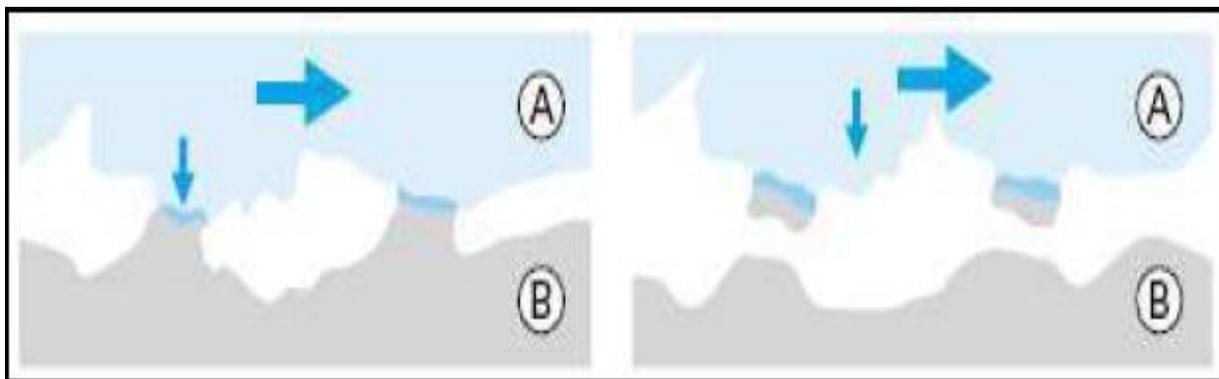
Est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cotes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.

Les mécanismes de dégradation des matériaux provoquant le détachement des particules des premiers corps (débit source interne) et conduisant à l'usure sont classés selon plusieurs familles dont les principales sont décrites ci-dessous. Ces phénomènes d'usure peuvent, en théorie, se produire simultanément, certains étant prépondérants par rapport à d'autres en fonction du tribosystème étudié.

### ➤ L'usure par adhésion :

Elle est associée à la formation de joints d'adhérence aux points de contact situés sur les aspérités des surfaces de deux corps frottant. La résistance de la jonction adhésive est fonction de la nature physico-chimique des matériaux en contact. Sous l'effet du cisaillement, un transfert de matière entre les deux corps se met en place (**Figure I.17**).

Dans le cas de liaisons d'adhésion peu résistantes, le transfert de matière est limité et l'usure reste douce. L'usure adhésive est donc à la fois d'origine mécanique et physicochimique



**Figure I.16:** Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive d'après.

### ➤ L'usure par abrasion :

Le phénomène d'abrasion apparaît lorsqu'un corps dur déforme plastiquement, avec ou sans enlèvement de matière, un corps plus mou. Ce mécanisme d'usure qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes (usure à deux corps), devient rapidement une usure à trois corps (**Figure I.18**). En général, des sillons formés parallèlement à la

direction de déplacement par les aspérités du corps le plus dur ou des empreintes (déformation plastique) sont bien visibles à l'issue de ce type d'usure.

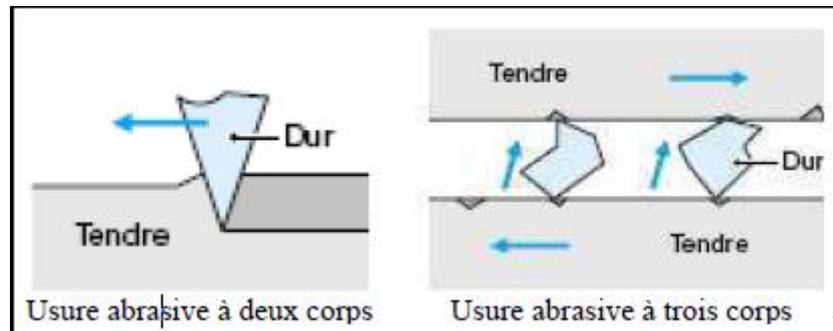


Figure I.17: Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive.

➤ **L'usure par fissuration**

Les contraintes mécaniques générées par le frottement peuvent entraîner la création et la propagation de fissures.

Dans le cas des matériaux ductiles (tels que les matériaux métalliques), il est question d'usure par fatigue superficielle ou par délamination. La rupture par fissuration a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales. A terme, des écailles dues à la propagation des fissures apparaissent dans les zones de frottement (**Figure I.19**).

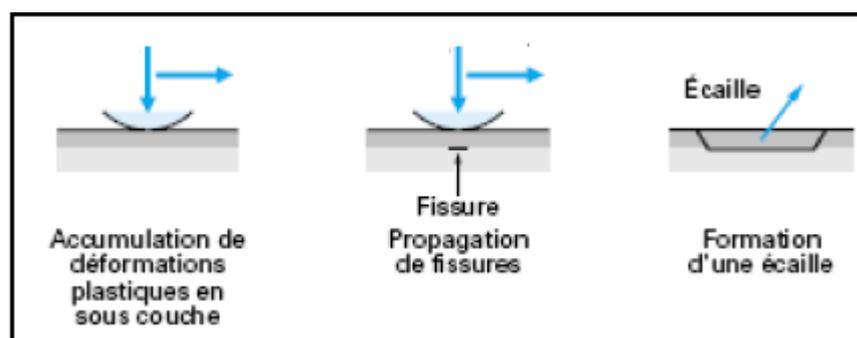
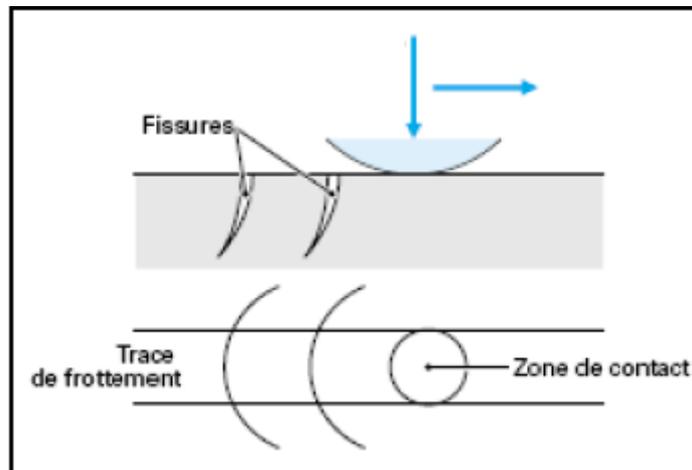


Figure I.18: Usure par fissuration (cas des matériaux ductiles).

Pour les matériaux à comportement fragile (typiquement les céramiques), les fissures se créent dans les zones où les contraintes en tension sont les plus importantes. Elles sont associées à un dépassement local du seuil de rupture du matériau. Elles se situent à l'arrière

du contact et se propagent perpendiculairement à la surface (**Figure I.20**). Ils agissent d'une usure par fracturation.



**Figure I.19:** Usure par fissuration (cas des matériaux fragiles).

➤ **L'usure tribochimique :**

Cette forme d'usure apparaît lorsque le frottement a lieu dans un environnement réactif pour les matériaux en présence (atmosphère, lubrifiant,...). Dans ce cas, l'usure est régie par la réactivité chimique des premiers ou troisièmes corps avec l'environnement. Cette réactivité peut être également créée ou activée par l'énergie dissipée en frottement dans l'interface. Il y a tout d'abord création de débris d'usure provenant des premiers corps, initiée par un des mécanismes décrits précédemment (adhésion, abrasion, fatigue). Ensuite, l'oxydation de ces débris peut conduire à la formation d'un film d'oxydes, de faible épaisseur, adhérent au substrat, qui joue un rôle protecteur contre l'usure adhésive.

L'usure se manifeste lorsque les sollicitations de frottement au contact entraînent l'élimination des couches formées.

La cinétique de ce phénomène est donc gouvernée par la compétition entre la formation du film réactionnel et sa destruction par frottement. La réactivité du milieu peut être primordiale dans la lutte contre l'usure adhésive car elle doit être suffisamment élevée pour former rapidement un film protecteur mais ne doit pas être excessive pour ne pas consommer les corps en contact.

**I.3.1 Définition de la corrosion [38] :**

La corrosion est définie comme une « interaction physico chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie ». Pour qu'il y ait corrosion, il faut que deux zones de la structure métallique soient en contact électrique et qu'elles aient un rôle différent, l'une anodique et l'autre cathodique ; on notera que ces zones peuvent parfois se superposer. Donc, la corrosion d'un matériau est l'interaction destructive entre ce matériau (alliages métalliques, plastiques, béton, .....etc.) avec son environnement agressif.

Pratiquement tous les milieux sont corrosifs. On parle de la corrosion par :

- L'atmosphère.
- Les milieux liquides (solution aqueuse organique, métaux fondus, etc....).
- Les gaz.
- Les sels,.....etc.

Les dégâts provoqués par ce phénomène semblent donc inévitable [39]. Pour ne citer que quelques chiffres, mentionnons que les pertes financières annuelles produites par la corrosion s'élevaient à 12. Milliards de dollars par an au Canada en 1989. En Grande- Bretagne, ces pertes atteignent 1365.Milliards de livres en 1971, 6 Milliards de roubles en URSS et 19 Milliards de Mark pour la République Fédérale d'Allemagne. Dans ces deux derniers cas, les valeurs sont établies pour l'année 1969 [40].

### **I.3.2 Processus de la corrosion :**

La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il est exposé à la corrosion et de même il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées [41].

La distinction peut être faite entre deux processus :

- corrosion en milieu humide ou corrosion aqueuse.
- la corrosion sèche.

#### **I.3.2.1 La corrosion en milieu humide :**

La corrosion est un phénomène électrochimique: cela signifie que les pieux sont créés à la surface de l'acier, l'un des pôles, l'anode, étant utilisé pour l'autre, la cathode, toujours intacte. L'électrolyte est constitué d'eau, plus ou moins conductrice et d'oxygène.

C'est le phénomène de corrosion le plus important et elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant une dissymétrie de composition. L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées) [42].

L'érosion humide est un phénomène électrochimique permettant l'échange d'un électron entre un milieu oxydant et un donneur moyen, par exemple un métal M (fer, chrome, etc.) et un électrolyte, qui se décompose en [43] :

Une réaction anodique d'oxydation ou de mise en solution du métal qui donne des électrons.



Une réaction cathodique de réduction d'un oxydant (par exemple  $O_2$ ) dissous dans la solution qui prend des électrons.



Comme il ne peut exister d'électrons libres dans la solution, les deux réactions d'oxydo- réduction (« redox ») sont simultanées et peuvent s'écrire à l'état d'équilibre :



### I.3.2.2 La corrosion sèche :

C'est une interaction hétérogène entre la phase métallique et la phase gazeuse. Le processus de réduction de l'oxydation de la corrosion chimique dans la sphère atomique est effectué avec le milieu environnant sans présence d'électrolyte. Ainsi, la corrosion chimique pure n'implique pas le passage d'un courant électrique, où le flux électronique s'arrête, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires d'interaction se produit directement. L'air renferme l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides (anhydride carbonique  $CO_2$  et sulfureux  $SO_2$ , hydrogène sulfureux  $H_2S$  etc.) ce sont les agents corrosifs mais le plus souvent c'est le  $CO_2$ . On admet que la formation de la rouille est alors la résultante de l'action de tous

ces corps, mais il faut qu'un acide soit présent, même en protection faible pour que l'attaque puisse se produire [44].

L'attaque du métal nécessite une réaction chimique dans l'environnement sans l'intervention du courant électrique à haute température et la réaction qui se produit sous la forme de:



### I.3.3 L'eau de mer :

L'eau est un composé très abondant dans la nature qui recouvre plus de 70% de la surface de la terre. On estime qu'il y a sur la planète environ 1.4 Milliards de m<sup>3</sup> d'eau [45]. Cependant, la majeure partie (97%) de cette eau se présente sous forme d'eau salée dans les mers et les océans.

Compte tenu de sa composition relative stable et du volume énorme qu'elle représente, l'eau de mer constitue une solution électrolytique originale et mérite plus d'attention sur ses propriétés et caractéristiques physicochimiques.

**Tab I.2:** Composition chimique minérale de l'eau de mer selon Aminot et Chaussé-pied [46].

Composé dissous (total)	Concentration (mg.kg <sup>-1</sup> )	Concentration (mol.kg <sup>-1</sup> )
<b>Chlorure</b>	19400	5,5 10 <sup>-1</sup>
<b>Sodium</b>	10800	4,7 10 <sup>-1</sup>
<b>Sulfate</b>	2700	1,8 10 <sup>-2</sup>
<b>Magnésium</b>	1300	5,3 10 <sup>-2</sup>
<b>Calcium</b>	410	1,0 10 <sup>-2</sup>
<b>Potassium</b>	400	1,0 10 <sup>-2</sup>
<b>Bicarbonate</b>	142	2,3 10 <sup>-3</sup>
<b>Bromure</b>	62	7,7 10 <sup>-4</sup>
<b>Acide borique</b>	26	4,2 10 <sup>-4</sup>

#### I.3.3.1 Conductivité électrique

Elle est de l'ordre de 40 μs.cm<sup>-1</sup>. La conductivité de l'eau de mer subit des variations importantes suivant la température et la salinité (Tab I.2).

**Tab I.3:** Conductivité de l'eau de mer (μs.cm<sup>-1</sup>) [47].

Salinité (%)	Température		
	25°c	15°c	5°c

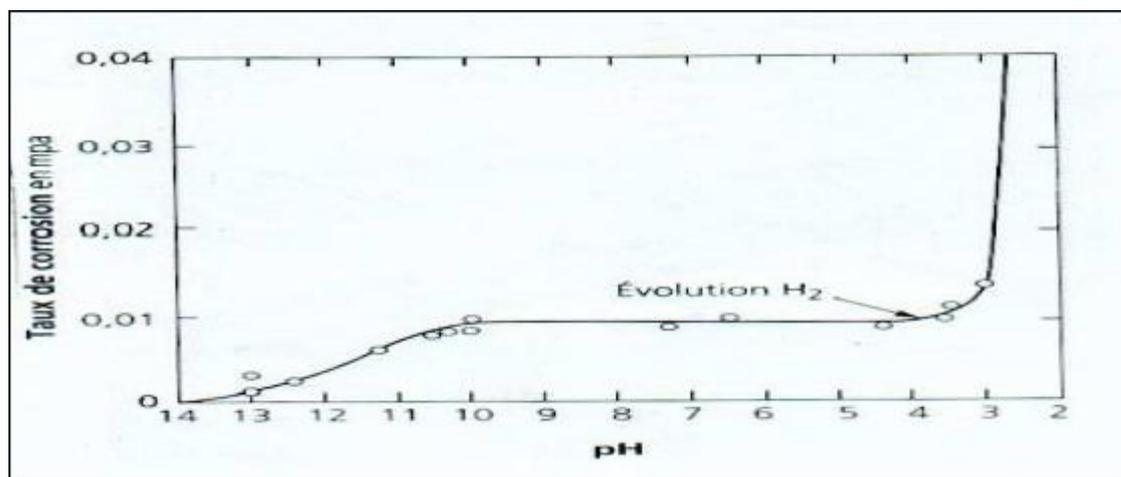
10		17,345		13,967	10,616
	20		32,188	25,967	20,816
	30		46,213	37,351	29,090
	35		53,025	42,896	33,457

**I.3.3.2 pH :**

Le pH de l'eau de mer en surface est stable et proche de 8,2. Il varie très légèrement selon l'activité de la photosynthèse du plancton et des algues marines ainsi qu'avec la profondeur.

Océan ou mer	Ph
Atlantique	8,25
Indien	8,25
Baltique	8,15
Méditerranée	8,00
rouge	8,20

**Tab I.4:** pH de l'eau de mer [48].



**Figure I.20:** influence du pH sur le taux de corrosion.

**I.3.3.3Oxygène dissous :**

Dans l'eau de mer aérée, la concentration en oxygène dissous est très variable puisqu'elle dépendes facteurs physiques, chimiques et biologiques suivants [49] : échanges à l'interface air- océan, diffusion et mélanges au sein de la masse d'eau, utilisation dans les phénomènes de photo oxydation, les réactions d'oxydation chimique, les mécanismes de respiration et de nitrification parles organismes aquatiques, la production par la photosynthèse.

La dissolution de l'oxygène est gouvernée par les lois physiques et dépend de la pression atmosphérique, de la température et de la salinité de l'eau.

La solubilité de l'oxygène est de  $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$  à  $20^\circ\text{C}$  en eau pure alors qu'elle est réduite à  $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$  à  $20^\circ\text{C}$  pour une salinité de 35‰. En général, la concentration en oxygène dissous est comprise entre 0 et  $5 \cdot 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}$ .

La quantité d'oxygène dissous de provenance atmosphérique peut être théoriquement calculée d'après la loi de Henry qui stipule que le volume de gaz dissous est proportionnel à la concentration de ce gaz dans la phase vapeur en contact avec le liquide :

$$v = \alpha \cdot C \cdot P$$

Avec

**v** : volume du gaz dissous dans la phase liquide

**$\alpha$**  : Coefficient de solubilité du gaz

**C** : Concentration du gaz dans la phase vapeur

**P** : Pression totale

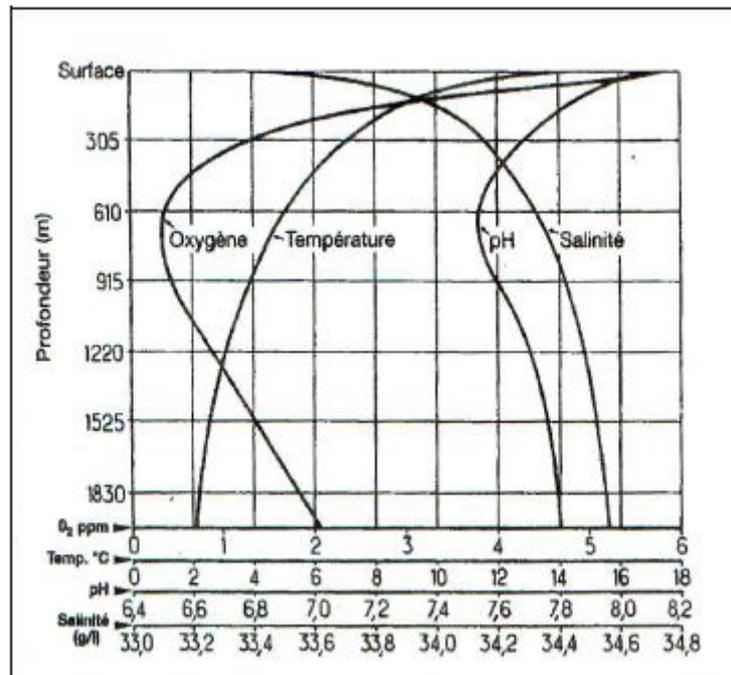
L'écart constaté entre les quantités calculées et mesurées est dû aux phénomènes internes de production et de consommation d'oxygène dissous (photosynthèse et respiration) [50].

Le rôle de l'oxygène sur la tenue à la corrosion des métaux en eau de mer est d'accélérer le processus de corrosion (oxydation du métal), par contre à des teneur plus ou moins élevée en oxygène le rôle est inversé, par ce que dans ce cas l'oxygène va contribuer à la formation d'un film naturel qui protège le métal [51].

### **I.3.3.4 La température :**

L'augmentation de la température de l'eau de mer devrait se traduire par une plus grande agressivité de celle 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.

C'est loin d'être vrai par ce que l'augmentation de la température a des effets contradictoires sur la corrosion : la solubilité de l'oxygène décroît, l'activité biologique augmente et la précipitation des carbonates de magnésium et de calcium, du fait de l'augmentation de la température, crée un film protecteur [52].



**Figure I.21:** évolution de la teneur en oxygène dissous, de la salinité, de la température et Du pH en fonction de la profondeur.

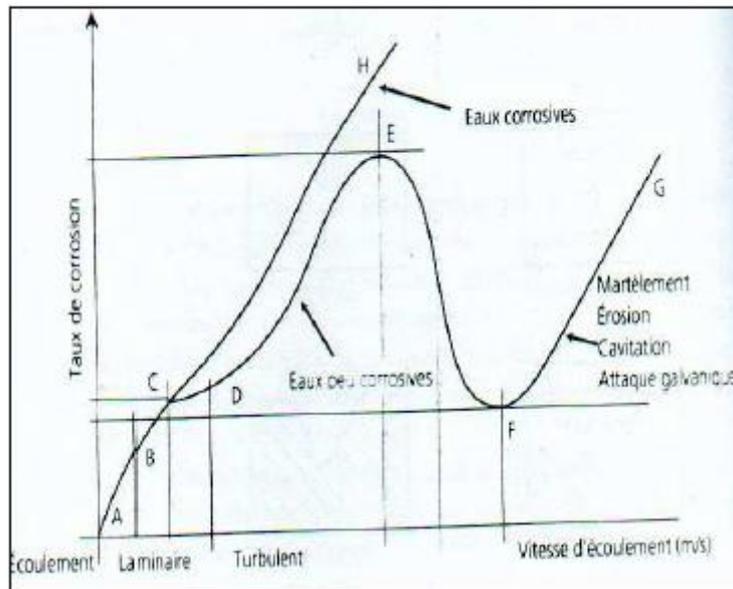
### I.3.3.5 La vitesse du mouvement de l'eau de mer :

Comme pour l'eau douce, la stagnation de l'eau de mer est un facteur défavorable à la tenue à la corrosion [53]. Le choix de la vitesse de circulation de l'eau de mer dans les faisceaux tubulaires des échangeurs de chaleur est important.

L'écoulement laminaire favorise la formation de dépôts entraînant la corrosion cavernueuse et une

vitesse élevée peut détruire localement ou totalement le film protecteur fixé à la surface du métal.

La courbe de la (Figure I.23) représente les variations du taux de corrosion en fonction de la vitesse d'écoulement dans les eaux plus ou moins corrosives.



**Figure I.22:** Variation du taux de corrosion en fonction de la vitesse d'écoulement.

### I.3.4 Méthodes électrochimiques :

Parmi les méthodes de contrôle du phénomène de corrosion, les méthodes électrochimiques s'avèrent d'une importance capitale pour la compréhension du phénomène étant donné les informations qu'elles fournissent.

L'intérêt de ces méthodes tient au fait qu'il est possible en quelques heures de réaliser les essais dont les principes sont basés sur la mesure du courant (I) en fonction de la variation de la tension appliquée (E) à l'échantillon.

Ces méthodes ont certains avantages et inconvénients, on cite:

- Permettent d'estimer assez rapidement les vitesses de corrosion.
- Elles sont suffisamment sensibles pour déterminer à la fois les fortes et faibles vitesses de corrosion,
- Sa mise en œuvre est relativement aisée dans le cadre d'un laboratoire.

Néanmoins, il faut noter que leurs principes reposent essentiellement sur l'hypothèse selon laquelle les réactions anodiques et cathodiques occupent chacune la totalité de la surface et prend en considération le potentiel mixte et non pas le potentiel d'équilibre thermodynamique. Les méthodes électrochimiques d'étude de la corrosion peuvent être classées en deux grands groupes : un premier groupe intéresse les méthodes dites stationnaires (classiques) et le second groupe les méthodes non stationnaires dites transitoires.

Les méthodes électrochimiques classiques présentent l'inconvénient de négliger certaines composantes caractéristiques de l'interface métal/solution et de ne pas pouvoir séparer et analyser les étapes élémentaires d'un processus complexe.

C'est le cas en particulier des termes capacitifs ou selfiques de la double couche électrochimique.

D'autre part, ni la méthode de Tafel, ni celle de Stern et Geary ne permettent de déterminer directement la contribution de la résistance de la solution à l'évaluation des courants de corrosion [54].

### **I.3.5 La cellule électrochimique :**

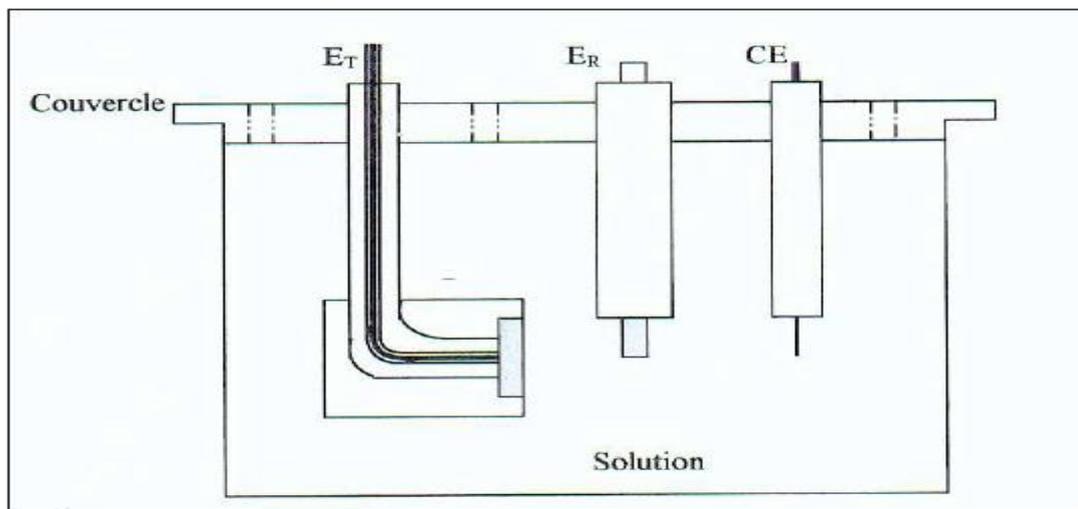
Le dispositif utilisé pour l'étude du comportement à la corrosion des échantillons est constitué d'une cellule d'essai et d'un dispositif permettant les caractéristiques électrochimiques (suivi du potentiel libre et tracé des courbes de polarisation).

Le montage expérimental utilisé est constitué de :

❖ Une cellule électrochimique en verre pyrex polycarbonate afin d'éviter toute contamination de la solution (**Figure I.24**). Cette cellule comporte trois électrodes :

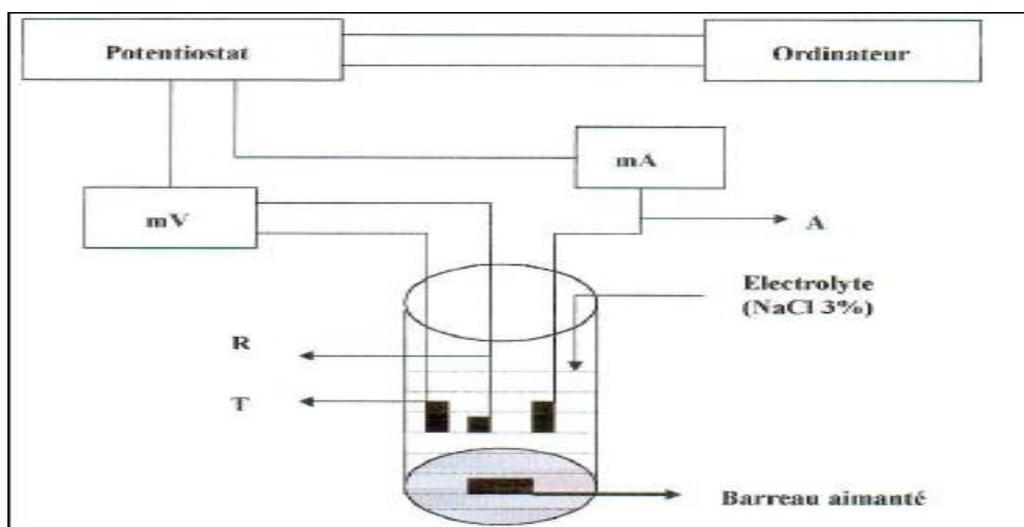
- Electrode de travail (échantillon élaboré).
- Electrode de référence au (Ag/AgCl) saturé en KCl (permet de mesurer la tension de l'électrode étudiée).
- Contre électrode en platine (permet de déterminer le courant traversant l'électrode de travail lors de tracés potentiodynamiques).

Ces trois électrodes sont plongées dans un récipient de 400 ml dans lequel sont aménagés des orifices de diamètres et d'espacements bien étudiés permettant l'introduction des trois électrodes et permet de recevoir également des systèmes d'agitation, de contrôle de température, d'aération et de désaération.



**Figure I.23:** Schéma descriptif d'une Cellule électrochimique.

La cellule est connectée avec le potentiostat- galvanostat de type VOLTA LAB piloté par un microordinateur. Le potentiostat- galvanostat modèle PGP 201, 230 V, 50-60 Hz à configuration électronique relié à un microordinateur permettant aux mesures de polarisation potentiocinétique d'être indiquées et enregistrées automatiquement. La figure (**Figure I.25**) illustre ce montage expérimental.



**Figure.24 :** Dispositif de mesure d'une courbe de polarisation.

# ***CHAPITRE II***

## ***MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES***

**II. Introduction :**

Dans ce chapitre, on présentera en premier lieu les dispositifs expérimentaux de projection thermique utilisé pour l'élaboration des dépôts, dans la deuxième partie, on présentera les différentes techniques de caractérisation : l'analyse structurale par la diffraction X(DRX) et microscope optique et la caractérisation mécanique basé sur les tests de dureté des différent dépôts en superalliage à base Nickel et la caractérisation électrochimique.

**II.1 Matériaux utilisés :****II.1.1 Substrat :**

Le substrat utilisé, dans notre étude, est un acier de nuance E335 non allié d'usage courant en mécanique générale. Non traité, il offre une bonne résistance mécanique, utilisé pour des vissant fin, pignons, clavettes, axes, bagues. La teneur en pourcentage massique des éléments constituants le substrat est représenté dans le **tableau II.1**.

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

<b>E335</b>	<b>C</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>P</b>	<b>Si</b>	<b>V</b>	<b>S</b>
	0,1	0,007	0,119	0,231	Bal	0,050	0,044	0,01	0,010

**II.1.2 Revêtements réalisés :**

Dans notre cas, les matériaux de départ choisis pour réaliser les revêtements par projection flamme-poudre est un superalliage à base du nickel de formule (Ni, Mo, Al) et un autre (Ni, Al, Cr, Mo). Cet alliage présente une haute résistance à la corrosion et une bonne résistance au fluage.

**Tableau II. 2 :** Composition et caractéristique de ProXon21021 (P21).

	<b>Applications et Caractéristiques</b>	<b>Composition</b>	<b>Température max d'utilisation</b>
ProXon21021 (P21)	Portées mécaniques, rattrapage de côtes. Revêtements anti usure de faibles et fortes épaisseurs. S'utilise sans sous-couche d'accrochage. Le meilleur état de surface est obtenu par rectification.	Ni : 90 (%) Al : 5-10 (%) Mo : 1-5 (%)	850°C

**Tableau II.3 :** Composition et caractéristique de ProXon21031 (P31).

	<b>Applications et Caractéristiques</b>	<b>Composition</b>	<b>Température max d'utilisation</b>
ProXon21031 (P31)	Portées mécaniques, rattrapage de côtes. Revêtements anti usure de faibles et fortes épaisseurs. S'utilise sans sous-couche d'accrochage. Le meilleur état de surface est obtenu par rectification	Ni : 90 (%) Al : 10 (%) Cr : 1-5(%) Mo : 1-5(%)	850°C

## II.2 Présentation des échantillons :

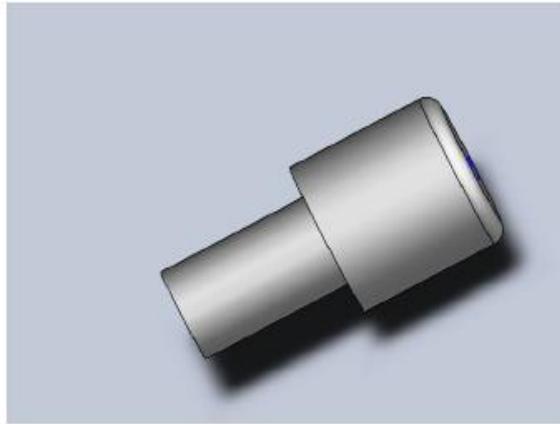
### II.2.1 Elaboration des échantillons :

Les échantillons utilisés pour la projection thermique, ont été usinés sur une fraiseuse au niveau du hall de technologie ou on à effectuer :

- Découpage, dans le but de réaliser la forme de l'échantillon.

- Un fraisage, de surface avec une fraiseuse conventionnelle.
- Un dressage, pour avoir un bon état de surface, de la surface à revêtir.
- Un chan freinage, dans le but d'avoir un contact parfait entre le revêtement et la surface antagoniste.

Les échantillons élaborés présentent la forme suivante :



**Figure II.1:** Echantillon utilisé pour la projection.

### **II.3 Préparation des surfaces à revêtir :**

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

#### **II.3.1 Dégraissage :**

Le dégraissage est l'élimination des huiles et diverses particules ou poussières déposés volontairement ou non à la surface de l'acier pendant les opérations de stockage et mise en forme.

#### **II.3.2 Grenaillage :**

Il s'agit d'un procédé de préparation de surface consistant à projeter à l'aide d'une lance sous pression un abrasif sur la pièce à nettoyer.

Le but du grenaillage est d'une part d'éliminer les oxydes présents en surface de la pièce et d'autre part d'augmenter la rugosité de surface afin d'obtenir une meilleure adhérence de l'email.

#### **II.3.3 Préchauffage :**

Un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence, une modification mécanique et une modification de la mouillabilité de la surface par un effet d'oxydation. En effet, les caractéristiques mécaniques de la plupart des matériaux chutent avec l'augmentation de la température.

Il peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile.

#### II.4 Réalisation des dépôts :

##### II.4.1 Paramètres de projection :

Les paramètres de projection utilisés pour obtenir notre dépôt, ils sont résumés dans le **tableau II.4** suivant :

**Tableau II.4** : Paramètres de projection utilisé.

Paramètres de projection	
gaz	acétylène
Pression de l'air (bar)	4
Pression de l'oxygène (bar)	4
Pression du gaz acétylène (bar)	0,7
Distance de projection (mm)	150
Angle de projection	90°

##### II.4.2 Procédé d'élaboration des revêtements par la projection flamme-poudre :

Pour l'élaboration de nos dépôts, le pistolet de projection utilisées un pistolet à projection flamme-poudre ou le matériau d'apport se présente sous forme d'une poudre comme nous montre la (**Figure II.2**). Muni d'une torche pour l'entraînement de la poudre, les particules injectées est fondues et projetées par la flamme, les particules obtenues seront véhiculées par un flux d'air comprimé. Un système de contrôle des gaz, composé de débitmètres à flotteur pour régler le débit d'oxygène et d'acétylène et des manomètres régulant la pression des gaz de la flamme d'air et d'un support échantillon. Lors de la projection, le pistolet est placé perpendiculairement à la surface des substrats à une distance contrôlée manuellement. Un jet d'air comprimé est dirigé vers la surface du dépôt après la projection, pour contrôler le refroidissement, avec certain paramètres de projection. Ce Procédé peut être mis en œuvre dans tous les domaines pour résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique.

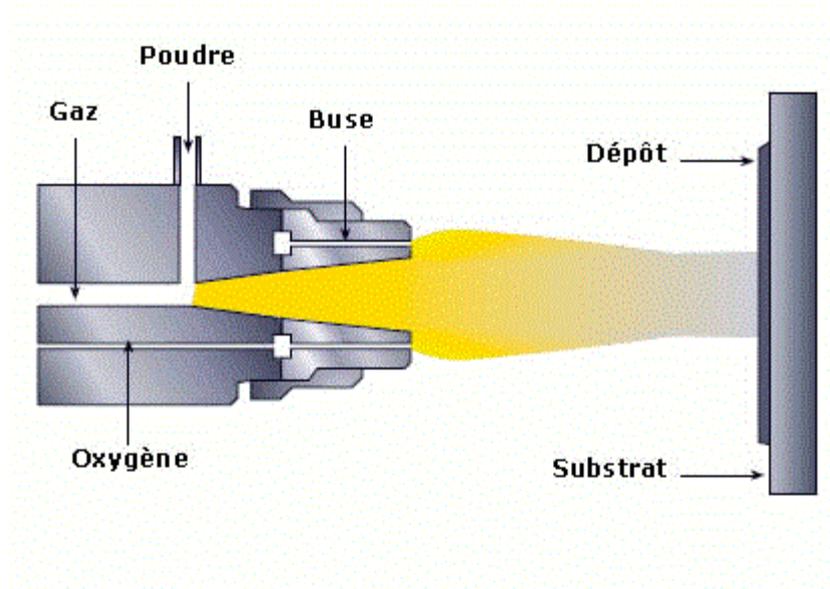


Figure II.2 : Schéma du pistolet à flamme-poudre.

## II.5 Observation métallographique :

### II.5.1 Préparation des échantillons pour l'observation métallographique :

Après les traitements thermiques, différentes polisseuses 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.3: Différents types de polisseuses.

**II.5.2 Le microscope métallographique :****II.5.2.1 Système de Fonctionnement :****II.5.2.1.1 Préparer l'observation :**

Vérifier que le plus petit objectif est en place et bien enclenché placer la préparation microscopique sur la platine et fixer la avec les valets de la platine ou dans les mâchoires de la sur platine.

**II.5.2.1.2 Réaliser les réglages :**

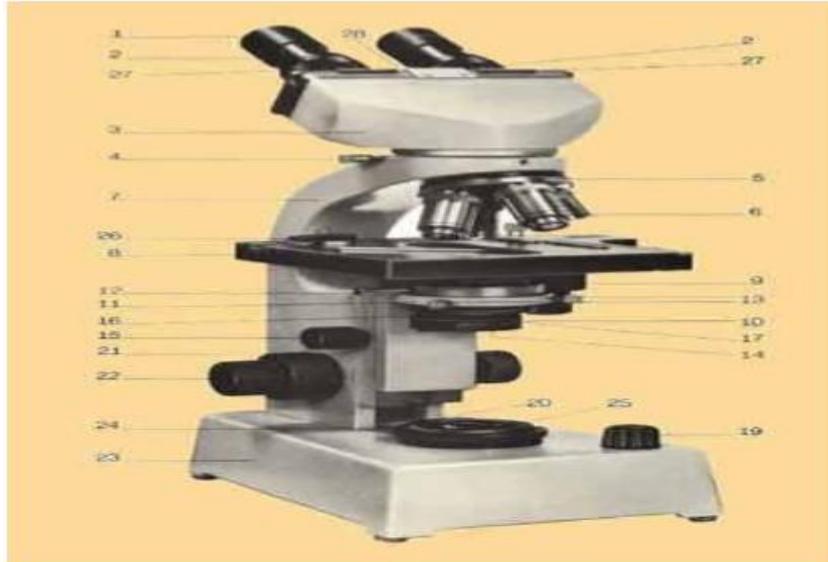
- Éclairage non intégré: à l'aide du miroir concave, orienter le faisceau lumineux dans l'axe optique du microscope.
- Éclairage intégré: régler l'intensité lumineuse en tournant le bouton du potentiomètre au maximum de sa puissance pour obtenir une lumière parfaitement blanche.
- Régler la quantité de lumière avec le diaphragme, puis utiliser le condensateur pour affiner la qualité de l'éclairage.
- Regarder dans l'oculaire.
- Faire une première mise au point avec la vis micrométrique.
- Affiner la mise au point avec la vis micrométrique.

**II.5.2.1.3 Utiliser les objectifs :**

- Utiliser les objectifs dans l'ordre croissant de leur grossissement.

**II.5.2.1.4 Rechercher puis centrer la région la plus favorable de l'objet :**

- placer la zone à grossir au centre du champ de vision de l'oculaire en déplaçant la préparation manuellement ou par l'intermédiaire de la sur platine.



**Figure II.4:** Microscope Optique.

01- Oculaires.02 - Tubes porte-oculaires réglables.03- Tête binoculaire tournante.04 - Vis de blocage de la tête binoculaire.05 - Tourelle revolver porte-objectifs.06 - Objectif (parafocalité de 45 mm).07 - Potence verticale.08 - Platine avec chariot incorporé.09 - Boutons de commande du chariot.10 - Condenseur d'Abbe à 3 lentilles.11 - Sous-platine mobile verticalement.12 - Vis de fixation du condenseur.13 - Vis de centrage du condenseur.14 - Lentille escamotable.15 - Réglage en hauteur du condenseur.16 - Diaphragme d'ouverture.17 - Porte-filtre escamotable.19 - Interrupteur et réglage de la puissance de l'éclairage incorporé.20 -Prise du cordon d'alimentation.21 - Mise au point rapide bilatérale.22 - Mise au point micrométrique bilatérale.23 - Base du statif (contenant l'éclairage).24 - Collecteur avec diaphragme de champ.25 - Cavité pour filtres.26 - Chariot mobile.27 - Écartement réglable des oculaires.28 - Indicateur d'écartement inter pupillaire.

### II.5.3 Diffraction des rayons X (D.R.X) :

Les diagrammes de diffraction RX ont été enregistrés à l'aide d'un diffractomètre de type X'PERT PRO MRD de chez PANalytical, de l'université de Bejaïa, équipé d'un tube RX à anode en cuivre (**Figure II.5**). Les composantes  $K\alpha_1$  et  $K\alpha_2$  sont filtrées par un monochromateur courbe en graphite monté dans le faisceau secondaire. La forte présence de défauts dans ce type de matériaux engendre un bruit de fond important ; pour améliorer la statistique de comptage et augmenter le rapport pics/fond continu, un temps d'acquisition de 40 s par pas angulaire de  $0,04^\circ$  a été utilisé sur l'intervalle s'étalant entre  $35^\circ$  et  $100^\circ$  ( $2\theta$ ). L'identification des phases cristallines présentes est faite par comparaison des raies observées avec celles des phases appropriées contenues dans la base de données PDF2.



**Figure II.5 :** Dispositif diffraction X : X'PERT PRO MRD de chez PANalytical.

## **II.6 Caractérisation mécanique (tests d'usure) :**

### **II.6.1 Principe du teste d'usure :**

Afin de suivre le comportement à l'usure des différents échantillons au dépôt réalisé, on fait subir aux échantillons un essai de masse par abrasion en fonction de temps. Ce dernier est réalisé en jouant sur trois paramètres qui influent sur l'usure à savoir : la charge, le temps et la vitesse.

#### **II.6.1.1 La perte de masse :**

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 pour les pièces d'une masse inférieure à 200g.

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

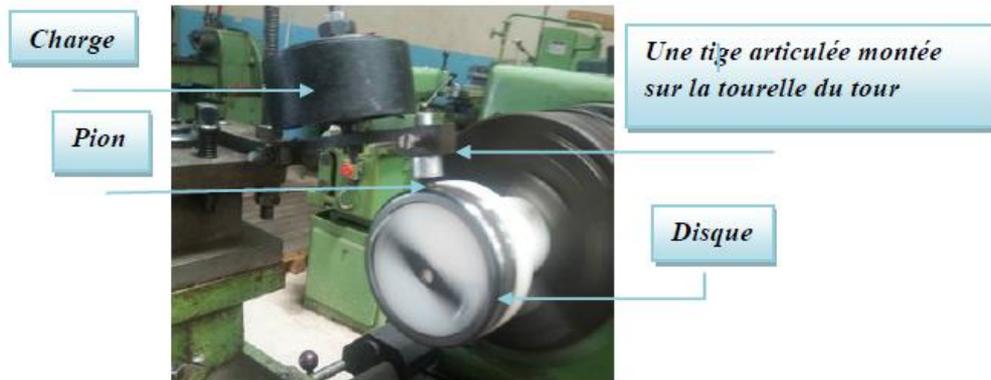
#### **II.6.1.2 Représentation du dispositif d'usure :**

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 la (**figure II.6**).

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

**II.6.1.3 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 :



**Figure II.6:** Représentation du dispositif d'usure utilisé.

Avant de commencer les tests, on doit nettoyer notre échantillon des éléments additifs à l'aide de l'éthanol.

- 1)- prendre la masse initiale ( $m_0$ ) de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique de précision 0.1 Mg.
- 2)- Nettoyer le cylindre monté sur le mandrin.
- 3)- Introduire l'échantillon dans le dispositif, et actionner le tour.
- 4)-Après la fin du temps de chaque essai, on nettoie l'échantillon des additifs tout en prenant la nouvelle valeur de sa masse ( $m_f$ ).

➤ **Les charges appliquées :**

On a appliqué des charges lors des tests d'usure pour les différents échantillons :

- les charges appliquées (5N, 30N)

➤ **La vitesse :**

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

- à 90 tr/min
- à 180tr/min

➤ **La lubrification :**

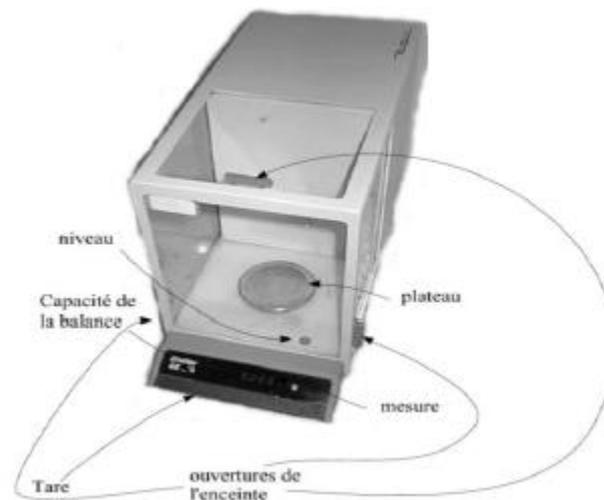
Les tests d'usure ont été réalisés sans lubrifiant sur le dépôt.

**II.6.1.4 Paramètres et conditions expérimentales de frottement :**

Pour les tests de frottement, le glissement se fait sans lubrification et à des vitesses constante. Les vitesses imposée sont limitée par la cadence choisie pour chaque teste, les essais sont donc réalisés à des déférentes vitesses et à des charges imposée. Celle-ci pour déterminée les pertes de masse de deux surface de contact de pion sur le disque.

**II.6.1.5 Evaluation de l'usure des pions (frotteur) :**

Avant et après chaque essai de frottement, les pions de formule **A<sub>60</sub>**, **ProXon 21021(P21)**, **ProXon 21031(P31)**, sont contrôlée avec une balance analytique montré sur la (**figure II.7**) afin de détecter une éventuelle perte de matière.



**Figure II.7:** Balance analytique.

L'observation par microscope optique du faciès d'usure des pions est la méthode d'évaluation retenue pour la mesure du volume usée.

**II.7 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 Volta master 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.7.1 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.

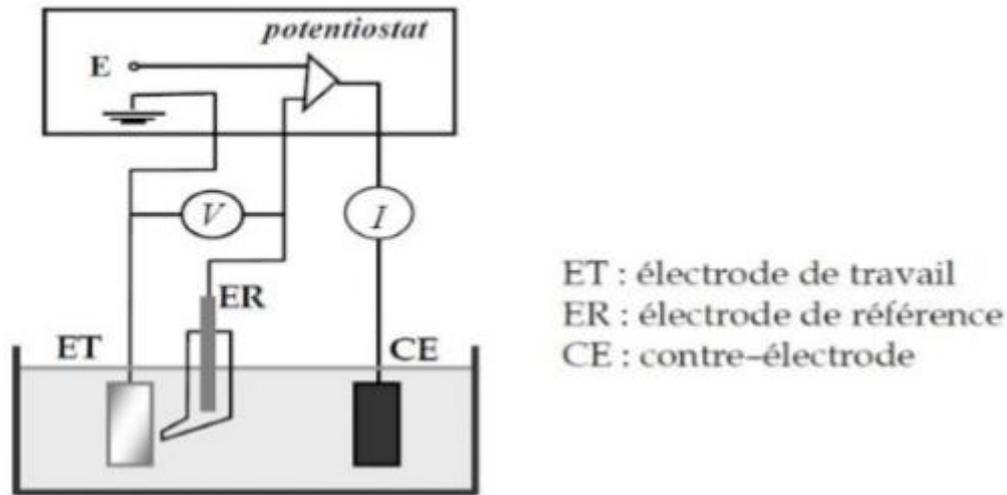
**II.7.2 L'électrode de référence :**

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

Hg/Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/KCl saturé. La demi-équation d'oxydoréduction associée au couple Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/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 Radio mater analytical son potentiel par rapport à l'électrode normale à hydrogène à 25°C est de  $E = 0.244\text{v}$ .

**II.7.3 L'électrode auxiliaire :**

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



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

#### II.7.4 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.8 Méthode d'étude électrochimique :

##### II.8.1 Polarisation potentiodynamiques :

La méthode de polarisation potentiodynamiques 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 appliquée. La densité du courant généré à l'interface électrode/électrolyte est représentée par une courbe  $i = f(\pi)$ , ou  $\log i = f(\pi)$ . Les courbes de polarisation des réactions contrôlée par une cinétique d'activation.

# ***CHAPITRE III***

## ***RÉSULTATS ET DISCUSSIONS***

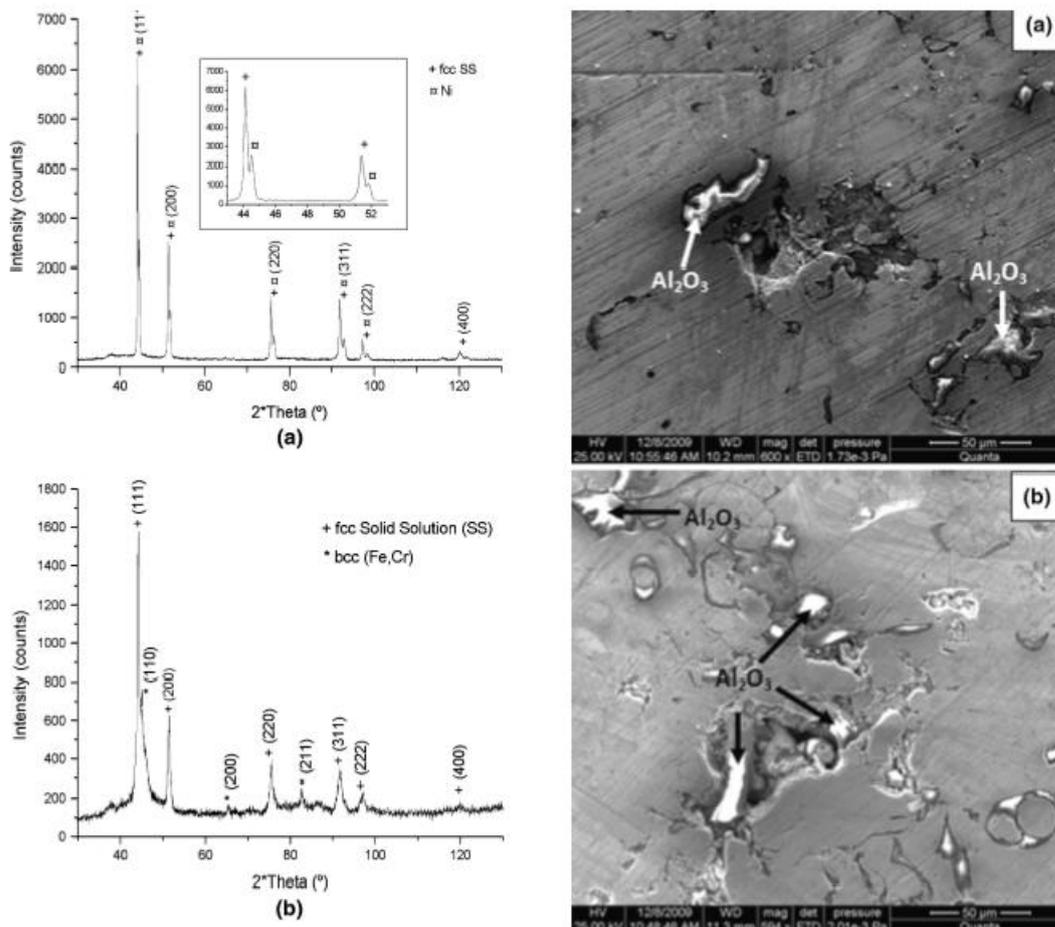
### III. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la caractérisation microstructurale des surfaces du substrat avec ou sans dépôt à l'aide d'un microscope optique (MO) pour l'observation d'usure, et le phénomène de corrosion provoqué par la solution de chlore, les revêtements sont réalisés par un dépôt d'une poudre à base du nickel projeté par un pistolet à flamme-poudre.

La deuxième étape, c'est la description des résultats expérimentaux exprimé sous forme de courbes de la perte de masse et de température en fonction du temps pendant 1h et 19min pour les vitesses de glissement de 0.5 m/s et 1 m/s, test dans un régimes sec.

#### III.1 Analyse structural microstructurale des dépôts P21 et P31 obtenue par diffraction aux rayons X [55] :

La diffraction aux rayons X de la section transversale polie des différents dépôts issus de la poudre d'alliage Ni-Mo-Al et Ni-Cr-Al-Mo (Figure III. 1) sont présenté ci-dessous.



**Figure III.1 :** Spectre DRX et micrographie des dépôts issu de la poudre d'alliage Ni-Mo-Al et Ni-Cr-Al-Mo observé au MEB.

L'analyse DRX a révélé que, dans le revêtement issu de la poudre d'alliage Ni-Cr-Al-Fe-Mo, la phase ordonnée  $Ni_3Al$  présente dans cette poudre a disparu et la phase de la solution solide (Fe, Cr) de structure cubique centrée (CC) est encore présente (**Figure III-1**).

Alors que dans le dépôt issu de la poudre d'alliage Ni-Al-Mo, le spectre de diffraction X a révélé l'apparition d'une autre phase CFC. [55]

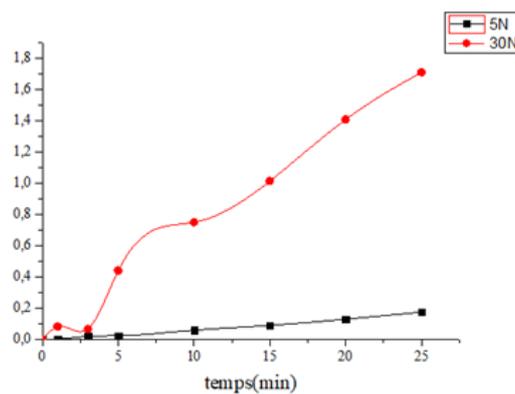
L'observation au MEB de la section transversale polie du dépôt issu de la poudre d'alliage Ni-Cr-Al-Fe-Mo (Figure 4) montre sa structure dense et compacte. Cette morphologie met en évidence la présence des nodules (ou films) de couleur sombre, représentatifs des oxydes. Alors que, Les observations au MEB du dépôt issu de la poudre d'alliage Ni-Al-Mo montrent une microstructure dense, compacte et complexe formée de plusieurs phases avec la présence en plus de porosités et de particules non fondues (Figure 3).on observe la présence des oxydes dont les compositions chimiques correspondant à l'alumine  $Al_2O_3$  (**Figure III-1**).

### III.2 Caractérisation tribologique des dépôts P21 et P31 :

#### III.2.1 : Perte de masse en fonction du temps à des vitesses de glissement 0.5m/s et

1m/s à charge fixe de 5N et 30N pour échantillons A60, P21et P31 en acier à régime sec :

Perte de masse (%)



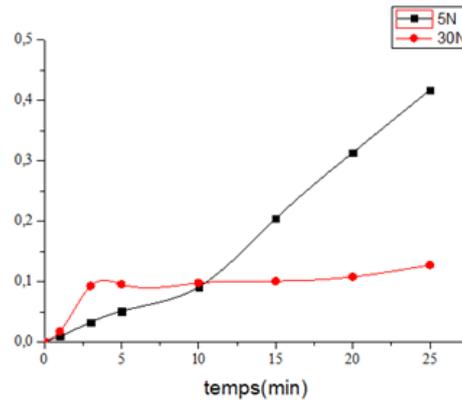
**Figure III.2** : courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon (E335) pour une vitesse 0.5m/s et d'une charge de 5 et 30 N.

L'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec dépend essentiellement de la charge appliquée, on distingue que chaque graphe à la variation suivante :

**Graphe (5N/0.5m/s) :** La perte de masse est presque stable de jusqu'à 0.01% à la (25min).

**Graphe (30N/0.5m/s) :** La perte de masse augmente lentement de jusqu'à 1.63% à la (25min).

**Perte de masse (%)**

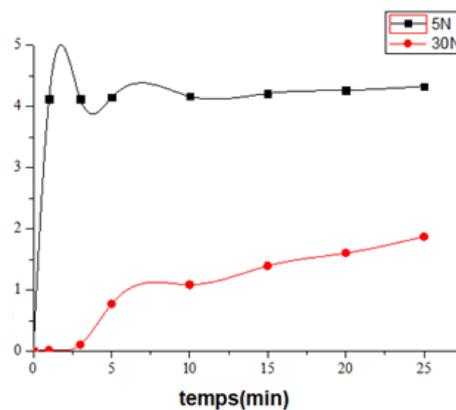


**Figure III.3:** courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon (E335) pour une vitesse **1m/s** et d'une charge de **5 et 30 N**.

**Graphe (5N/1m/s):** La perte de masse augmente jusqu'à 0,45% à la (25min).

**Graphe (30N/1m/s):** La perte de masse augmente de jusqu'à 0,1% à la (4min) puis connaît une légère stabilisation jusqu'à 1,4% à la (25min).

**Perte de masse (%)**

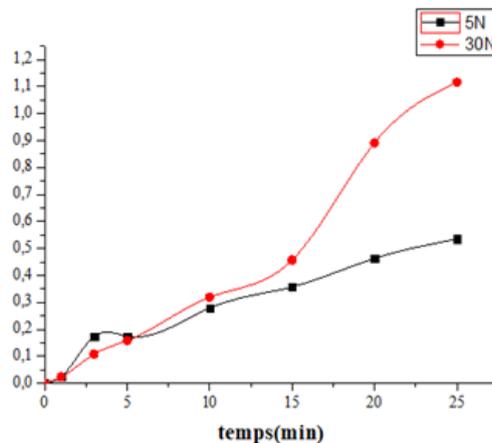


**Figure III.4 :** courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon **P21** pour une vitesse **0,5m/s** et d'une charge de **5 et 30 N**.

**Grphe (5N/0,5m/s) :** La perte de masse est forte, augmente jusqu'à 5% à la (2 min) reste presque stable jusqu'à la (25min).

**Grphe (30N/0,5m/s) :** La perte de masse reste nul jusqu'à la (3min) puis connaitre une augmentation de 0.8 % à la (5min), suivi d'une petite stabilisation jusqu'à 1,1% à la (10min) puis augmente légèrement jusqu'à 1,8% à la (25 min).

**Perte de masse (%)**

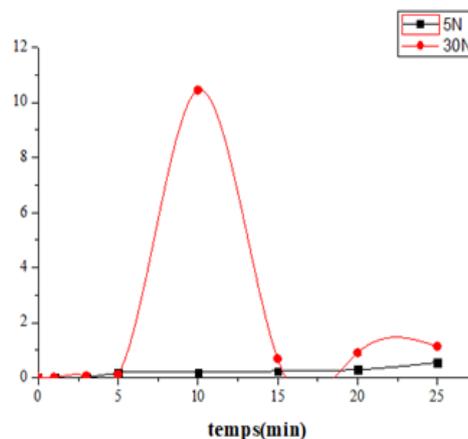


**Figure III.5 :** courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon **P21** pour une vitesse **1m/s** et d'une charge de **5 et 30 N**.

**Grphe (5N/1m/s) :** La perte de masse augmente jusqu'à 4,8% à la (25 min).

**Grphe (30N/1m/s) :** La perte de masse augmente légèrement de jusqu'à 4,8% à la (15 min) suivi d'une forte augmentation jusqu'à 1,1% à la (25 min).

**Perte de masse (%)**

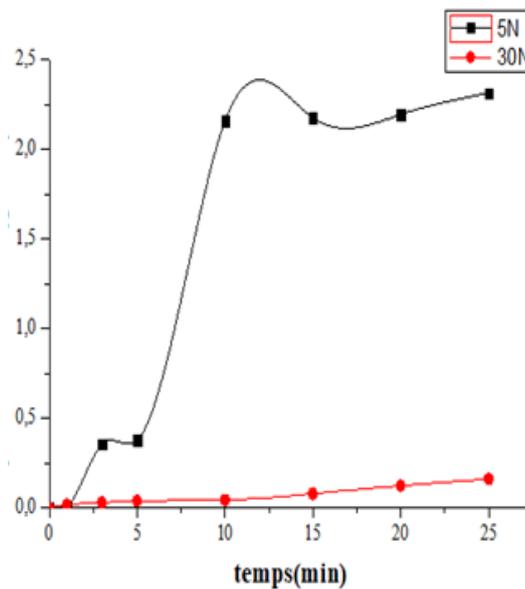


**Figure III.6 :** courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon **P31** pour une vitesse **0,5m/s** et d'une charge de **5 et 30 N**

**Grphe (5N/0,5m/s) :** La perte de masse est nul jusqu'à la (5min) puis une légère augmentation stable jusqu'à 0,5 % à la (25min).

**Grphe (30N/0,5m/s) :** La perte de masse est nul jusqu'à la (5min) suivi d'une forte augmentation de 10,5% à la (11min) puis suivi d'une très forte diminution jusqu'à à la (15min) puis accompagné d'une très légère augmentation de 1,2% à la (25min).

Perte de masse (%)

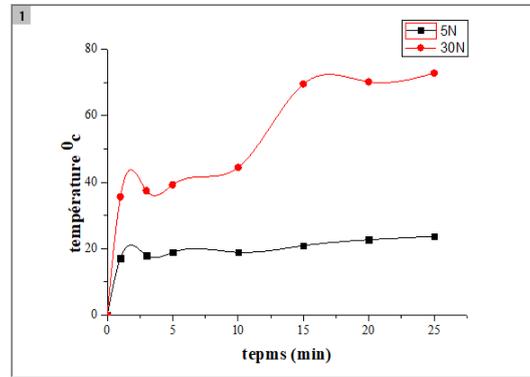


**Figure III.7:** courbes d'évaluation de la perte de masse en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon **P31** pour une vitesse **1m/s** et d'une charge de **5 et 30 N**

**Grphe (5N/1m/s) :** La perte de masse augmente légèrement jusqu'à 0,28% à la (5min) suivi d'une forte augmentation de 2,27% à la (12min) accompagné d'une légère diminution de 2,22% à la (15min) puis suivi d'une légère augmentation jusqu'à 2,25% à la (25min).

**Grphe (30N/1m/s) :** La perte de masse est stable varié de jusqu'à 0,12 à la (25min).

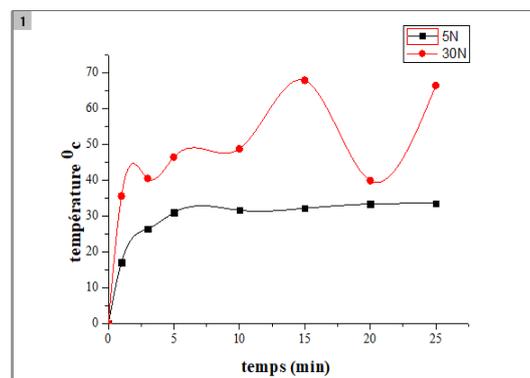
### III.2.2 : La température en fonction du temps a des vitesses de glissement 0.5m/s et 1m/s à charge fixe de 5N et 30N pour échantillons A60, P21et P31 en acier à régime sec :



**Figure III.8 :** courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon A60 pour une vitesse 0,5m/s et d'une charge de 5 et 30 N

**Graphe (5N/0,5m/s) :** La température est presque stable et varie de 17.1°C à la (1min) jusqu'à 21, 8°C à la (25min).

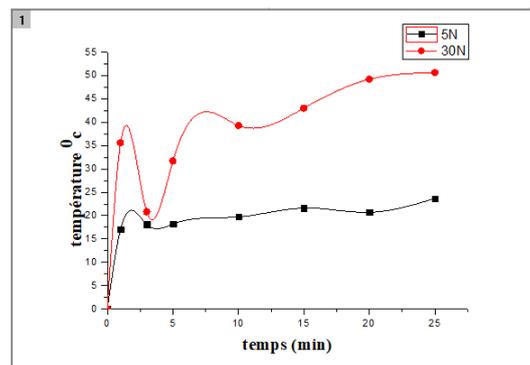
**Graphe (30N/0,5m/s) :** La température augmente de 35.6c à la (1min) jusqu'à 44,4°C à la (10min) suivi d'une augmentation rapide et forte jusqu'à 70, 2°C la (15min) puis suis presque d'une stabilisation jusqu'à 72, 8°C à la (25min).



**Figure III.9 :** courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon A60 pour une vitesse 1m/s et d'une charge de 5 et 30 N.

**Graphe (5N/1m/s) :** une augmentation de  $0^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $25,6^{\circ}\text{C}$  à la (2min) suivi presque d'une stabilisation jusqu'à  $30,4^{\circ}\text{C}$  à la (25min).

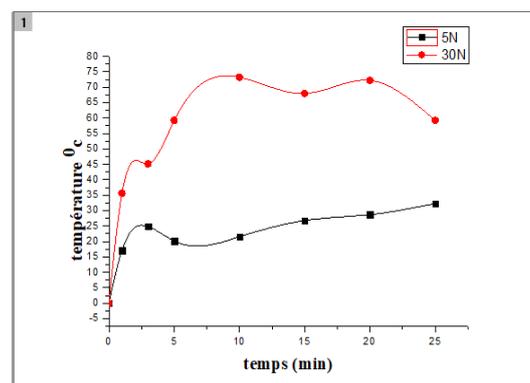
**Graphe (30N/1m/s) :** La température augmente rapidement de  $0^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $67^{\circ}\text{C}$  à la (15min) suivi d'une diminution jusqu'à  $35^{\circ}\text{C}$  à la (20min) puis suivi d'une augmentation jusqu'à  $65,5^{\circ}\text{C}$  à la (25min).



**Figure III.10 :** courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon de P21 pour une vitesse  $0,5\text{m/s}$  et d'une charge de 5 et 30 N.

**Graphe (5N/0,5m/s) :** La température augmente jusqu'à  $21^{\circ}\text{C}$  à la (2min) suivi presque d'une stabilisation jusqu'à  $23^{\circ}\text{C}$  à la (25min).

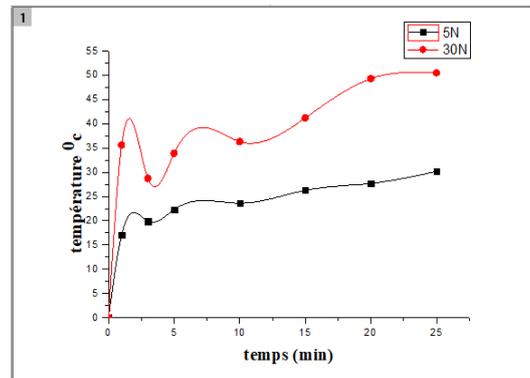
**Graphe (30N/0,5m/s) :** La température augmente jusqu'à  $38^{\circ}\text{C}$  à la (2min) suivi d'une légère diminution jusqu'à  $19^{\circ}\text{C}$  à la (3min) puis une augmentation jusqu'à  $42^{\circ}\text{C}$  et suivi presque d'une stabilisation jusqu'à  $48^{\circ}\text{C}$  à la (25min).



**Figure III.11 :** courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon de P21 pour une vitesse  $1\text{m/s}$  et d'une charge de 5 et 30 N.

**Graphe (5N/0,5m/s) :** La température augmente rapidement jusqu'à 25°C à la (2min) suivi presque d'une stabilisation jusqu'à 30°C à la (25min).

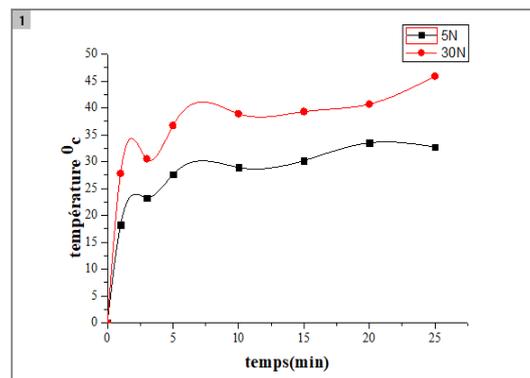
**Graphe (30N/0,5m/s) :** La température augmente rapidement jusqu'à 42 à la (10min) suivi d'une diminution lente jusqu'à 57°C à la (25min).



**Figure III.12 :** courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon de P31 pour une vitesse 0.5m/s et d'une charge de 5 et 30 N.

**Graphe (5N/0,5m/s) :** La température augment rapide et varie jusqu'à 21,6°C à la (2min) suivi d'une stabilisation jusqu'à 27°C à la (25min).

**Graphe (30N/0,5m/s) :** La température augment rapidement et varie jusqu'à 41°C à la (2min) suivi d'une légère diminution jusqu'à 27°C à la (3min) puis une augmentation jusqu'à 53°C à la (25min)



**Figure III.13:** courbes d'évaluation de la température en fonction du temps dans un régime sec de l'échantillon de P31 pour une vitesse 1m/s et d'une charge de 5 et 30 N

**Graphe (5N/0,5m/s) :** La température augmente rapidement et varie de 0°C jusqu'à 21,6°C à la (2min) suivi d'une stabilisation jusqu'à 27°C à la (25min).

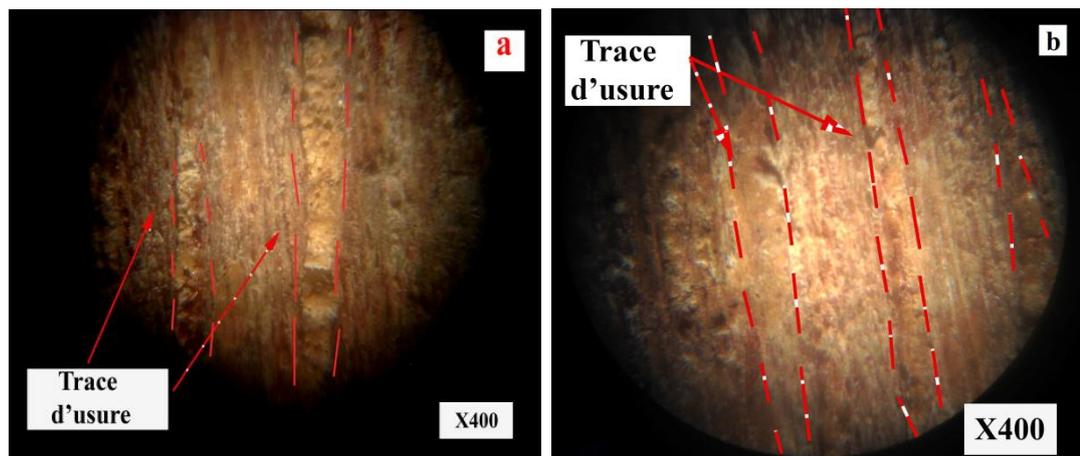
**Graphe (30N/0,5m/s) :** La température augmente rapidement et varie de 0°C jusqu'à 41°C à la (2min) suivi d'une légère diminution jusqu'à 27°C à la (3min) puis une augmentation jusqu'à 53°C à la (25min).

### III.2.3 : Trace d'usure des dépôts P21 et P31 sous différente charge:

Dans les figures qui suivent nous allons voir les traces d'usure des dépôts P21 et P31 sous différente charge (**fig.III.15**).

(1) ProXon 21021 : à 30N/180 (tr/min)

(2) ProXon 21031 : à 30N/180 (tr/min)



**Figure III.15 :** faciès d'usure des deux l'échantillon acier P21 et P31 après usure a une vitesse de glissement de 1m/s à deux charges 30N dans un régime sec: **a)** 30 N/ 180 (tr/min), **b)** 30 N / 180 (tr/min)

On observe dans la **Figure III.15:**

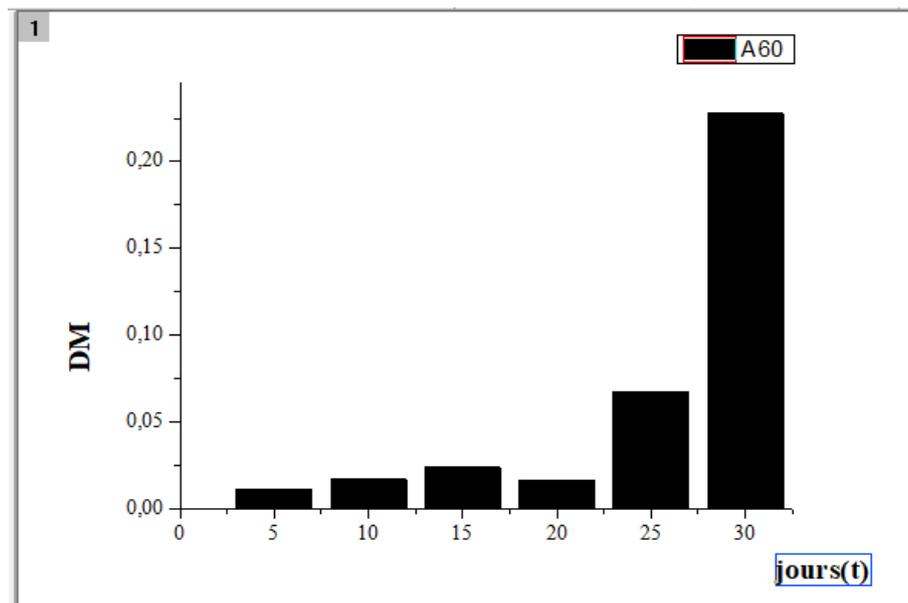
- (1) Pour les échantillons **ProXon 21021 : 5 et 30 N / 90 et 180 tr** dans un régime sec on remarque que des traces d'usure un peut importante sous forme de rayure et de sillon dans une zone un peut large.

- (2) Pour les échantillons **ProXon 21031 : 5 et 30 N / 90 et 180 tr dans un régime sec** on remarque qu'il ya des traces d'usure plus importante sous forme de sillon dans une zone plus large avec l'arrachement de matière dans la zone la plus fragile.
- (3) D'après les deux **figures III.15** : On peut dire que l'usure par abrasion, produite d'un frottement conduit à l'apparition des rayures et des sillons.

### III.3 Caractérisation électrochimiques des dépôts P21 et P31

#### III.3.1 : Perte de masse en fonction du temps pour échantillons A60, P21et P31 en acier à régime sec :

On présentera la perte de masse relative à 5 jours jusqu'à 30 jours sous forme d'un histogramme pour les différents échantillons non traité **A60** a différents post traitement sont illustrées sur la **Figure III.16** :

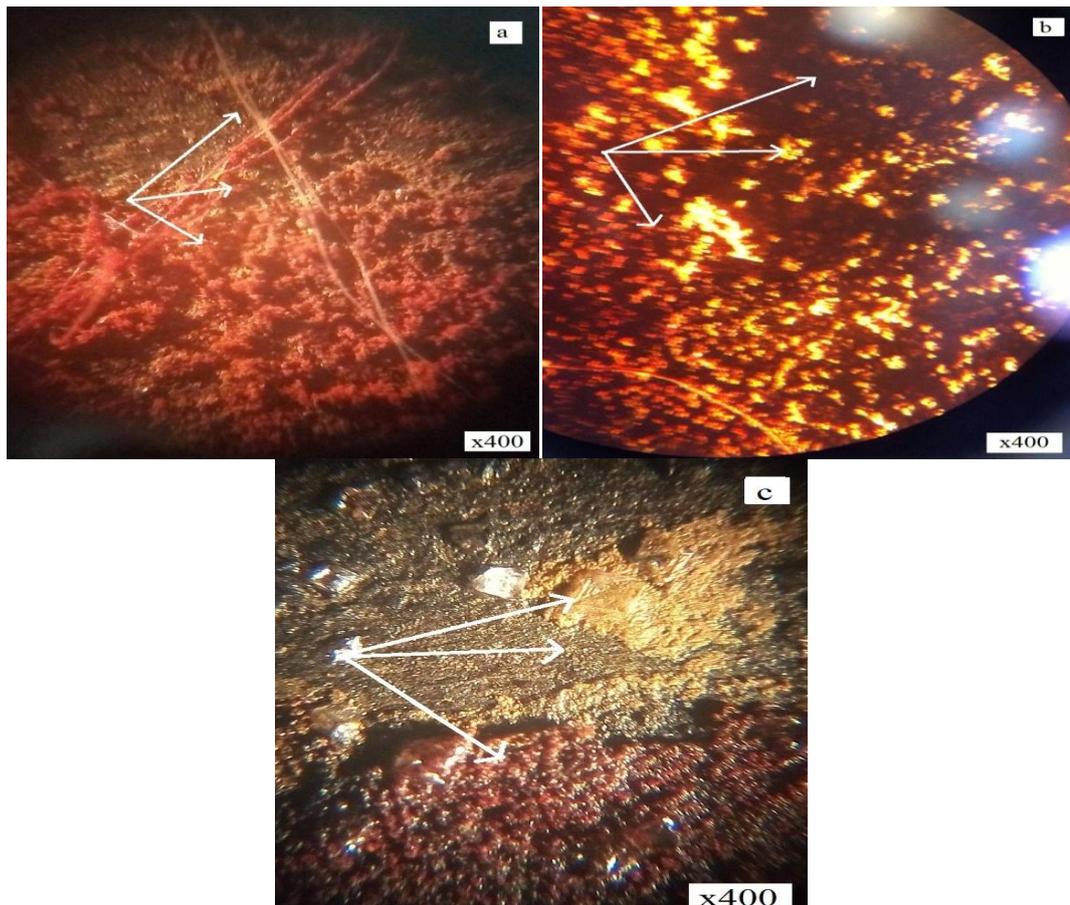


**Figure III.16** : La perte de masse d'échantillon non traité A60

Après 5 j à 30 j d'immersion d'échantillon A60 dans la solution d'eau de mer, on constate que la perte masse augmente à 0,0242(g) et diminue progressivement du 15 jour au 20 j à 0,0167(g) et commence à augmenter de nouveau et rapidement, jusqu'à 0,2278 (g), ce qui indique que la perte masse d'échantillon non traité A60 augmente progressivement en termes de Le temps.

Nous avons fait des micrographies au microscope optique pour de meilleures performances. Analyse des destinations.

L'observation au microscope optique de différent échantillon non traité A60 dans 15 j à 25 j de test d'immersion dans une solution d'eau de mer, nous montre les microstructures suivant :



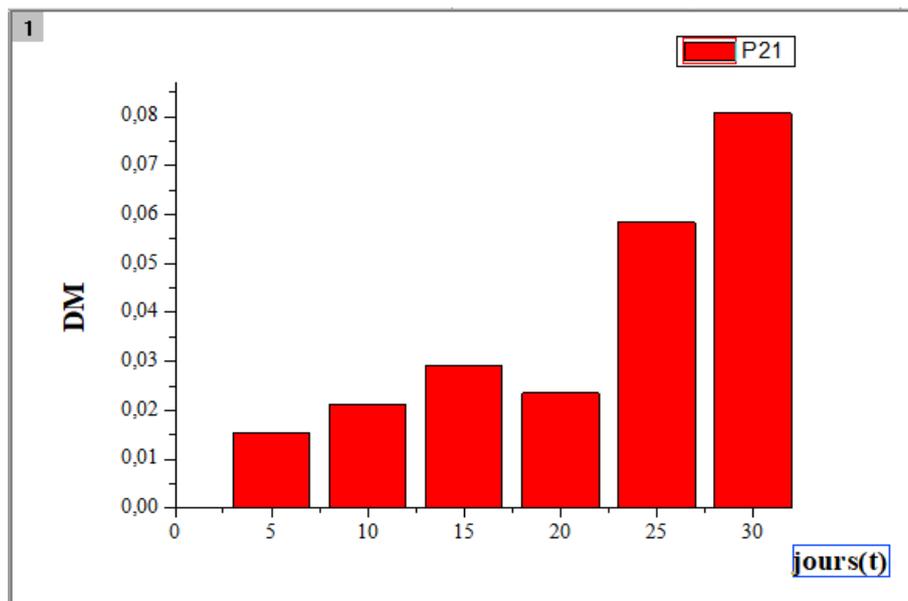
**Figure III.17** : Images de corrosion de l'échantillon non traité A60

La **figure.17** représente la micrographie de l'échantillon non traité A60 : immergé au milieu Na Cl à différents temps d'immersion : **(a)**  $t = 15$  j ; **(b)**  $t = 20$  j et **(c)**  $t = 25$  j.

L'observation en microscope optique montre que la morphologie de l'échantillon non traité A60, Il a été constaté que la couche d'oxydation s'était formée de manière dense au 25 j par rapport aux 15 et 20 j.

La couche d'oxyde qui est formé au niveau des surfaces des échantillons non traité A60, est appelé le film passif et riche en chrome, celle-ci consiste à avoir un rôle protecteur grâce a la formation d'une couche d'oxyde chrome.

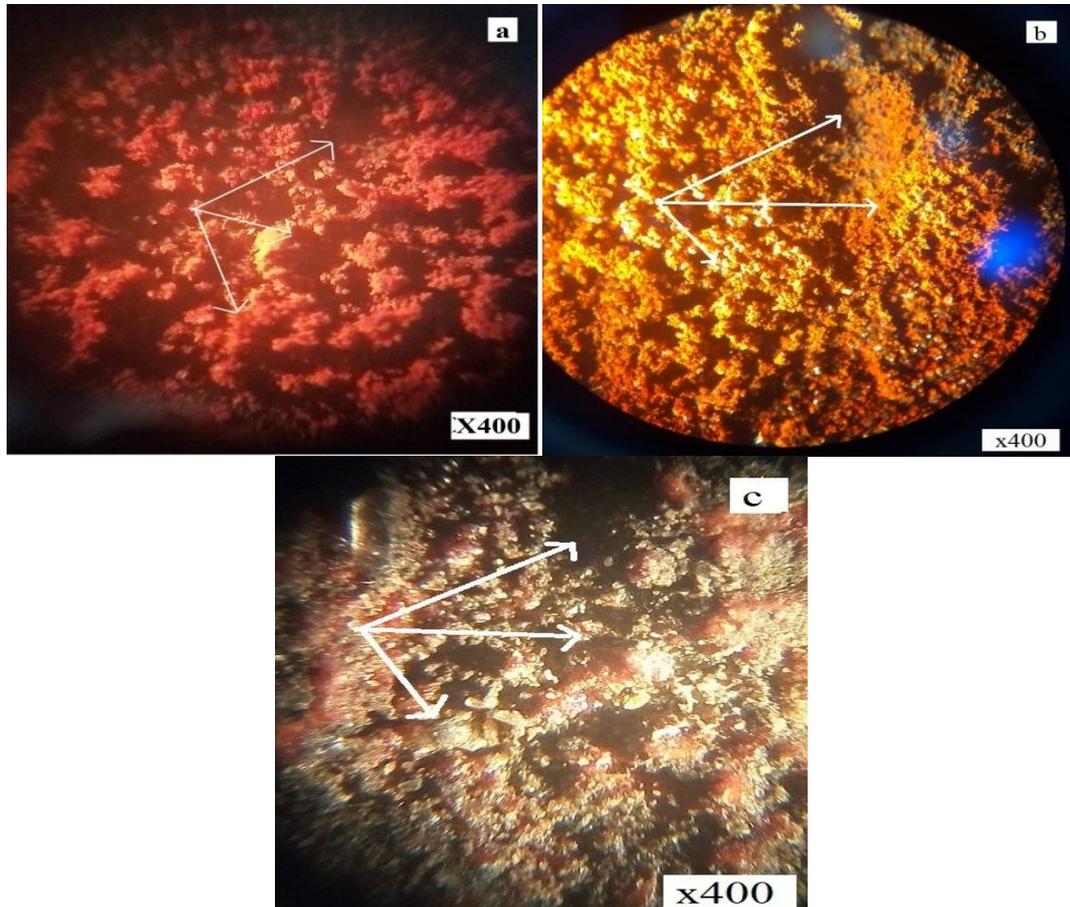
On présentera la perte de masse relative à 5 jours jusqu'à 30 jours sous forme d'un histogramme pour les différents échantillons traité P21a différents post traitement sont illustrées sur la **Figure III.18** :



**Figure III.18** : La perte de masse d'échantillon traité P21

Après 5 j à 30 j d'immersion d'échantillon A60 dans la solution d'eau de mer, on remarque que les échantillons p21 et A60 sont presque les mêmes sur la figure Et on constate que La perte de masse augmente progressivement jusqu'à 0,0291 g du 5 j au 15 j et après les moments décroît jusqu'à 0,0235 g par 20 j et augmente de manière significative à 0,0807 g du 30 j.

L'observation au microscope optique de différent échantillon traité P21 dans 15 j à 25 j de test d'immersion dans une solution d'eau de mer, nous montre les microstructures suivant :



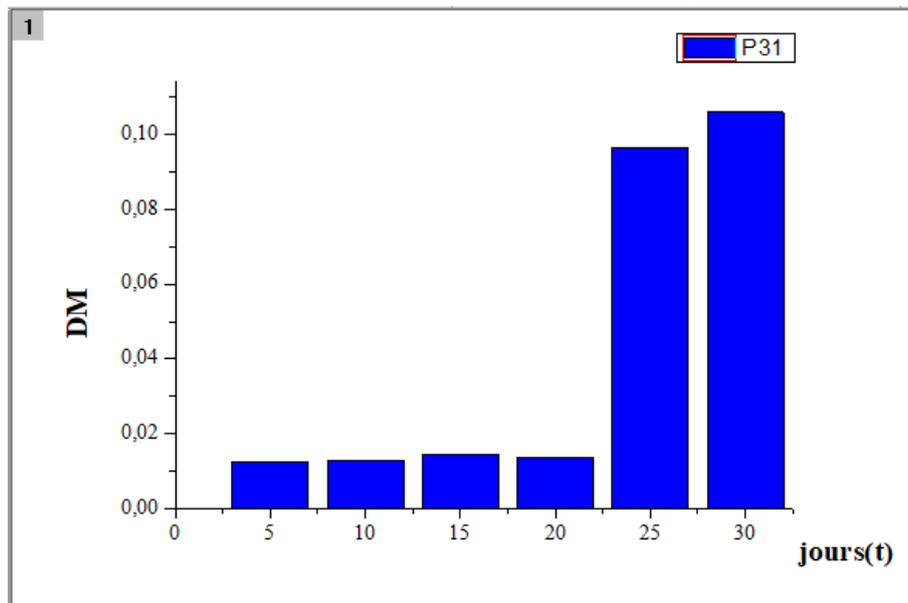
**Figure III.19 :** Images de corrosion de l'échantillon traité P21

La **figure.19** représente la micrographie de l'échantillon traité 21021:immérgé au milieu Na Cl à différents temps d'immersion :**(a)**  $t = 15$  j ; **(b)**  $t = 20$  j et **(c)**  $t = 25$  j.

Les photos (a), (b), (c) montrent clairement que l'acier subit une corrosion sur la surface. En comparant les photos, on constate après 25 jours d'immersion que l'éprouvette de la photo (c) a subi une corrosion plus importante que l'éprouvette de la photo (a) et (b). Cela confirme que le temps d'immersion accélère la vitesse de corrosion de l'acier P21.

On présentera la perte de masse relative à 5 jours jusqu'à 30 jours sous forme d'un histogramme pour les différents échantillons traité P31 a différents post traitement sont illustrées sur la

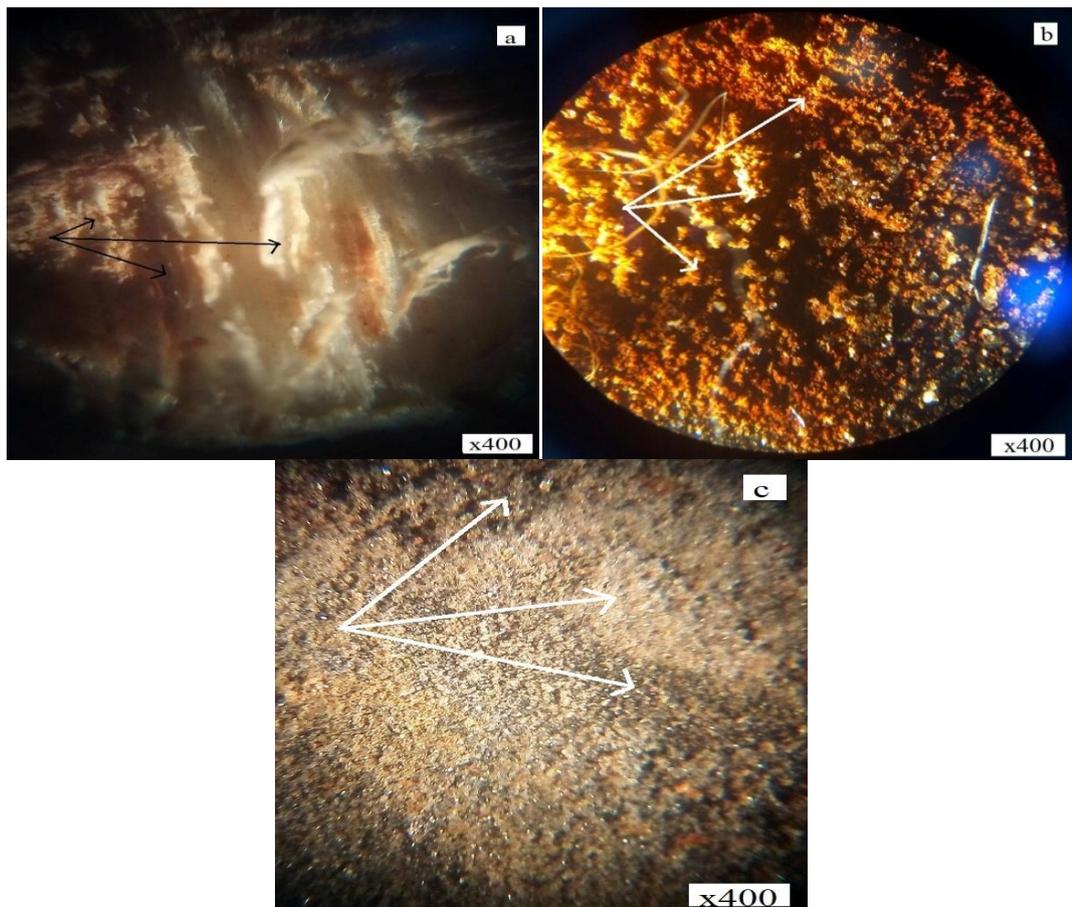
**Figure III.20 :**



**Figure III.20 :** La perte de masse d'échantillon traité P31

Après 5 j à 30 j d'immersion d'échantillon A60 dans la solution d'eau de mer, on remarque que la perte de masse dans l'échantillon p31 est presque constante et est estimée entre [0.0127: 0.0145] (g) et nous notons dans les jours suivants de 25 jours à 30 jours, ce qui augmente de façon exponentielle et augmente à 0,109 (g).

L'observation au microscope optique de différent échantillon traité P31 dans 15 j à 25 j de test d'immersion dans une solution d'eau de mer, nous montre les microstructures suivant:



**Figure III.21 :** Images de corrosion de l'échantillon traité P31

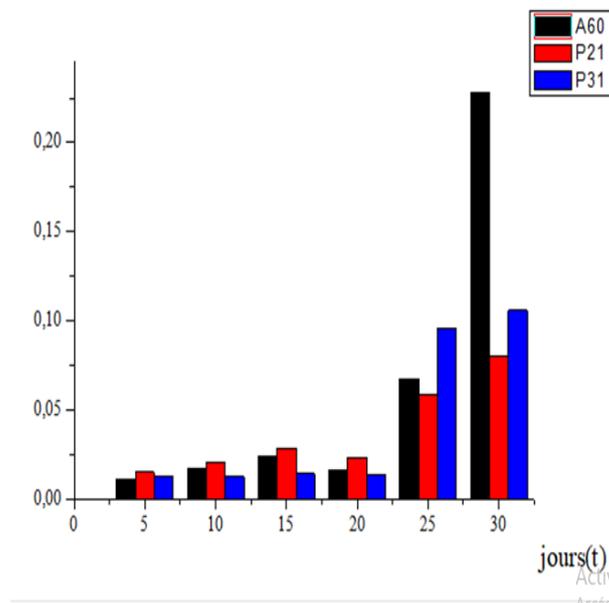
La **figure.21** représente la micrographie de l'échantillon traité 210311:immergé au milieu Na Cl à différents temps d'immersion : **(a)**  $t = 15$  j ; **(b)**  $t = 20$  j et **(c)**  $t = 25$  j.

Les photos (a), (b), (c) montrent clairement que l'acier subit une corrosion sur la surface. En comparant les photos, on constate après 15 et 25 jours d'immersion que l'éprouvette de la photo (c) et (b) a subi une corrosion plus importante que l'éprouvette de la photo (a). Cela confirme que le temps d'immersion accélère la vitesse de corrosion de l'acier P31.

### III.3.2 : étude comparative des pertes de masse en fonction du temps pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec :

On présentera la perte de masse relative à 5 jours jusqu'à 30 jours sous forme d'un histogramme pour les différents échantillons non traité et traité a différents post traitement sont illustrées sur la **Figure III.22** :

Perte de masse (%)



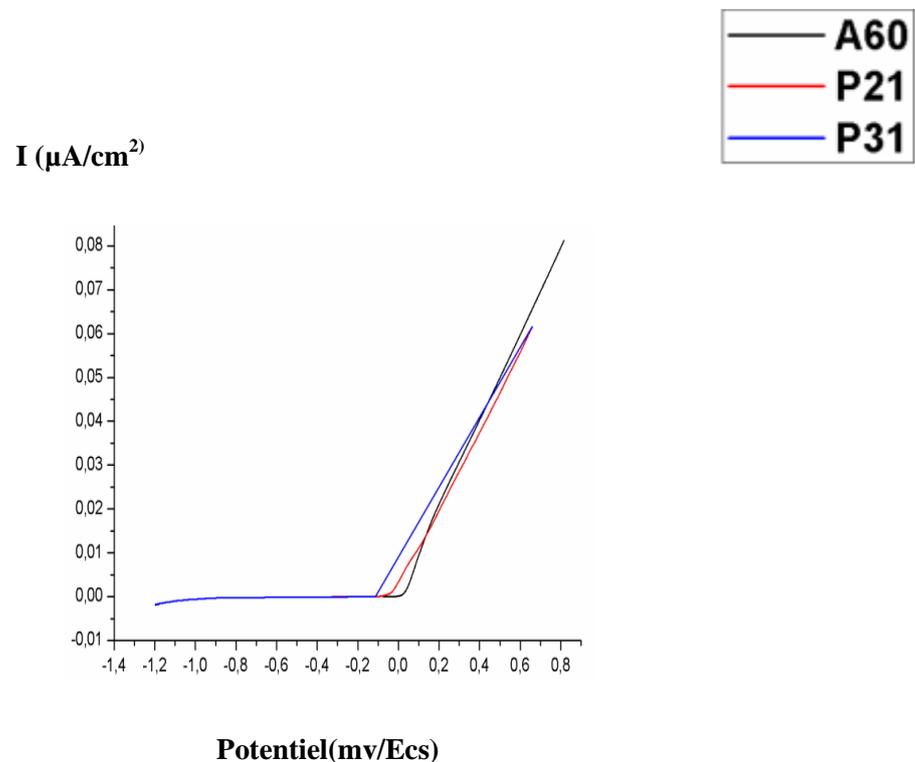
**Figure III.22** : La perte de masse des échantillons traité **P31, P21** et non traité **A60**

Après immersion de ces échantillons de 5 à 30 j dans la solution d'eau de mer, on constate une différence de temps entre la perte de masse de ces échantillons et une gradation croissante. La valeur maximale de l'échantillon A60 est de 0,02278(g) et la valeur minimale de 0,0114( g). Nous concluons que:

De 5 j à 20 j, nous notons que la perte de masse de l'échantillon p21 est plus similaire à celle des échantillons p31 et A60.

De 25 j à 30 j, nous notons que la hauteur de la masse manquante de l'échantillon A60 est supérieure à celle des échantillons P31 et P21.

### III.3.3 : courbe de polarisation anodique pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec :



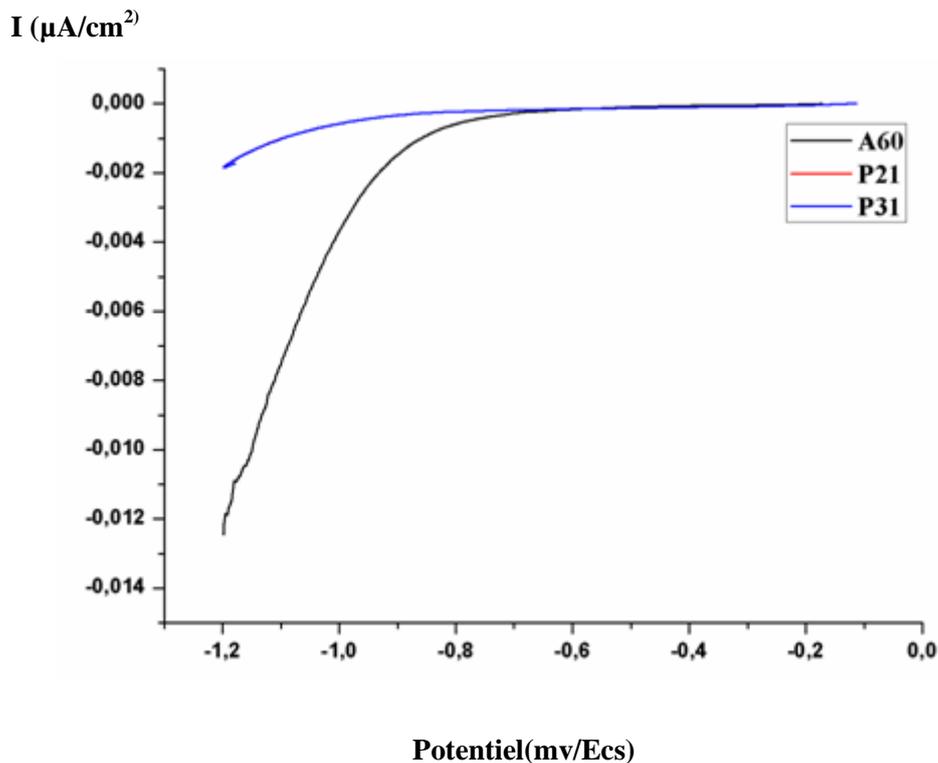
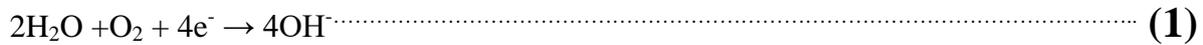
**Figure III-23 :** Courbe de polarisation anodique

La **figure (III-23)** présente les courbes de polarisation tracées dans le domaine anodique. L'examen comparé de ces trois courbes montre que la dissolution de l'alliage P31 dans le milieu NaCl 3% commence bien avant l'acier p21 et A60, cependant les courants anodiques enregistrés par ce dernier sont légèrement élevés. Ceci traduit que la vitesse de dissolution du revêtement P31 est plus ou moins faible que l'acier A60 et p 21.

### III.3.4 : courbe de polarisation cathodique pour échantillons A60, P21 et P31 en acier à régime sec :

Dans la zone cathodique, la réaction de réduction de corrosion, a été mise en évidence par la réalisation d'un test de polarisation cathodique des deux électrodes de l'acier A60 et de l'acier P21 et P31 recouvert d'une couche de l'alliage P21 dans la solution aérée de NaCl à 3.5% (**figure III-24**).

L'examen des courbes cathodiques obtenues dans le milieu aéré montre l'existence d'un palier de courant de diffusion limite relatif à la réaction de réduction de l'oxygène dissous suivant la réaction (1):

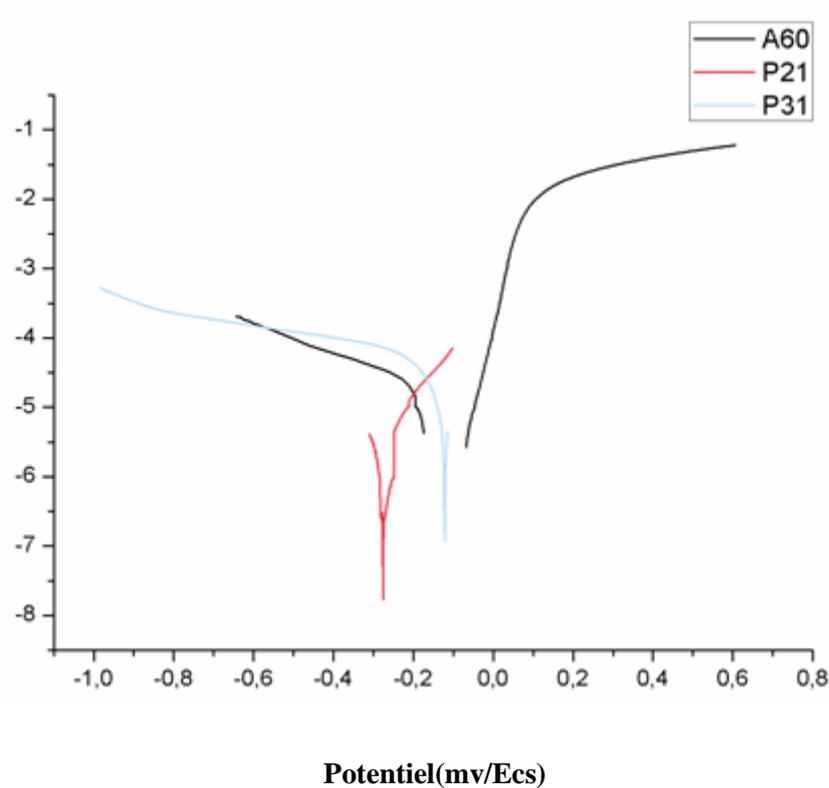


**Figure III-24** : Courbe de polarisation cathodique

### III.3.5 : courbe de potion-dynamométrique pour échantillons A60, P21et P31 en acier à régime sec :

L'exploitation des courbes anodiques et cathodiques dans la représentation de Tafel (**Figure III-25**) a permis de déterminer les paramètres de la corrosion de l'acier **A60** et de l'acier recouvert d'une couche de **P21** et **P31**, à savoir la densité de courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ) et le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ).

$\text{Log}(i) (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$



**Figure III-25** : courbe de Tafel.

Nous remarquons que le courant cathodique enregistré sur l'acier A60 est plus important. Cela laisse penser que le dégagement de l'hydrogène est plus prononcé sur la surface de l'acier A60 que sur la surface du dépôt d'alliage P31.

Nous remarquons que les résultats obtenus révèlent que le potentiel de corrosion de l'alliage P21 est moins noble que celui enregistré par l'acier A60 et P31. De même, la densité de courant de corrosion est légèrement élevée pour le revêtement P21. Toutes ces observations nous laissent penser que le revêtement est de type anodique. Il se comporte comme anode et s'oxyde afin de protéger le substrat d'acier A60 et P31.

***CONCLUSION  
GÉNÉRALE***

## *Conclusion générale*

---

### **Conclusion générale :**

Par notre démarche adoptée dans la réalisation de ce travail, on a exposé l'importance primordiale de la projection thermique, dans la réalisation des revêtements, pour la récupération et la rénovation des pièces usées. L'avantage de ce procédé est sa résolution aux problèmes relative aux matériaux si les paramètres de projection sont bien maîtrisés, ainsi que le choix des matériaux, qui doit être adopté au milieu d'usage. Cette étude a montré que le revêtement par projection thermique est une bonne solution dans la résistance des surfaces à l'usure et à la corrosion.

Ce mémoire avait pour objectif de mettre en évidence la différence du comportement thermique et tribologique entre deux dépôts différents et de distinguer celui qui possède les meilleures propriétés physique et mécanique les plus adéquates pour les essais mécaniques.

Notre travail est une étude comparative portée sur deux types de dépôt le premier est le P21 (Ni-Al-Mo) et le deuxième est le P31 (Ni-Al).

Les essais tribologique effectués sous différentes charge et sous des vitesses de 0,5 (m/s) et 1 (m/s) ont révélé que :

- La perte de masse augmente avec l'augmentation de la vitesse, et de la charge imposée.
- Le dépôt 21031 perd plus de masse en fonction des deux paramètres que le dépôt 21021.
- Le dépôt 21021 résiste mieux aux phénomènes de l'usure et de la corrosion que le dépôt 21031.

Les températures de contact au niveau de l'interface dépôt /acier ont révélé que :

- Le dépôt 21021 peut dissiper plus de chaleur que le dépôt 21031.
- La température à l'interface augmente avec l'augmentation de la vitesse.
- La température à l'interface augmente avec l'augmentation de la charge imposée.

Les essais tribologiques sous différentes charges ont permis de caractériser l'usure, la corrosion et l'énergie dissipée (température) pour les couples étudiés. Pour le couple 21031/Acier, l'usure et la corrosion est plus importante ce qui génère une température de contact plus élevée. Tandis que le couple 21021/Acier, le régime est caractérisé par une faible augmentation d'usure et de corrosion, lorsque l'énergie dissipée croit, ceci

## *Conclusion générale*

---

s'explique par la présence de l'élément du molybdène qui fait dissiper la température et stabilise la perte de masse.

RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

# *Référence bibliographique*

---

- [1] C.T. Sims and W.C. Hagel, the superalloys: Vital high temperature gas turbine materials for aerospace and industrial power. 1972, Wiley - Interscience publication .
- [2] M. Durand -charre, the microstructure of superalloys. 1997, Gordon and Breach Science Publishers. 124.
- [3] M. Y. Yahmi, Elaboration et qualification d'une procédure de réparation par soudage tige d'aube de Turbine à gaz en superalliages à base de nickel-Inconel 738, Mémoire de magister option fiabilité et maintenance industrielle, université –boumerdes, 2007.
- [4] Meriadeg Revaud, optimisation métallurgique du superalliage à base de nickel 718 plus, thèse pour obtention de grade de docteur en science et génie des matériaux, Ecole nationale supérieure des mines de paris, 2013.
- [5] Farhate Zemzemi, caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièceoutil- copeau en usinage : application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718, thèse pour l'obtention de titre docteur en mécanique, l'école centrale de Lyon, 2007.
- [6] C.T Stoloff, N.S Hagel, W.C superalloys II; high temperature material for aerospace and industrial power, New York wiley, interscience publication, john wiley et sons, 1997, P 615.
- [7] L.W Lherbier, Kent W.B.PM superalloys: Technical and economic consideration. The international journal of powder metallurgy, 1990, vol 26(2), P. 131.137 .
- [8] P. Caron, T. Khan, Evolution of Ni-based superalloys for single crystal gas turbine blade application aerospace science and technology, 3(1999) 513-523.
- [9] H. Ben hamouda, modélisation et simulation de la structure de solidification dans les superalliages base-nickel : application AM1, thèse pour obtenir grade de docteur en science et génie des matériaux, Ecole national supérieur des mines de paris, 2012.
- [10] Y. Danis, Etude de la soudabilité d'un superalliage base nickel fortement chargé en élément durcissant Titane et Aluminium : L'Inconel 738, thèse pour obtention de grade docteur en mécanique et ingénierie, université bordeaux 1, 2008.
- [11] H. Kitaguchi, chapter 2: Microstructure-property relationship in advanced Ni-based superalloys. Danes metallurgy- advanced in materials and processes. Ed par Yogiraj pardhi, 2012.
- [12] C. Abert, termisches spritzen 100 Jahre M.U.Schoop, association suisse pour la technique du soudage.
- [13] R. R John, N.L Bade, journal of the American Rocket society, J 431, (1961).
- [14] R.M Gage, O.H Nestor, D.M Yenni, collimated electric ARC powder deposition process, U.S. Patent 3016. 447, (1962).
- [15] H. Gerdien, A. Litz, Wiss veroffentlichungen Siemens werk 2,489, (1922)
- [16] N. Jacoby et al. (2018) évaluations biologique et atmosphérique des métaux en projection thermique.(Archive des maladies professionnelles et de l'environnement, volume 79, May 2018 page 373.
- [17] L. Powlowski “the science and engineering of thermal spray coatings” J. Wiley and Sons, New York 1995.
- [18] P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs, “Quo Vadis thermal spraying ”pp 1-32 of thermal spray 2001: New surfaces foe a new millennim, Ed.C.C.Berndt, K.A. Khor and E.F.Lugscheider, pub ASM international materials park. OH-USA, 1360 + pages (Singapore).
- [19] A. Proner : M1645-revêtement par projection thermique. Paris/ technique de l'ingénieur 1999.
- [20] C.W Smith ‘the basic principles of flame spraying’ science and technology of surface coating, 1974 .pp262-270.
- [21] H. Kreye. “Characteristics of coatings produced by High velocity flame spraying” international thermal spraying conference. London 4-9 Jun, 1989.
-

# Référence bibliographique

---

- [22] Olivier Preziosa, élaboration par projection thermique de barrières de diffusion finement structurés dans le cadre de l'élaboration d'aluminium et étude de leurs performances, thèse pour l'obtention de garde de docteur en science et génie des matériaux, université de limoges.(2010).
- [23] E.R Sampson, "Cored wir application using électric ARC spray", pp 133-137 of thermal spray meeting the challenges of the 21st century Ed.C.Coddet, pub.ASM international material park.OH-USA.1998? 1693+pages (nice).
- [24] G. Béranger, G. Henry, G.Sauz (1994), le livre de l'acier, Ed technique et documentation – Lavoisier, Paris.
- [25] Y. Benarioua (2002), thèse de doctorat d'état, Sétif.
- [26] S.Kartout (2008), thèse de magistère, université 20 Aout Skikda, p-42.
- [27] Moreau. C, Cielo. P, Lamontagne. M, "Flattening and solidification of thermal sprayed particules", journal of thermal spray technology, vol.1, NO.4, 1992.pp.317-323.
- [28] Verdy.C "Structures multicouches misesn forme par projection thermique élaboration, caractérisation et application" thèse de doctorat, institut polytechnique de Sévenans, 1998.
- [29] Y. Cetre, V. Brege, P. Eichmer et M. Semac, traitement et revêtement de surface dans l'industrie chimique : Présentation d'un guide de choix, p.717-725.
- [30] C.K. Fang, T.H. Chuang, "Surface morphologies and erosion rates of metallic building materials after sandblasting." Depart Mech Engi, 1999.
- [31] P. Fauchais, A.Vardelle, B. Dussoubs"quo vadis thermal spraying". Thermal spray 2001: New surface for new millenium, Ed CC. Berndt K.A, Khor. E.F. Lugscheider, ASM international, material park.ohaio USA, pp.1-31, 2001.
- [32] T. Lynan, "Heat treating, cleaning and finishing." Edition Metals handbook, vol 2, pp 1-32, 1980.
- [33] J. Frene, la tribologie de l'antiquité à nos jours, mécanique et industrie, vol. 2, 2001, p.263-282.
- [34] S. Descartes, Y. Berthier, Rheology and flows of solid third bodies: Background and application to a MoS1.6 coating, Wear 252, 2002, p. 546-556.
- [35] M. Gouider, tribologie des composites carbone/carbone : Echelles et contributions de la mécanique et de la physico-chimie, thèse de l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2004.
- [36] Y. Berthier, Expérimental évidence for friction and wear modelling, wear 139, 1990, p. 77-92.
- [37] P. Kapsa, M. Cartier, usure des contacts mécaniques – manifestations de l'usure, techniques de l'ingénieur BM5067, 2001, p. 1-13.
- [38] Afnor, "Corrosion des métaux et alliages : termes principaux et définitions", NF EN ISO 8044, paris : AFNOR, 2000, 78 p.
- [39] Recueil de norme française, corrosion et protection des métaux, tome 1 (1988).
- [40] Jean- Jacques LAMOREUX, sciences des matériaux, précis de corrosion, pp.93, Ed, Beauchemin, (1994).
- [41] A. Aminot; M. Chausse-pied Manuel des analyses chimiques en milieu marin; CNEXO: Brest, France, 1983.
- [42] A. Marcet, Phil. Trans. Royal Society n°206, p.161 (1919).
- [43] R.A. Horne, marine chemistry the structure of water and the chemistry of the hydrosphere, Wiley-interscience (1969).
- [44] J L Crolet, Coût de la corrosion/ prévention et lute contre la corrosion (Théma- Cor 2002) ID1p.1-20, (octobre 2002) Anglet.
- [45] W. Huppertz et H. Meissner, Effect of the temperature and Salt Content of Sea Water on the Corrosion behaviour of Aluminum. Werkstoffe und Korrosion, vol.38, 709-710, 1987.
- [46] M. TOUIKER, Mémoire de Magister, Comportement du cupronickel 90/10 en milieu NaCl3% par les méthodes électrochimiques classiques, Univ. Skikda (2002).
-

# *Référence bibliographique*

---

- [47] Fink F.W., Corrosion of metals in sea water. OSW, report n°46. Décembre 1960.
- [48] Vargel C., Utilisation de l'Aluminium dans les installations de Dessalement par Flash Distillation. Examen après 16400 heures d'essai, rapport Pechiney CRV 678, 13. 1972.
- [49] F.M Reinhart, Corrosion of materials in hydrospace. US naval civil engineering laboratory, report R504. 1966.
- [50] G.A Gehring et M.H Peterson, corrosion of 5456 H117 aluminum in high velocity sea water. Corrosion, vol. 37, 232-242, 1981.
- [51] E.L. Liening, electrochemical Corrosion testing techniques, the theory and the practice, Process industries corrosion, NACE, Houston, pp.85-122 (1986).
- [52] Badr Assouli, Thèse de doctorat, Etude par émission acoustique associée aux méthodes électrochimiques de la corrosion et de la protection de l'alliage cuivre zinc (60/40) en milieu neutre alcalin, Univ. KENITRA MAROC (2002).
- [53] L. Jaubert, Etude de la corrosion uniforme d'aciers non alliés et inoxydables : utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques, Univ. Thèse de doctorat, Lyon, France (2004).
- [54] H. Boulemeche, Etude de l'efficacité du revêtement de machine du secteur humide de la Tannerie de Jijel, Mémoire de Magister, Univ. Skikda (2006).
- [55] Bradai Mohand Amokrane, Sadeddine Abdelhamid, Mouadji Youcef, Benabbas Abderrahim, Bounar Nedjemeddine & Mammeri Ahmed, Microstructural and Mechanical Properties of Ni-Base Thermal Spray Coatings Deposited by Flame Spraying, Metallurgical and Materials Transactions B, ISSN 1073-5615, Metall and Materi Trans B DOI 10.1007/ s11663-011-9551-0.
-

# ANNEXE

## Annexe

- **Test d'usure pour le dépôt sans traitement A60 sous une charge de 5(N) et une vitesse de rotation 90(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM = M0 - M1</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>5</b>	9,7802					90
<b>temps (min)</b>						
1	9,7802	9,7800	17,1	0,0002	0,00204495	90
3	9,7802	9,7782	18	0,002	0,02044948	90
5	9,7802	9,7778	18,9	0,0024	0,02453938	90
10	9,7802	9,7744	18,89	0,0058	0,05930349	90
15	9,7802	9,7714	20,9	0,0088	0,08997771	90
20	9,7802	9,7675	22,7	0,0127	0,1298542	90
25	9,7802	9,7631	23,7	0,0171	0,17484305	90

- **Test d'usure pour le dépôt sans traitement A60 sous une charge de 30(N) et une vitesse de rotation 90(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>30</b>	9,9585					90
<b>Temps (min)</b>						
1	9,9585	9,9667	35,6	0,0082	0,08234172	90
3	9,9585	9,9652	37,4	0,0067	0,06727921	90
5	9,9585	9,9146	39,2	0,0439	0,44082944	90
10	9,9585	9,8838	44,4	0,0747	0,75011297	90
15	9,9585	9,8576	69,5	0,1009	1,0132048	90
20	9,9585	9,8182	70,2	0,1403	1,40884671	90
25	9,9585	9,7882	72,8	0,1703	1,7100969	90

## Annexe

- **Test d'usure pour le dépôt sans traitement A60 sous une charge de 5(N) et une vitesse de rotation 180(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>5</b>	9,7631					180
<b>temps (min)</b>						
1	9,7631	9,7622	26,4	0,0009	0,009218384	180
3	9,7631	9,7599	31,0	0,0032	0,032776475	180
5	9,7631	9,7581	31,65	0,005	0,051213242	180
10	9,7631	9,7542	32,2	0,0089	0,09115957	180
15	9,7631	9,7432	33,4	0,0199	0,203828702	180
20	9,7631	9,7325	33,6	0,0306	0,313425039	180
25	9,7631	9,7224	35,1	0,0407	0,416875787	180

- **Test d'usure pour le dépôt sans traitement A60 sous une charge de 30(N) et une vitesse de rotation 180(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>30</b>	9,7224					180
<b>Temps (min)</b>						
1	9,7224	9,7207	40,5	0,0017	0,01748539	180
3	9,7224	9,7134	46,5	0,009	0,09256974	180
5	9,7224	9,7131	48,8	0,0093	0,09565539	180
10	9,7224	9,7129	67,9	0,0095	0,0977125	180
15	9,7224	9,7126	39,9	0,0098	0,10079816	180
20	9,7224	9,7119	66,5	0,0105	0,10799803	180
25	9,7224	9,7100	65,3	0,0124	0,12754052	180

## Annexe

- **Test d'usure pour le dépôt traitement P21 sous une charge de 5(N) et une vitesse de rotation 90(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>5</b>	9,1506					90
<b>Temps (min)</b>						
1	9,1506	8,7735	18,1	0,3771	4,12104124	90
3	9,1506	8,7731	18,2	0,3775	4,12541254	90
5	9,1506	8,7714	19,7	0,3792	4,14399056	90
10	9,1506	8,7696	21,6	0,381	4,1636614	90
15	9,1506	8,7654	20,7	0,3852	4,20956003	90
20	9,1506	8,7606	23,7	0,39	4,26201561	90
25	9,1506	8,7546	24,7	0,396	4,32758508	90

- **Test d'usure pour le dépôt traitement P21 sous une charge de 30(N) et une vitesse de rotation 90(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>30</b>	8,7546					90
<b>Temps (min)</b>						
1	8,7546	8,7530	20,8	0,0016	0,01827611	90
3	8,7546	8,7453	31,7	0,0093	0,10622987	90
5	8,7546	8,6873	39,3	0,0673	0,76873872	90
10	8,7546	8,6594	43,0	0,0952	1,08742832	90
15	8,7546	8,6327	49,2	0,1219	1,39241085	90
20	8,7546	8,6143	50,6	0,1403	1,60258607	90
25	8,7546	8,5907	60,3	0,1639	1,87215864	90

## Annexe

- **Test d'usure pour le dépôt traitement P21 sous une charge de 5(N) et une vitesse de rotation 180(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>5</b>	9,1522					180
<b>Temps (min)</b>						
1	9,1522	9,1500	24,8	0,0022	0,02403794	180
3	9,1522	9,1493	20,1	0,0159	0,17372872	180
5	9,1522	9,1363	21,5	0,0159	0,17372872	180
10	9,1522	9,1267	26,8	0,0255	0,27862153	180
15	9,1522	9,1195	28,7	0,0327	0,35729114	180
20	9,1522	9,1099	32,3	0,0423	0,46218396	180
25	9,1522	9,1033	31,1	0,0489	0,53429776	180

- **Test d'usure pour le dépôt traitement P21 sous une charge de 30(N) et une vitesse de rotation 180(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>30</b>	9,1033					180
<b>Temps (min)</b>						
1	9,1033	9,1012	45,1	0,0021	0,02306856	180
3	9,1033	9,0935	59,2	0,0098	0,10765327	180
5	9,1033	9,0889	73,2	0,0144	0,15818439	180
10	9,1033	9,0743	67,9	0,029	0,31856579	180
15	9,1033	9,0618	72,2	0,0415	0,45587864	180
20	9,1033	9,0222	59,2	0,0811	0,89088572	180
25	9,1033	9,0017	72,1	0,1016	1,11607878	180

## Annexe

- **Test d'usure pour le dépôt traitement P31 sous une charge de 5(N) et une vitesse de rotation 90(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM = M0 - M1</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>5</b>	9,0751					90
<b>temps (min)</b>						
1	9,0751	9,0757	19,9	0,0006	0,0066115	90
3	9,0751	9,0669	22,3	0,0018	0,01983449	90
5	9,0751	9,0597	23,6	0,0154	0,1696951	90
10	9,0751	9,0573	26,3	0,0178	0,19614109	90
15	9,0751	9,0538	27,7	0,0213	0,23470816	90
20	9,0751	9,0490	30,2	0,0261	0,28760014	90
25	9,0751	9,0253	35,5	0,0498	0,54875428	90

- **Test d'usure pour le dépôt traitement P31 sous une charge de 30(N) et une vitesse de rotation 90(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>ΔM = M0 - M1</b>	<b>ΔM/M0(%)</b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>30</b>	9,0253					90
<b>temps (min)</b>						
1	9,0253	9,0249	28,70	0,0004	0,00443199	90
3	9,0253	9,0201	33,90	0,0052	0,05761581	90
5	9,0253	9,0152	36,30	0,0101	0,11190764	90
10	9,0253	8,9829	41,20	0,9424	10,4417582	90
15	9,0253	8,9634	49,3	0,0619	0,68584978	90
20	9,0253	8,9433	50,5	0,082	0,90855706	90
25	9,0253	8,9226	52,4	0,1027	1,13791231	90

## Annexe

- **Test d'usure pour le dépôt traitement P31 sous une charge de 5(N) et une vitesse de rotation 180(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b><math>\Delta M = M0 - M1</math></b>	<b><math>\Delta M/M0(\%)</math></b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>5</b>	9,1347					180
<b>temps (min)</b>						
1	9,1347	9,1346	18,2	0,0001	0,00109473	180
3	9,1347	9,1023	23,3	0,0324	0,35469145	180
5	9,1347	9,1003	27,6	0,0344	0,37658599	180
10	9,1347	8,9375	28,90	0,1972	2,15880106	180
15	9,1347	8,9359	30,2	0,1988	2,17631668	180
20	9,1347	8,9343	33,5	0,2004	2,19383231	180
25	9,1347	8,9234	32,7	0,2113	2,31315752	180

- **Test d'usure pour le dépôt traitement P31 sous une charge de 30(N) et une vitesse de rotation 180(tr/min)**

<b>La charge (N)</b>	<b>Masse Initiale M0(g)</b>	<b>Masse Finale M1(g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b><math>\Delta M = M0 - M1</math></b>	<b><math>\Delta M/M0(\%)</math></b>	<b>Vitesse de Rotation (tr/min)</b>
<b>30</b>	8,234					180
<b>temps (min)</b>						
1	8,234	8,9221	27,8	0,0013	0,0157882	180
3	8,234	8,9210	30,5	0,0024	0,02914744	180
5	8,234	8,9202	36,7	0,0032	0,03886325	180
10	8,234	8,9198	38,90	0,0036	0,04372116	180
15	8,234	8,9170	39,30	0,0064	0,0777265	180
20	8,234	8,9133	40,70	0,0101	0,12266213	180
25	8,234	8,9103	45,9	0,0131	0,15909643	180

## Annexe

---

**\*Résultats obtenu par l'essai de corrosion pour les dépôts non traité A60 et traité P21etP31 :**

<b>acier</b>	<b>M<sub>0</sub></b>	<b>M<sub>5j</sub></b>	<b>M<sub>10j</sub></b>	<b>M<sub>15j</sub></b>	<b>M<sub>20j</sub></b>	<b>M<sub>25j</sub></b>	<b>M<sub>30j</sub></b>
<b>A60</b>	9.7113	9.7227	9.7284	9.7355	9.7280	9.7791	9.9391
<b>21021</b>	9.0022	9.0176	9.0233	9.0313	9.0257	9.0606	9.0829
<b>21031</b>	9.5174	9.5301	9.5304	9.5328	9.5312	9.6137	9.6233

**Résumé :**

Les revêtements par projection thermique sont souvent utilisés pour la protection des matériaux contre la corrosion malgré sa large utilisation dans le domaine d'usure.

Dans ce travail, des revêtements issus de la poudre à base de Nickel de type ProXon (P 21) et ProXon (P31) ont été réalisés sur le substrat en acier A60 de nuance E335, qui est un acier de construction d'usage général. Ces revêtement sont élaborés par la projection flamme-poudre qui consiste à introduire le matériau d'apport, sous forme de poudre, dans la flamme et à le porter à l'état fondu on pâteux puis le projeter sur la surface à revêtir. Les microstructures de la poudre et du dépôt sont obtenues en utilisant le microscope optique (MO), et le microscope électronique à balayage (MEB). Les dépôts composites ont été sélectionnés pour étudier leur comportement électrochimique (corrosion) dans le milieu salin (l'eau de mer). Cet essai permis de déterminer les paramètres électrochimiques tels que la vitesse de corrosion, le potentiel de corrosion et leurs résistances de polarisation.

**Absract:**

Thermal spray coatings are often used for the protection of materials against corrosion despite its wide use in the field of wear. In this work, coatings derived from the ProXon (P21) and ProXon (P31) nickel-based powder were produced on the E335 grade steel substrate A60, which is a general purpose structural steel. This coatings are elaborated by flame-powder spray which consists on introducing the initial feedstock material, in the form of powder, into a flama, meltig it at and spraying it then spraying it on surface to coat. Microstructures and identification of the powder and deposition phases were obtained using the optical microscope (MO), and the scanning electron microscope (SEM), Composite deposits were selected to study their electrochemical behavior (corrosion) in the saline medium (Sea water). This test made it possible to determine the electrochemical parameters such as the corrosion rate, the corrosion potential and their polarization resistances.

**ملخص**

الطلاء بالرش الحراري تستخدم لحماية المواد ضد التآكل علي الرغم منا استخدام على نطاق واسع في مجال الاحتكاك. في هذا العمل نقوم بالطلاء عن طريق مسحوق النيكل من ProXon (P21) و ProXon (P31) على راسب من الفولاذ الهيكلي من نوع E335. تعد هذه الطلاء بالمسحوق رش الشعلة بإدخال مواد حشو علي شكل مسحوق، الي ان يتم نوبان العجين ثم يتم اسقاطه على سطح الفولاذ بأكمله، بنية الطلاء حددت بواسطة المجهر الضوئي (MO) والمجهر الالكتروني الماسح، تجارب الصلابة لطلاء قاعدة من الحديد تمت بواسطة قياسات وقد تم هذا الاختبار لدراسة سلوك الكهروكيميائية مما يسمح لنا باستخراج إمكانيات التآكل، مقاومات التآكل في المياه المالحة 35 غ/ل.