

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 DIPLOME DE

MASTER

FILIERE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : MATÉRIAUX POUR INGÉNIERIE MÉCANIQUE

PAR :

OURAK BILLAL

ZOUAOUI BILAL

Thème

Caractérisation électrochimique d'un dépôt à base de fer obtenu par projection flamme-poudre sur un substrat en acier

Soutenu le 21/06/2017 devant le jury composé de:

Pr. M.A.BRADAI

Président

Dr. R.YOUNES

Rapporteur

Pr. Y.KHELFAOUI

Examineur

Dr. DJ.AMARI

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2016-2017

Remerciements

Avant tout, Dieu merci de nous avoir donné la patience et la volonté pour effectuer ce modeste travail. Au terme duquel, on tient à exprimer nos remerciements à Mr YOUNES.R, de nous avoir honoré en acceptant de diriger ce travail, et qui nous a accordé le soutien et l'aide durant les différentes étapes, ainsi que pour ces précieuses orientations.

Nos profonds remerciements à monsieur M.A BRADAI professeur à l'université Bejaia qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

On tiens également à remercier vivement monsieur Y KHELFAOUI professeur à l'université de Bejaia, et monsieur DJ AMARI docteur à l'université de Bejaia pour avoir consacré leurs temps précieux à lire et à évaluer ce travail.

Nos vifs remerciements à monsieur KHIMA rochedine ingénieur au sein d'ERENAV pour son soutien et son aide durant la réalisation du notre projet et ces critiques minutieuses et ses précieuses orientations.

Une pensée va particulièrement à ces deux jeunes hommes Hammachi que dieu les accueille dans son vaste paradis.

On tient également à associer à ce travail tous nos collègues de promotion qu'On a le plaisir de côtoyer pendant cette période de formation

On pense enfin fortement à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie le présent mémoire à :

*Ma mère, et mon père qui m'ont toujours
soutenu affectivement et moralement,*

Ainsi que :

Mes frères

Mes Sœurs

À toute ma famille

Et mes amis

OURAK Bilal

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*Ma source éternelle d'inspiration, de
motivation et de bénédiction ... Ma mère*

*Mon maître de passion, de patience et de
persévérance ... Mon père*

Mes Sœurs

Mon Frère

Mes amis

Ainsi toute Ma famille

A eux, je dédie ce mémoire

ZOUAOUI Bilal

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Eléments bibliographiques

Introduction.....	1
I.1 projection thermique.....	1
I.1.1 Historique et évolution de projection thermique.....	1
I.1.2 Principe de projection thermique	2
I.1.2.1 Projection par arc électrique	3
I.1.2.2 projection plasma.....	4
I.1.2.3 Projection supersonique à froid « Cold Spray ».....	5
I.1.2.4 projection flamme supersonique « HVOF ».....	5
I.1.2.5 Projection à détonation.....	6
I.1.2.6 Projection à la flamme.....	7
I.1.2.6.1 Projection flamme-poudre.....	7
I.1.2.6.2 Projection flamme-fil	8
I.1.3 Projection flamme-fil.....	9
I.1.3.1 Avantages et inconvénients du procédé flamme-fil	10
I.1.3.2 Paramètres opératoires du procédé flamme-fil.....	10
I.2 Formation et structure des dépôts	11
I.2.1 Ecrasements des particules des revêtements sur le substrat	11
I.2.2 Structure générale des revêtements réalisé par projection thermique	12
I.2.2.1 Structure métallurgique.....	13
I.2.2.2 Oxydes	14
I.2.2.3 La densité.....	14
I.2.2.4 Adhérence	14
I.2.2.5 Dureté.....	14
I.2.3 Préparation de surface	14
I.2.3.1 Dégraissage	14
I.2.3.2 Décapage	15
I.2.3.3 Le Sablage	15
I.2.3.4 Préchauffage	15
I.2.4 Paramètre de projection influence sur le dépôt.....	16

I.2.5 généralité sur le fer.....	16
I.2.5.1 Propriétés physico-chimique du fer.....	17
I.2.5.2 Les alliages de fer.....	17
I.2.5.3 Diagramme Fer-Carbone.....	18
I.2.5.4 Domaines d'utilisation	19
I.3 Généralité sur le phénomène de corrosion	19
I.3.1.1 Définition de la corrosion.....	19
I.3.1.2 Facteurs de la corrosion	20
I.3.1.3 Processus de la corrosion	21
I.3.1.3.1 Corrosion sèche.....	21
I.3.1.3.2 Corrosion humide	21
I.3.1.4 Les formes de la corrosion	23
I.3.1.4.1 Corrosion uniforme (généralisé).....	23
I.3.1.4.2 Corrosion localisé.....	23
I.3.2 Corrosion en milieu marin	28
I.3.2.1 Propriétés de l'eau de mer.....	28
I.3.3 Corrosion électrochimique	29
I.3.3.1 Thermodynamique électrochimique	30
I.3.3.2 Droite de Tafel.....	32

Chapitre II : Matériaux et techniques expérimentales

Introduction.....	33
II.1 matériaux utilisés.....	33
II.1.1 Substrat	33
II.1.2 Dépôts réalisés	33
II.1.3 Elaboration des échantillons.....	34
II.1.4 Préparations des surfaces à revêtir	35
II.2 Réalisations des dépôts.....	35
II.2.1 Paramètre de projection.....	35
II.2.2 Pistolet utilisé.....	36
II.3 Méthodes de caractérisation des revêtements.....	36
II.3.1 Méthode d'analyse de la microstructure.....	36
II.3.1.1 Préparation des échantillons pour l'observation métallographique	36
II.3.1.2 Microscope optique.....	37

II.3.1.3 Microscope électronique à balayage (MEB).....	38
II.3.2 Caractérisation des propriétés mécanique des revêtements.....	39
II.3.2.1 Essai de dureté Vickers.....	39
II .3.3 Etude le comportement électrochimique.....	40
II.3.3.1 Cellule électrochimique	40
II.3.3.2 Potentiel de corrosion.....	41
II.3.3.3 Courbe de polarisation.....	41

Chapitre III Résultat et discussion

Introduction.....	44
III.1 Caractérisation microstructurale	44
III.1.1 Caractérisation par microscope optique	44
III.1.2 Caractérisation par microscope électronique à balayage (MEB).....	44
III.1.2.1 La poudre utilisée.....	44
III.1.2.2 Microstructure de dépôt réalisé par la poudre ProXon 21023.....	45
III.2 Evaluation de la dureté Vickers.....	46
III.3 Comportement électrochimique.....	47
III.3.1 Les courbes de polarisation $i=f(E)$	47
III.3.2 Détermination la perte de masse	50

Conclusion générale

Références bibliographiques

Résumé

Listes des figures

Figure I.1 : Principe de la projection thermique.....	3
Figure I.2 : Schéma de principe de la projection à l'arc.....	4
Figure I.3 : Schéma de principe de la projection plasma.....	5
Figure I.4 : Schéma du principe de la projection supersonique HVOF	6
Figure I.5 : Schéma de principe du canon à détonation	6
Figure I.6 : Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre	8
Figures I.7 : Schéma d'un pistolet flamme fil	9
Figure I.8 : Schéma de principe de la projection thermique à flamme-fil	10
Figure I.9 : Schéma d'écrasement de la particule	12
Figure I.10 : Schéma de principe de formation d'un dépôt élaboré par la projection thermique.....	13
Figure I.11 : schéma représenté les alliages de fer-carbone.....	18
Figure I.12 : diagramme fer-carbone	19
Figure I.13 : Schéma de principe de la corrosion sèche	21
Figure I.14 : Corrosion électrochimique.....	22
Figure I.15 : Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé	24
Figure I.16 : Echelle galvanique de quelques métaux du plus noble au moins noble	24
Figure I.17 : Amorçage (a) et propagation (b) d'une piqûre	25
Figure I.18 : Schéma de principe Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage cuivre-zinc)	25
Figure I.19 : Schéma représente la corrosion intergranulaire.....	26
Figure I.20 : Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion	26
Figure I.21 : Fissuration sous contrainte : fissure intergranulaire (a), fissuretransgranulaire (b).....	27
Figure 1.22 : Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse	27

Figure I.24 : influence du pH sur le taux de corrosion	29
Figure I.25 : corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée	31
Figure I.26 : Evolution des densités de courant en fonction du potentiel	32
Figure I.27 : Courbe $E = f(\log(j))$ et droites de Tafel.....	33
Figure II.1 : Echantillon utilisé pour la projection.....	35
Figure II.2 : Pistolet flamme-poudre.....	36
Figure II.3 : Polisseuse mécanique.....	37
Figure II.4 : photo de microscope	38
Figure II.5 : microscope électronique à balayage (MEB).....	39
Figure II.6 : Machine de dureté universelle TYPE Diastor 2RC.....	40
Figure II.7 : Cellule électrochimique utilisé.....	41
Figure II.8 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.....	42
Figure II.9 : Dispositif de tracé d'une courbe de polarisation. ET : électrode de travail, ER : électrode de référence, CE : contre électrode, P : potentiostat.....	43
Figure III.1 : Microstructure d'un revêtement à base de fer.....	44
Figure III.2 : Microstructure de la poudre ProXon 21023.....	45
Figure III.3 : Microstructure du dépôt réalisé par la poudre ProXon 21023.....	45
Figure III.4 : histogramme présente la dureté Vickers.....	46
Figure III.5 : Les empreintes Vickers sur une surface lisse : (a) substrat, (b) dépôt P23...47	47
Figure III.6 : courbe de polarisation $i=f(E)$ de dépôt à base de fer (P23).....	48
Figure III.7 : Courbe de polarisation $i=f(E)$ du Substrat.....	48
Figure III.8 : Courbe de polarisation de dépôt à base de fer (P23) et sans dépôt (Substrat).....	49
Figure III.9 : Photo par microscope optique après immersion pour le dépôt, (a) : Après 10 jours, (b) : Après 20 jours.....	51

Les listes des tableaux

Tableau I.1 : les caractéristiques mécanique du fer α pur à 20°C.....	17
Tableau I.2 : Les principaux facteurs de la corrosion.....	20
Tableau I.3 : Teneur en éléments les plus abondants dans l'eau de mer.....	28
Tableau II.1 : La composition chimique de l'acier E335.....	33
Tableau II.2 : Compositions et caractéristiques de la poudre utilisée donnée par le fournisseur.....	34
Tableau II.3 : paramètres de projection utilisé par l'entreprise.....	35
Tableau III.1 : les résultats de la dureté Vickers.....	46
Tableau III.2 : les paramètres de corrosion.....	49
Tableau III.3 : Résultats après immersion pendant 10 et 20 jours dans une solution de saline (35 g/l) à la température ambiante.....	50

Introduction générale

Dans l'histoire, la finition des pièces fabriquées métalliques était négligée et on tient compte que la fonctionnalité, et des objectifs visés par cette pièce. Après quelques années on a remarqué qu'un traitement de surface de la pièce permet d'augmenter la durée de vie des pièces et leurs fonctionnalités, et d'améliorer les caractéristiques tel que la résistance, et récupération et rénovation des pièces mécaniques usées.

Parmi les techniques de traitement surfacique plus utilisé on trouve la projection thermique, qui regroupe l'ensemble des procédés auquel un matériau d'apport porté à l'état fondu ou pâteux est accéléré et transporté jusqu'au substrat sur lequel il se solidifie, elle permet de déposer des matériaux et des céramiques sur des pièces qui peuvent être de grands surfaces. En utilisant l'énergie de la combustion d'un mélange oxy-gaz flamme ou d'un arc électrique ou un jet plasma.

Les principales applications des dépôts réalisés par projection thermique flamme-poudre sont la résistance à l'usure et la corrosion. etc. Ces dépôts sont actuellement utilisées dans la plupart des secteurs industries, et en particulier l'automobile (vilebrequin, pistons, plaquettes des freins...etc), marine (les hélices ...etc), l'aéronautique (ailettes de turbine fixes, chambre de combustion...etc).

Depuis des nombreuses années, le phénomène de corrosion existe, ce qui implique l'emploi de certains métalliques possèdent des propriétés répondant aux besoins de l'industrie.

Par définition de la corrosion c'est la dégradation naturelle métallique qui est l'effet de l'environnement et des réactions chimiques ou électrochimiques retournent à l'état d'oxyde plus stable.

En effet, la corrosion limite la durée de vie des matériaux, qui cause des pertes de productivité ce qui endommage de nombreux secteurs de l'industrie. Qui entraînent le mode à des pertes que se chiffrent à des milliards de dollars par année.

Dans la vie quotidienne, domestique ou industrie, le phénomène de corrosion est d'une grande importance économique, les matériaux utilisés comme des revêtements protecteurs contre la corrosion.

L'objectif de ce mémoire est réalisé des revêtements de fortes épaisseurs à partir d'un matériau métallique à base de fer (alliage Ni-Al-Fer) sur un substrat E335. La microstructure et la morphologie des revêtements réalisé a été observé par microscope optique (MO) et microscope électronique à balayage (MEB), nous avons fait des mesures mécaniques pour déterminer la

Introduction générale

micro dureté des dépôts, par suit l'étude le comportement électrochimique dans le milieu salin (35g/l) des dépôts.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les différents de la projection thermique, en particulier la projection flamme-poudre, dans la deuxième partie trait la structure des dépôts et les techniques de préparations surface, ainsi les techniques influence sur le dépôt et quelque généralité sur le fer, dans la troisième partie des notions sur le phénomène de corrosion et ces formes suivi par la corrosion électrochimique.

Le deuxième chapitre, présenté les technique et les méthodes expérimentales utilisé tels que : l'analyse de microstructure par microscope optique (MO), et microscope électronique à balayage (MEB), la caractérisation mécanique basés sur la micro dureté, la caractérisation électrochimique.

Le dernier chapitre présenté tous les résultats obtenus avec discussion et interprétation

Cette étude se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Eléments
bibliographiques

Introduction

Ce chapitre consacré à la présentation des principaux éléments bibliographiques relatifs aux principaux thèmes abordés dans ce mémoire.

La première partie traite les différentes techniques de la projection thermique, tout en mettant l'accent sur le procédé à flamme-poudre, ainsi que les paramètres opérations du procédé.

La deuxième partie est consacrée sur les généralités du matériau à projeter, les caractéristiques générales des revêtements, ainsi que l'influence des paramètres de projection pour ce procédé, quelques généralités sur le fer.

La troisième partie de ce chapitre, ont présenté quelques généralités sur la corrosion, définition, les différents formes, et quelques notions sur la corrosion en milieu marin, ainsi la corrosion électrochimique.

I.1 Projection thermique

I.1.1 Historique et évolution de projection thermique

Parmi les techniques dites «propres», la projection thermique est l'une des plus anciennes. Ce travail concerne un nouveau développement de cette technologie. La projection thermique a plus de 100 ans. Au début du 20ème siècle (1909) un ingénieur suisse de Zurich, le Docteur Max Ulrich Schoop a minutieusement étudié l'impact de balles en plomb sur un mur en béton, ce qui lui a inspiré de réaliser une invention portant sur l'utilisation de la technique de revêtement en plomb ou en zinc par projection de métal fondu. Dans un premier temps, il a utilisé un creuset rempli de métal fondu et de l'air préalablement chauffé pour la pulvérisation et la projection du métal. Après différentes évolutions techniques, l'utilisation d'un chalumeau comme source d'énergie et d'un métal en poudre a été qualifiée et brevetée en 1911 comme "processus pour fondre un matériau dans une zone de chauffage et pour le propulser à l'état fondu et/ou ramolli par la chaleur, sur une cible pour y former un enduit". Concernant la source enthalpique, la première innovation a été brevetée par Hermann Drösse. Il a proposé un appareil de chauffage par arc électrique. Depuis, les procédés avec utilisation de l'arc n'ont pas cessé d'évoluer. En 1912 Schoop remplace la poudre par un fil métallique en créant un véritable pistolet de projection. En 1915, il dépose un brevet sur le principe de la projection par arc électrique entre deux fils. Le procédé devient utilisable pour de nombreuses applications dans les domaines de la protection de surface, de l'anticorrosion, de la réparation et du rechargement. Son inventeur reçoit une récompense de mérite en 1915 et la technologie est mondialement connue depuis sous le nom de «schoopage». A partir de ce cette période deux types de source enthalpique ont été développés. Le premier utilise l'énergie de la combustion et le second l'énergie d'une décharge électrique continue [1].

La combustion a été au départ le procédé le plus développé, marqué par l'apparition du canon à détonation (D-Gun Coatings) breveté par Praxair Surface Technologie dans les années 50. La nécessité d'utiliser des matériaux réfractaires, notamment dans le domaine de l'aérospatial, a entraîné le développement de nouvelles techniques, en particulier l'utilisation de l'énergie du plasma. Le développement des équipements, notamment des générateurs de plasma, a permis d'améliorer la longévité des torches (brevet SNECMA déposé en 1960) et par conséquent rendu de plus en plus utilisés les procédés de projection par plasma dont l'abréviation anglaise APS (Atmospheric Plasma Spraying) est largement répandue dans les publications depuis [1].

Les années 70 montrent le développement de la projection plasma sous faible pression résiduelle. Le premier dépôt a été obtenu par Muehlberger en utilisant la technique baptisée par la suite Vacuum Plasma Spraying (VPS) ou Low Pressure Plasma Spraying (LPPS). Elle permet d'exploiter le procédé pour l'obtention de dépôts métalliques denses sans présence d'oxydes et avec une meilleure adhérence. Un autre procédé qui a marqué l'évolution technologique de la projection thermique mais par source enthalpique gazeuse est en 1983 le procédé High Velocity Oxy-fuel (HVOF), technique de Browning Engineering qui a fourni des revêtements à haute température pour les turbines à gaz dans le domaine aéronautique et spatial [1].

Ainsi depuis les premiers travaux de Schoop, la compréhension des phénomènes physiques impliqués dans le procédé, l'avancement des modélisations, le développement des systèmes de contrôle en ligne, la robotisation et l'automatisation des processus ont assuré un progrès constant de la projection thermique et de son application pour l'élaboration de nouveaux matériaux [1].

Depuis, la projection thermique a donné lieu à de très nombreux développements ayant pour objet d'étendre le champ d'application de la technique à de nouveaux matériaux et d'améliorer certaines propriétés des revêtements. Quelques dates ont particulièrement marqué la projection thermique [2]:

- ✓ 1911 : Utilisation de la projection à l'arc électrique par M.U. Schoop ;
- ✓ 1951 : Invention de la projection plasma ;
- ✓ 1955 : Naissance du canon à détonation ;
- ✓ 1975 : Création de la projection plasma sous faible pression de gaz interne ;
- ✓ 1983 ; Début de la projection à la flamme rapide (HVOF) ;
- ✓ 1991 ; Emergence de la projection plasma sous gaz neutre à pression supérieure à la pression atmosphérique ;
- ✓ 1993 : Prise de brevet du procédé PROTAL® ;
- ✓ 1995 : Développement de la projection froide ou "cold spray".

I.1.2 Principe de la projection thermique

La projection thermique consiste à utiliser une source de chaleur pour fondre et accélérer un matériau. Celui-ci prend alors la forme de particules pâteuses ou liquides qui heurtent, s'étalent et se solidifient sur un substrat, formant un dépôt par empilements successifs [3].

Ce technique permettent de projeter une grande gamme de matériau : métaux et alliages, cermets, céramiques et dans certains conditions, des polymères. Une différence de 300°K entre la température de fusion et la température de décomposition ou d'évaporation du matériau est nécessaire pour que le matériau puisse être projeté dans de bonnes conditions [4].

La morphologie et les propriétés des dépôts dépendent de nombreux paramètres expérimentaux (**Figure I.1**), relatifs principalement à :

- ✓ la nature du matériau à projeter,
- ✓ la source de chaleur,
- ✓ l'atmosphère environnante,
- ✓ le substrat.

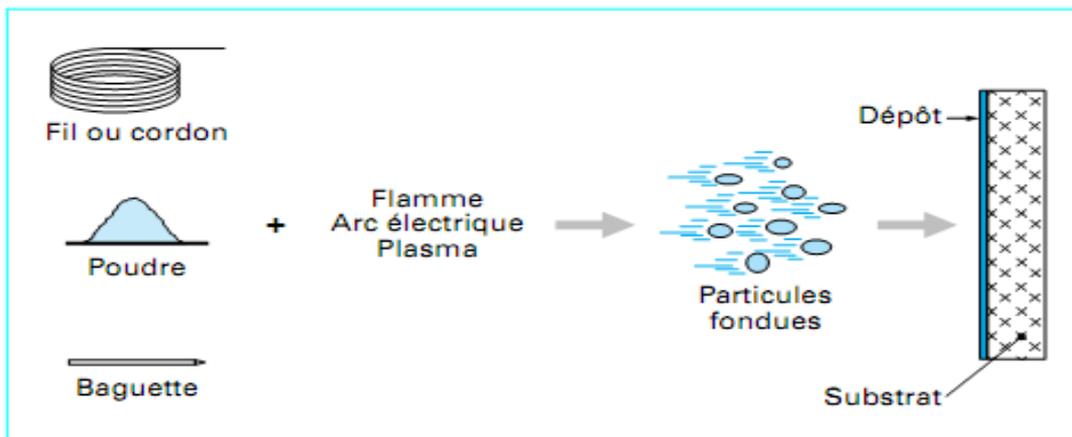


Figure I.1 : Principe de la projection thermique [5].

Il existe de nombreux procédés de projection thermique. Tous les procédés utilisent le même principe : fondre un matériau d'apport, puis le projeter grâce à un gaz vecteur. Deux types d'énergie sont utilisés comme source de chaleur : la flamme et l'arc électrique. Les six principaux procédés sont la projection à l'arc, plasma, à froide, HVOF, à détonation et à la flamme.

I.1.2.1 Projection par arc électrique

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

L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, et un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible). Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant [Figure I.2]. L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à 10% et une adhérence de 20 à 40 MPA. La technique est simple et peu coûteuse et permet de déposer la matière avec un débit important (de 5 à 30 kg/h). L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt. Des modifications du pistolet et l'emploi d'un second jet de gaz ont permis de concentrer le flux de matière atomisée et de diminuer la porosité des couches [6].

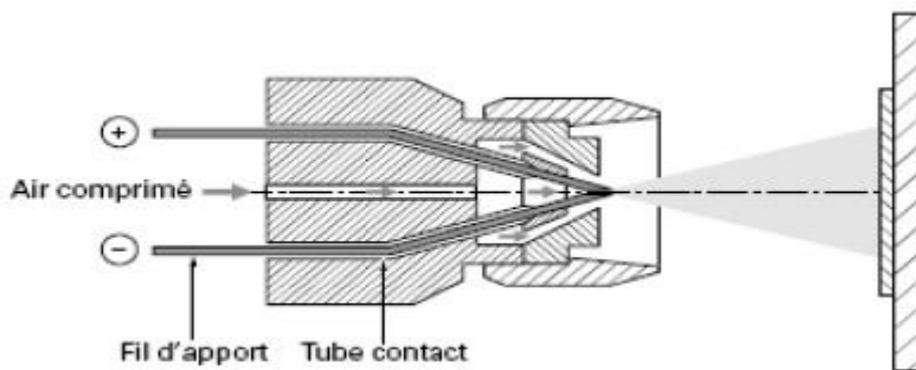


Figure I.2 : Schéma de principe de la projection à l'arc [5].

Les matériaux projetés sont des métaux conducteurs électriques (aluminium, cuivre, zinc, molybdène), des aciers mais aussi des alliages NiCrAl, NiMoAl. L'une des limites importantes du procédé est la nature des matériaux (tréfilabilité et conductibilité). La gamme des matériaux projetés peut être élargie en utilisant la technologie des fils fourrés qui permet de déposer des carbures (CrC, WC, TiC) et des oxydes ainsi que d'élaborer des couches composites [1].

I.1.2.2 Projection plasma

Le plasma est initialement amorcé par une source extérieure comme un arc de décharge électrique à haute tension. Cet arc crée une zone localement conductrice entretenue par les

courants induits. La génération du plasma se passe dans un tube généralement en quartz qui est entouré par un inducteur appliquant un champ magnétique alternatif à haute fréquence.

L'injection des particules est effectuée axialement à l'aide d'un injecteur refroidi par l'eau. La vitesse d'écoulement du gaz est directement liée au diamètre intérieur de la torche (de l'ordre de 50 mm) et entraîne un séjour plus long des particules dans le plasma, ce qui permet de fondre les particules de grande taille ($\sim 100 \mu\text{m}$). L'utilisation de la projection plasma HF est possible sous atmosphère inerte ou réductrice dans une gamme de pression située entre 10 et 200 kPa. Il est possible d'y utiliser un divergent de type de-Laval qui permet d'atteindre une vitesse d'écoulement supersonique pour une pression de chambre d'environ 6 kPa. La torche reste immobile pendant la projection, donc c'est le substrat qui doit être déplacé [1].

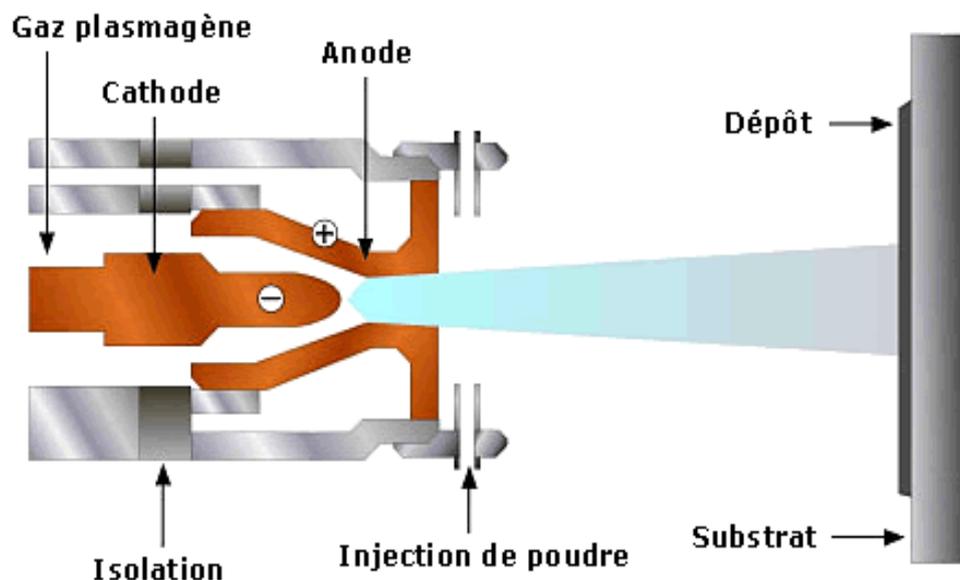


Figure I.3 : Schéma de principe de la projection plasma [7].

I.1.2.3 Projection supersonique à froid « Cold Spray »

Qui n'est pas réellement un procédé de projection thermique puisqu'il s'effectue « à froid » mais lui est tout de même assimilée. Cette technique très récente est encore en développement et consiste à utiliser un jet de gaz chaud à haute pression (20 à 35 bars) pour projeter une poudre, généralement métallique préchauffée. Les particules adhèrent au substrat et les unes aux autres par déformation plastique, ce qui permet de limiter l'échauffement et les contraintes résiduelles [8].

Cependant, seuls les procédés permettant d'atteindre des températures et des vitesses élevées de particules peuvent faire fondre les matériaux à température de fusion très élevée (exemple : la température de fusion de l'alumine est 2050°C) [9].

I.1.2.4 Projection flamme supersonique (HVOF) [10]

La projection à la flamme supersonique utilise également une troche à flamme mais la géométrie spéciale de la tuyère et l'ajout d'une chambre de combustion (où règne une pression de 0,5 à 0,7 MPa), suivie d'une tuyère convergente-divergente, permet à la flamme d'atteindre des vitesses supersonique. Le matériau à projeter se présente généralement sous forme de poudre. Il est injecté à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où il est fondu et accéléré dans la tuyère à une vitesse de 300-600m/s

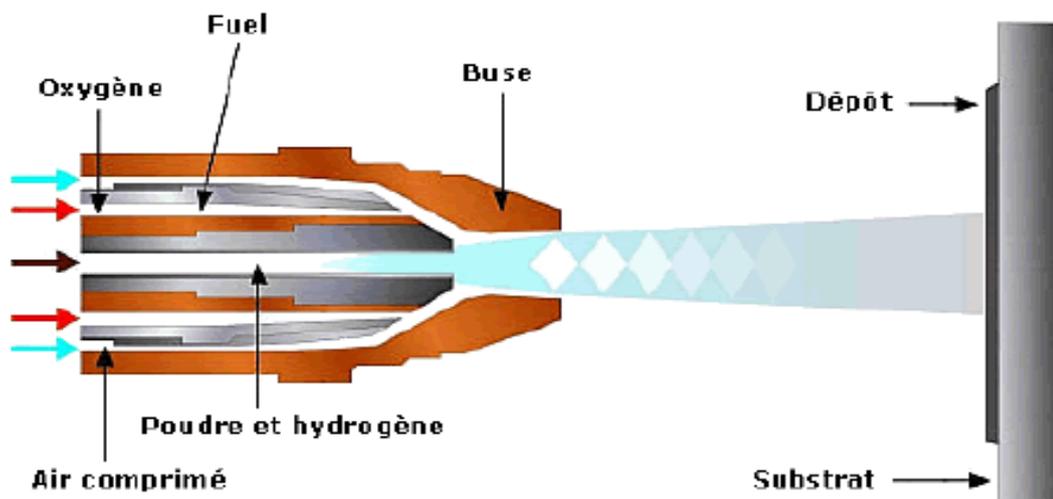


Figure I.4 : Schéma du principe de la projection supersonique HVOF [7].

Les pressions importantes atteintes dans le pistolet n'autorisent pas l'utilisation de l'acétylène comme gaz combustible (risque d'explosion). Pendant leur temps de séjour très court (quelques dixièmes de millisecondes) dans la flamme, les particules sont généralement chauffées à l'état pâteux, l'énergie cinétique (vitesse >300m/s) acquise permettant cependant la réalisation de dépôt caractérisés par une faible porosité (<2%), une bonne adhérence (70-100%MPa) et une faible rugosité de surface. Les principales applications de ce procédé sont la projection de cermets (WC-Co, Cr-Co ou NiCr), de métaux, d'alliages et d'alliage auto faibles.

I.1.2.5 Projection à détonation [1]

Le procédé est connu sous le nom de D-Gun (détonation gun). Le dispositif principal est un canon à détonation, où la réaction d'oxydation se produit avec une vitesse supérieure à la vitesse du son [Figure I.5], le canon est constitué d'un tube de diamètre 21 à 25 mm et d'une longueur d'environ 1 m fermé d'un côté. Il est équipé d'un système de soupapes pour injecter les gaz et la poudre ainsi que d'un dispositif d'allumage entièrement automatisé. La poudre est injectée en même temps que le mélange des gaz (généralement acétylène/oxygène).

L'onde de choc de l'explosion amorcée par une étincelle propulse la poudre tout au long du canon avec une vitesse proche de 1000 m/s.

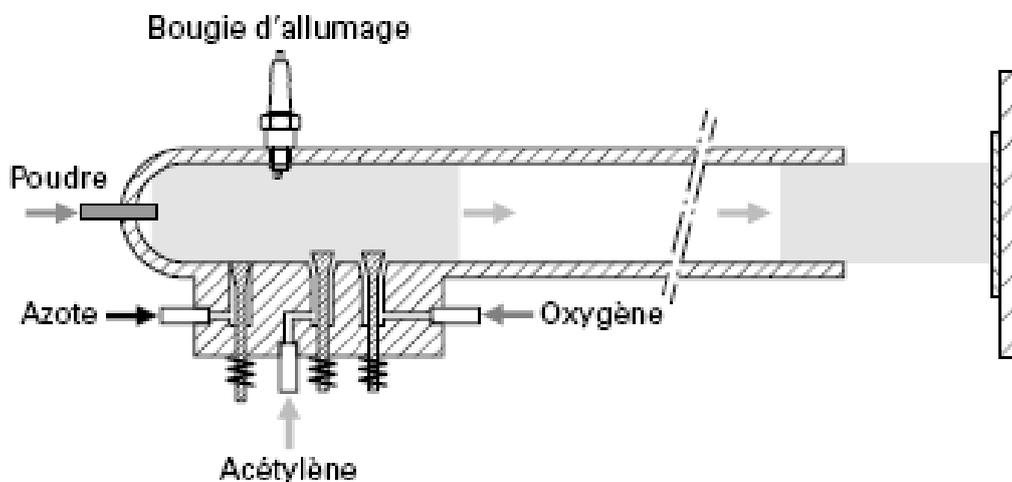


Figure I.5 : Schéma de principe du canon à détonation [5].

Les allumages sont reproduits avec une fréquence de 4 à 10 tirs par seconde et successivement suivis d'un balayage du canon avec un gaz neutre. Le revêtement obtenu possède un faible taux de porosité (moins de 1%) et une très bonne adhérence (80 MPa) mais il est limité à une épaisseur qui ne dépasse pas 300 μm .

Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de W et de Cr avec des liens de Ni ou Co, mais aussi des oxydes de chrome ou de l'aluminium. Les applications en protection anti-usure sont dans les domaines de l'aéronautique et de la sidérurgie.

I.1.2.6 Projection flamme [11]

On désigne par le nom de projection flamme toute projection utilisant l'énergie thermique provenant de la combustion d'un carburant avec l'oxygène. La température d'une flamme oxy-combustible varie de 2800°C à 3150°C. Les matériaux qui fondent à une température inférieure

à 2800°C, et qui ne subliment pas, peuvent être projetés. Il existe deux types de projection par flamme qui sont à flamme poudre et fil :

I.1.2.6.1 Projection flamme poudre

Le procédé de projection par flamme est le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustible et à le véhiculer jusqu'au substrat grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (fig. I.6). Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000 °C. La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (~ 50 m / s) et c'est pourquoi elles sont souvent accélérées avec de l'air. La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondues. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes à quelques centièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 1 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat ($T < 250^\circ\text{C}$). Les taux de porosité varient de 10 à 20% avec un rendement moyen de 50 %. La force d'adhérence des dépôts au substrat est de 20 à 40 MPa [11].

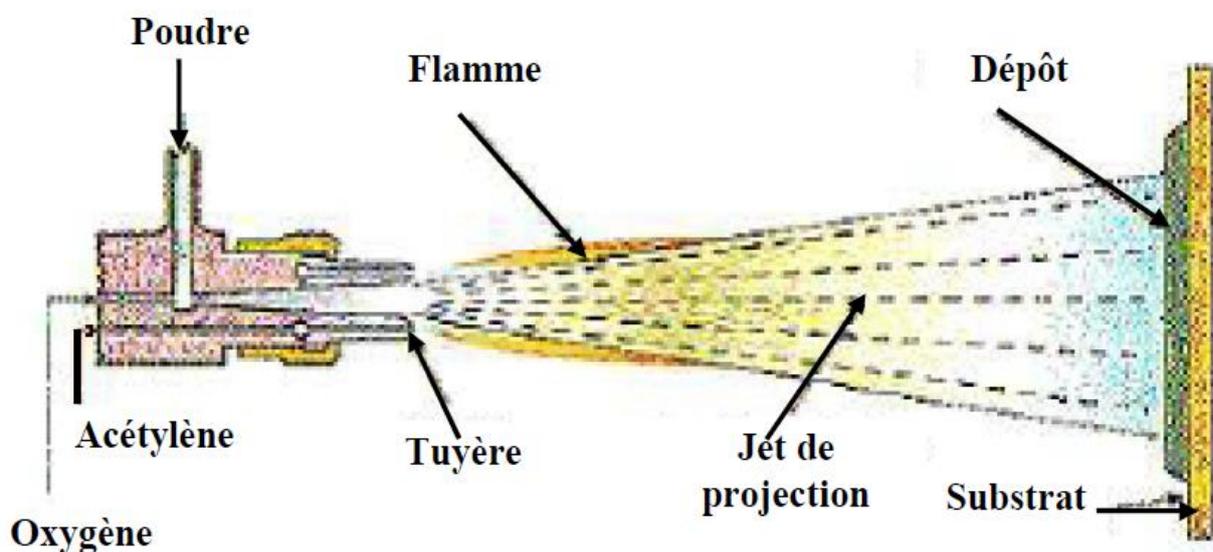
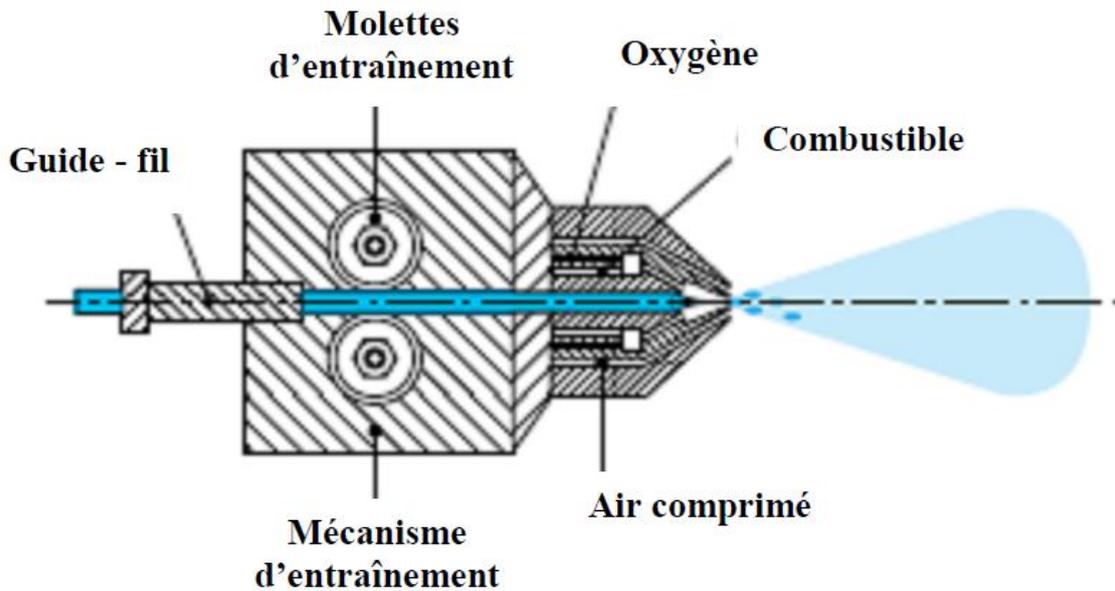


Figure I.6 : Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre [11].

I.1.2.6.2 Projection flamme fil [11]

Dans cette technique (fig. I.7) le matériau d'apport est introduit dans le centre de la flamme sous forme de fil, de cordon, ou de baguette. Ce procédé utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme poudre et qui ne sert qu'à faire fondre le matériau. Une fois fondu, le

matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé, celui-ci sert à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse des particules est plus élevée ($\approx 150\text{m/s}$), la température du bout de fil peut atteindre 0.95 fois la température de la flamme ce qui permet la projection des céramiques, à des taux horaires de dépôts qui varient de 1 à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, les propriétés de dépôts désirées et les diamètres de fil ou de baguettes utilisés.



Figures I.7 : Schéma d'un pistolet flamme fil [11].

On résumé les différents types de projection thermique et leurs caractéristiques dans le tableau suivants :

Tableau I.1 : caractérisation des différents types de projection thermique.

Caractéristiques	Projection Flammepoudre	Projection flamme fil	Projection HVOF	Projection par canon à détonation	Projection arc électrique	Projection plasma
Source den chaleur	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Arc électrique	Plasma
Températurede flamme(°C)	3 000	3 000	3 000	3 000	6 000	12000

Eléments bibliographiques

Transport des particules	Gazflamme	Air comprimé	Gazflamme	Gaz flame	Air comprimé	Gaz plasma(Ar/H)
Vitesse des particules (m/s)	40	150	700	950	250	200
Formedu matériau d'apport	Poudre	Fil ou cordon	Poudre	Poudre	Fil	Poudre
Rendement moyen(%)	50	70	70	70	80	70
Epaisseur(mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1	0,2 à 3	0,05 à 1,5
Exemple matériaux d'apport	-Métaux -Céramiques -Carbures dans matrice métallique	-Métaux -Céramiques -Carbures dans matrice métallique	-Métaux -Carbures	-Métaux -Céramiques	-Métaux	-Métaux -Céramique -Carbures

I.1.3 Projection flamme-fil [10]

Il existe également un procédé appelé « projection Flamme-fil » où le matériau d'apport est sous forme de fil, de baguette ou de cordon. Il utilise les même gaz que ceux utilisés en projection flamme-poudre (oxygène gaz combustible) auxquels s'ajoute de l'air comprimé servant à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse des particules est plus élevée (environ 150m/s). La température de l'extrémité du fil ou de la tige peut atteindre 0,95 fois la température de la flamme ce qui permet de projeter des céramiques. Les taux horaires varient de 1 kg/h à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, des diamètres de fil ou de baguettes utilisées et des propriétés de dépôts recherchées (figure I.8).

La projection Flamme-fil, plus connue sous le nom de métallisation ou shoopage a été inventée en 1910 par suisse schoop qui a développé le premier pistolet de projection thermique de fils

métalliques. L'appareil consistait en un brûleur dans lequel un carburant, acétylène ou hydrogène, était mélangé avec de l'oxygène pour créer une flamme en sortie de tuyère de brûler. Un jet d'air comprimé entourant la flamme atomisant et propulsait le métal fondu. La continuité du procédé dépendait de l'approvisionnement du fil dans la flamme avec une vitesse contrôlée de façon à le fondre et le projeter avec un flux continu. Schoop résolut ce problème en utilisant une turbine qui actionnait un système d'engrenages et de molettes qui tirait le fil dans la du brûleur. Cette appareillage lui apparut similaire à un pistolet, depuis c'est pour cette raison que l'on parle de « pistolet » de projection thermique et rarement de « troche ». Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure du dessous.

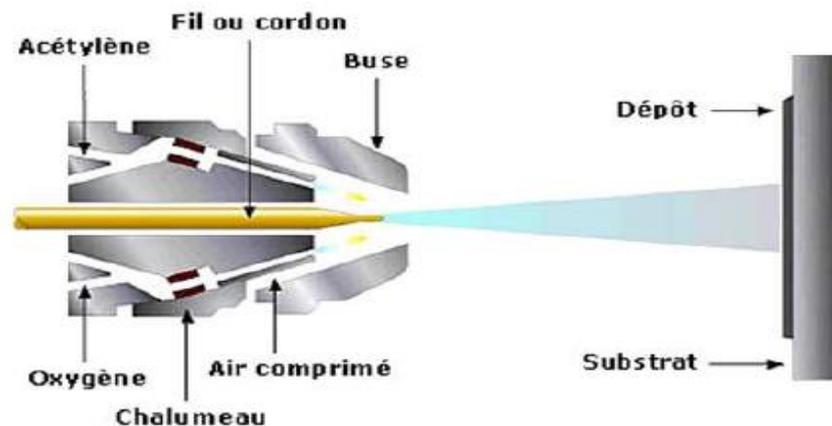


Figure I.8 : Schéma de principe de la projection thermique à flamme-fil [7].

Ce type de procédé de projection thermique a été très largement utilisé et l'est encore aujourd'hui pour les travaux de réparation d'éléments de machine et la protection contre la corrosion.

I.1.3.1 Avantages et inconvénients du procédé flamme-fil [10]

Ses avantages sont déjà qu'il a un coût d'investissement faible, il est facile d'utilisation et permettent l'obtention de rendements de projection élevés, c'est un système portable qui peut être utilisé en chantier. Ses désavantages sont qu'il est limité à la projection de matériaux existant sous forme de fil et le procédé ne permet pas l'obtention de revêtement à haute densité, avec un taux d'oxyde faible et une grande adhérence.

I.1.3.2 Paramètres opératoires du procédé à flamme-fil [10]

- a) **Débit des gaz** : Un excès d'oxygène augmente l'oxydation du dépôt, donc sa dureté et réduit sa résistance mécanique (flamme oxydante), et un excès d'acétylène, entraîne un charbonnage du revêtement (flamme carburante).
- b) **Pressions** : Une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal donc toutes les consommations.
- c) **Diamètre du fil ou du cordon** : Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente le grain du dépôt et les pertes.
- d) **Vitesse du fil ou cordon** : Si elle trop grande, elle augmente la cadence et grosseur du grain, trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.
- e) **Pression de l'air (vecteur de la projection)** : Son accroissement diminue la grosseur du grain, mais augmente l'oxydation du dépôt.
- f) **Distance de projection** : Trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence, et surchauffe du dépôt, et elle est trop grand, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence.
- g) **Angle** : En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.
- h) **Vitesse de balayage** : Trop rapide, elle augmente les pertes de métal, il est Trop lent, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulières et élève la température du support.
- i) **Vitesse de rotation (travaux sur tour)** : Trop rapide, elle entraîne un rebondissement des particules et une pollution du dépôt, elle est Trop lente, elle entraîne une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.

I.3 Formation et structure des dépôts [12]

Les dépôts formé par projection thermique sont obtenue par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est de type lamellaires. L'utilisation de l'air comprimé dans la pulvérisation du métal fondu et sa projection vers la surface à revêtir provoque l'oxydation, les réactions chimiques des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleur avec le substrat affectent une quantité du dépôt par la formation de porosités. On trouve souvent dans la morphologie des revêtements, des particules sphériques non fondue, celles qui soient initialement à l'état pâteux, et qui se solidifient avant d'arriver sur la surface du substrat.

Afin de réaliser un bon accrochage mécanique, la surface des pièces à revêtir est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface.

La surface du dépôt présente deux étapes caractéristiques :

- ✓ L'écrasement de chaque gouttelette
- ✓ La formation d'une couche de matériau, résultant de la cinématique liée au processus (mouvement relatifs torche/pièce)

I.3.1 Ecrasement de particules projetées sur le substrat [12]

Lorsqu'une particule fondue s'écrase sur le substrat, elle prend une forme lamellaire grâce à l'étalement latéral du liquide sous les pressions présentes dans la particule (figure I.9). L'énergie cinétique de la particule se transforme en déformation visqueuse et en énergie de surface à la fin de l'écrasement. L'écrasement de la particule peut être divisé en trois étapes : impact initial, étalement de la particule et enfin refroidissement et solidification.

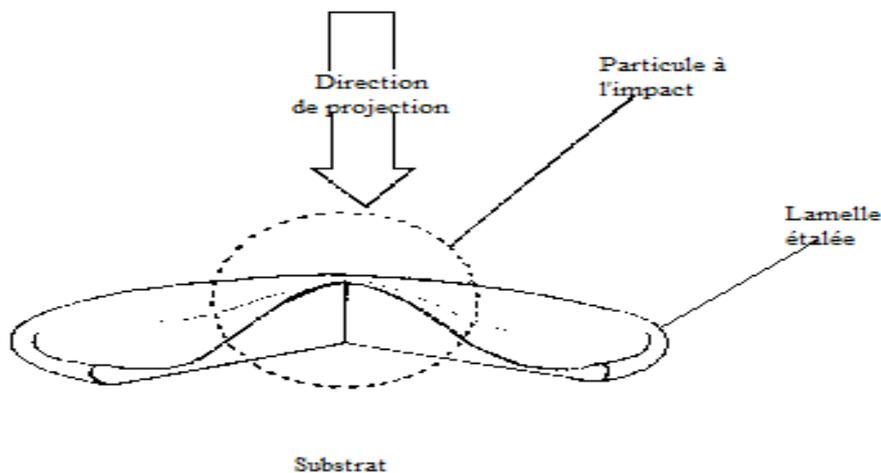


Figure I.9 : Schéma d'écrasement de la particule [13].

L'étalement des particules est un phénomène complexe qui dépend de nombreux paramètres liés à la particule (morphologie, vitesse, température....) et à l'état de surface du substrat ou du dépôt pendant la projection (matériau, rugosité, température,...). Plusieurs études ont essayé de qualifier l'étalement des particules. Elles ont défini par exemple la morphologie des lamelles en fonction des conditions de projection [14].

Plusieurs études expérimentales ont été effectuées (98% sur les surfaces lisses) pour comprendre l'influence des propriétés des particules à l'impact sur leur écrasement et la formation des splats. D'autres travaux ont été réalisés pour examiner les effets de la température, de la rugosité et des propriétés thermiques du substrat sur l'étalement et la solidification des particules. L'effet de la mouillabilité de la particule sur le substrat a été aussi

évalué. Il faut noter que la mouillabilité dépend de la rugosité et de la porosité de substrat ainsi que de la composition chimiques et de l'état cristallin des particules et du substrat [12].

La solidification des lamelles (une étape de l'ordre de quelques microsecondes) dépend du flux de chaleur des particules vers le substrat. Ce dernier est lié au contact ou à la résistance de contact entre la lamelle et le substrat. Il dépend également des propriétés thermiques du substrat et de la particule étalée. Le contact effectif lamelle-substrat varie avec la quantité des condensats et adsorbats à la surface, la porosité et la rugosité de la surface. Le refroidissement rapide de lamelle étalée favorise la nucléation hétérogène [12].

I.3.2 Structure générale des revêtements réalisés par projection thermique [15]

Les revêtements thermiquement réalisés ont une caractéristique commune qui est la structure, lenticulaire ou lamellaire de leurs grains. Cette dernière résulte de la rapidité de solidification des petites particules ou globules aplaties, entrant en impact avec la surface froide du substrat. La projection thermique utilise de de l'air à une grande proportion pour pulvériser le métal fondu, cette opération donne lieu à des interactions chimiques, en particulier l'oxydation des particules et donc la création d'une coquille d'oxyde sur la surface cible.

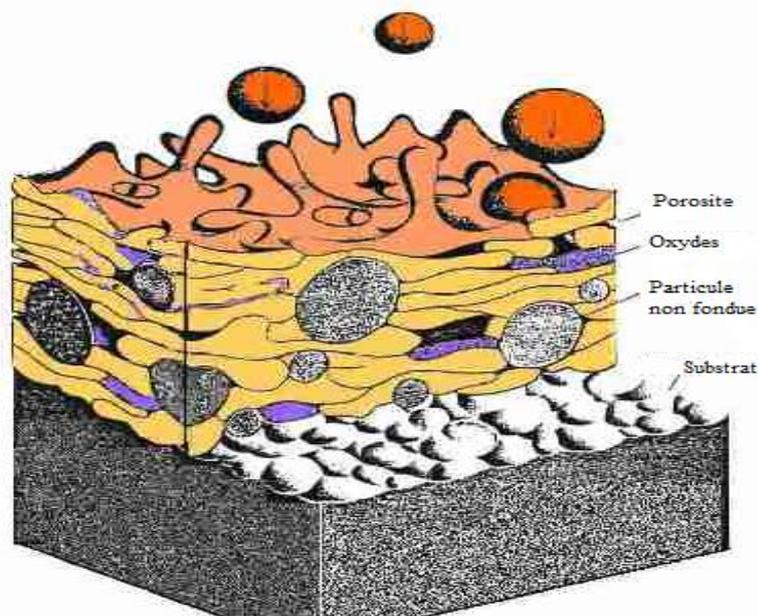


Figure I.10 : Schéma de principe de formation d'un dépôt élaboré par la projection thermique [13].

Les revêtements sont caractérisés par plusieurs facteurs : la structure métallurgique, oxydes, la densité, la dureté et adhérence des dépôts.

I.3.2.1 Structure métallurgique [12]

Les dépôts sont généralement stratifiés s'ils ne sont pas traités postérieurement. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1% à 25% suivant les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules infondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur).

En raison de la très grande vitesse de refroidissement des particules au contact du substrat, leur structure métallurgique est du type trempée, généralement à phase unique. Ceci permet d'expliquer que la structure d'origine du matériau peut se trouver modifiée après dépôt.

I.3.2.2 Oxydes

Dans la projection thermique, l'oxygène pompé est en combustion totale tandis que l'oxygène de l'air combiné aux hautes températures rencontrées dans le transfert des particules liquides, peut donner naissance à des réactions d'oxydation avec les particules réactives [14]. La formation de couches d'oxydes entre le dépôt et le substrat, elles sont généralement beaucoup plus dures que le métal dans lequel elles sont incluses [15].

I.3.2.3 La densité [16]

Les dépôts projetés à chaud dans l'air sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Pour les dépôts métalliques, cette densité est également fonction de taux d'oxydes formés pendant la projection.

I.3.2.4 Adhérence [12]

Les revêtements adhèrent au substrat par un phénomène mécanique. Suivant les procédés et les matériaux, l'adhérence varie de 20 à 115 Mpa. Dans les cas où elle s'avère insuffisante (cas des projections d'oxydes par exemple), on utilise des sous-couches d'accrochage.

Plusieurs mécanismes interviennent sur l'adhérence du dépôt au substrat tel que la diffusion, la réaction chimique, des forces électrostatiques, l'accrochage mécanique, etc.

I.3.2.5 Dureté

La dureté est la faculté de résistance qu'offre un corps à sa pénétration par un autre corps. Elle est caractérisée par un nombre qui dépend du genre d'essai exécuté (essai à la bille Brinell, essai de dureté à la bille basés sur la méthode de comparaison, essai de dureté Vickers, essai de dureté Rockwell, etc...) [12]. Les matériaux projetés thermiquement sont constitués de particules juxtaposées, liées entre elles. Ceci se traduit en générale par une dureté, elle est généralement

influencée par le degré de cohésion entre particules, les duretés intrinsèques des particules, le taux de porosité et les inclusions d'oxydes. L'impact des particules suivantes sur température d'un acier projeté à 1500°C, chute rapidement à 100°C [15].

I.3.3 Préparation de surface

La préparation de surface est une étape que l'on peut qualifier de très importante pour réussir une bonne adhésion du revêtement sur la surface de la pièce dans la projection thermique.

I.3.3.1 Dégraissage

Le dégraissage est à la base de tous les traitements de surface. Son objectif est d'éliminer les matières grasses et également les poussières et autres agents formant une couche intermédiaire de faible cohésion [17]. Le dégraissage s'effectue soit par dissolution en milieu de solvants organique, soit par saponification (donc en milieu alcalin).

Dans la plupart des cas, on aura recours à une élévation de température suffisante pour ramollir la souillure grasse. De même un effet mécanique (jet, brosses, ultrasons, bulles de gaz émis par électrolyse) est souvent nécessaire. Suivant les besoins, le dégraissage sera plus ou moins profond. Pour un dégraissage très poussé, il convient de faire suivre le dégraissage chimique d'un électrolytique (dont l'action ne saurait se résumer à l'action des bulles) [15]

I.3.3.2 Décapage [14].

Le nom générique du décapage regroupe les procédés éliminant les couches d'oxydes anhydres formée en haute température alors que le dérouillage concerne les oxydes hydratés de la corrosion naturelle. Les méthodes de décapage sont chimiques, électrochimique, mécanique ou thermique. Les méthodes chimique et électrochimique utilisent des solutions agressives acides ou alcalines ou encore des oxydants forts. Dans la plupart des cas une mauvaise préparation de surface est l'origine d'un traitement de surface défaillant. La qualité d'une préparation est une notion relative selon les utilisations, ni les éléments gênant ni leur teneur limite ne sont les mêmes.

I.3.3.3 Le sablage [17]

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, SiO₂) 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.

I.3.3.4 Préchauffage [18]

Le préchauffage des surfaces est un moyen d'amélioration des propriétés interfaciales. L'augmentation de température peut se faire avec une flamme qui, appliquée à l'arrière de l'échantillon (lorsque cela est possible), permet d'éviter toute détérioration de la surface (dépôts possibles de suies et de produits de combustion). Il est également possible d'utiliser des résistances chauffantes pour augmenter la température de la surface. Le fait de chauffer l'arrière de la cible permet un contrôle de la température par pyrométrie plus aisé. Le préchauffage se fait alors, le plus généralement, grâce à la torche de projection. Celle-ci effectue des passages successifs devant la surface sans projeter de matière ce qui permet d'augmenter la température du substrat. Cependant avec ces dispositifs de préchauffage, le contrôle de la zone traitée est délicat.

I.3.4 Paramètre de projection influence sur le dépôt [14] :

- ✓ **Débit des gaz** : Un excès d'oxygène (flamme oxydant) augmente l'oxydation du dépôt, donc sa dureté et réduit sa résistance mécanique. Le dépôt devient fragile et difficile à usiner. Un excès du taux d'acétylène (flamme Carbone) entraîne un charbonnage du revêtement. Dans les deux cas, on note l'usure prématurée des buses.
- ✓ **Pression du gaz** : Une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal donc tous les consommations (dissipation d'énergie).
- ✓ **Diamètre du fil et du cordon** : Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente les grains du dépôt et les pertes.
- ✓ **Vitesse du fil ou du cordon** : Trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur du grain, trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.
- ✓ **Pression de l'aire** : (air comprimé vecteur de la projection). Son accroissement diminue la grosseur du grain mais augmente l'oxydation du dépôt.
- ✓ **Distance de projection** : Trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence et surchauffe du dépôt. Trop grande, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence.
- ✓ **Angle de projection** : En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.

- ✓ **Vitesse de balayage** : Trop rapide, elle augmente les pertes de métal et donne des épaisseurs de dépôt trop minces. Trop lente, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulier et élevé la température du support.
- ✓ **Vitesse de rotation** : Trop rapide, elle entraîne un rebondissement des particules et une pollution du dépôt. Trop lente, elle entraîne une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.
- ✓ **Refroidissement** : Trop rapide, il génère le délaminage des couches. Trop lente, il entraîne une surchauffe et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt.

I.3.5 Généralité sur le fer [19]

Le fer est un élément chimique, de symbole Fe et de numéro atomique 26. C'est le métal de transition et le matériau ferromagnétique le plus courant dans la vie quotidienne, sous forme pure ou d'alliages. Le fer pur est un métal mou (davantage encore que l'aluminium), mais l'adjonction de faibles quantités d'éléments d'additions (quelques pourcents) le rend considérablement plus dur. Allié au carbone et avec d'autres éléments d'additions, il forme les aciers dont certains peuvent être mille fois plus durs que le fer pur.

I.3.5.1 Propriétés physico-chimiques du fer [20]

Point de fusion : $\theta_f = 1\,538^\circ\text{C}$

Structure cristalline : CC (ferrite δ) entre $\theta_f = 1\,538^\circ\text{C}$ et $1\,394^\circ\text{C}$

CFC (austénite γ) entre $1\,394^\circ\text{C}$ et 912°C

CC (ferrite α) entre 912°C et l'ambiante

Masse volumique : $\rho = 7\,870\text{ kg/m}^3$

Conductivité thermique : $\lambda = 30$ à $75\text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$

Coefficient de dilatation linéique

(fer α à 20°C) : $\alpha = 12,6 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$

Résistivité électrique : $\rho = 0,104\ \mu\Omega \cdot \text{m}$

Caractéristiques mécaniques à 20°C (fer α pur) :

$R_m = 180$ à 290 MPa

$R_e = 100$ à 170 MPa

$A\% = 40$ à 50%

$E = 210\,000\text{ MPa}$

I.3.5.2 Les alliages de fer [21]

Les alliages à base de fer, à de rares exceptions près, contiennent tous du carbone comme élément d'alliage et en proportions diverses. Ainsi, les aciers titrent moins de 2 % de carbone ; les fontes, au contraire, contiennent plus de 2 % de carbone. Dans ces deux cas peuvent être ajoutés d'autres éléments d'alliage en quantités très diverses, sous réserve que l'élément fer reste le plus important. Dans ce figure ci-dessus résumé les alliages de fer.

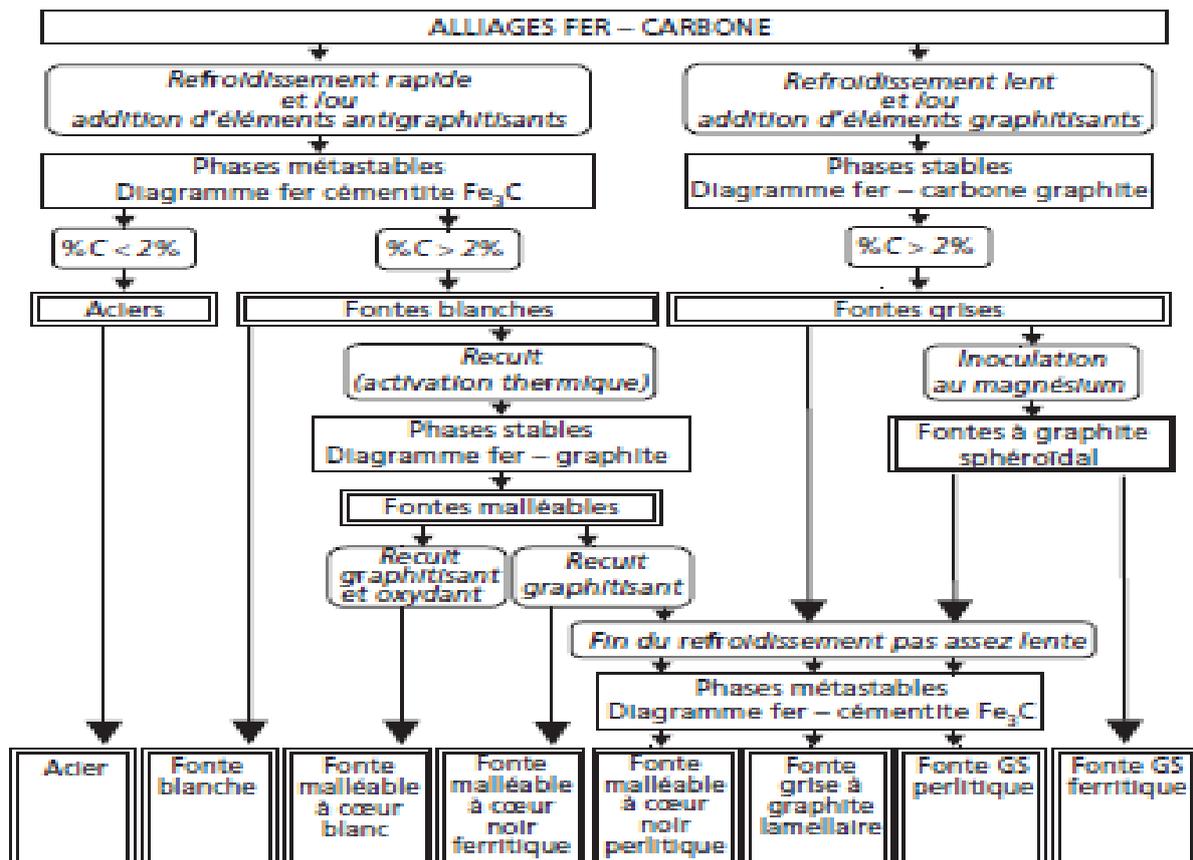


Figure I.11 : schéma représenté les alliages de fer [21].

I.3.5.3 Diagramme fer carbone [22]

Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présence section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles. La figure I.12 présente les températures importantes pour l'acier et la fonte. Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région.

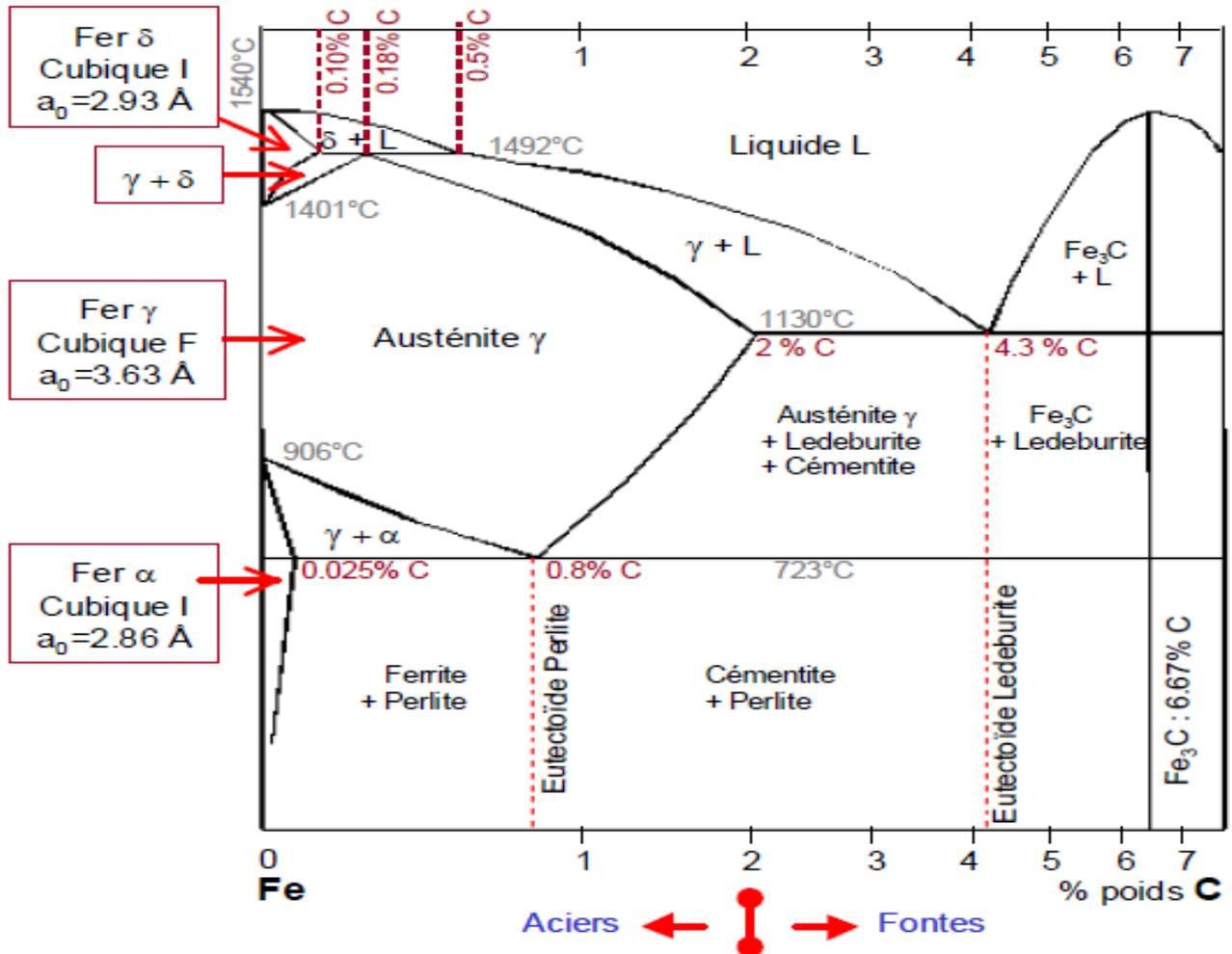


Figure I.12 : diagramme fer-carbone [22].

I.3.5.4 Domaines d'utilisations [19]

Le fer est largement utilisé dans la technologie et l'industrie généralement sous forme d'acier. On le trouve dans la construction métallique (sous forme de barres dans les charpentes ou d'armatures dans le béton armé), dans l'outillage, dans la construction automobile (carrosserie de voiture), dans l'emballage (boîtes de conserve, canettes) et il est aussi utilisé en électronique pour fixer les informations analogiques sur des supports appropriés (bande magnétique, cassette audio et vidéo).

I.2 Généralités sur le phénomène de corrosion :

I.2.1.1 Définition de la corrosion :

La corrosion est la destruction chimique ou électrochimique des matériaux métalliques par leur environnement. C'est, en fait, le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance à revenir à leur état naturel d'oxyde, sulfate, carbonate ... plus stable par rapport au milieu corrosif, et ainsi

à subir une dégradation de leurs propriétés. On pourrait en conclure que la corrosion étant la manifestation de l'affinité chimique des métaux pour certains éléments constitue une branche de la chimie. Malheureusement ce concept purement chimique ne permet pas d'interpréter bien des phénomènes de corrosion qui font intervenir un certain nombre de facteurs présentant un caractère chimique, électrochimique, métallurgique, mécanique, et agissant souvent simultanément [23].

Le norme IOS 8044 (1999) définit la corrosion d'un métal comme « une interaction physico-chimique entre le métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique. Cette interaction est généralement de nature électrochimique ». [24] Quelle que soit la définition adoptée, le résultat est même : il conduit soit à la réparation, soit au remplacement de la structure endommagée.

La plupart des matériaux sont susceptibles de se détériorer dans certaines conditions : par exemple la plastiques gonflent sous l'effet de certains solvants, le bois pourrit, le granit s'érode, les métaux et alliages métalliques s'oxydent, passent en solution par dissolution d'atomes de leur surface ou se fissurent par sous l'effet d'une attaque combinée d'une tension mécanique et d'une dissolution localisée.

On voit donc que le terme corrosion est beaucoup plus général que celui de rouille qui est réservé exclusivement à la corrosion du fer et des aciers peu alliés, corrosion qui se traduit surtout par la formation d'oxyde ferrique [24].

I.2.1.2 Facteurs de la corrosion :

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux.

Tableau I.2 : Les principaux facteurs de la corrosion [25].

Facteurs du milieu Corrosif	Facteurs Métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-Concentration de réactif -Teneur en oxygène -pH du milieu -Température -Pression -Présence de bactéries	-Composition de l'alliage -Procédé d'élaboration -Impuretés -Traitement thermique -Traitement mécanique	-Etat de surface -Forme des pièces -Emploi d'inhibiteur -Procédés d'assemblage	-Vieillessement -Tension mécaniques -Modification des revêtement protecteurs.

I.2.1.3 Processus de la corrosion :

Suivant la nature du milieu environnant et de la température, la corrosion est dite sèche ou humide. Dans le premier cas, il est constitué par une réaction entre le métal et une phase gazeuse ou liquide. La température est très élevée. Dans le second cas, le milieu est constitué par un liquide généralement électrolytique. La température est modérée.

La distinction peut être faite entre trois processus ;

- ✓ Corrosion sèche ou corrosion chimique.
- ✓ Corrosion en milieu humide ou corrosion aqueuse.

I.3.1.3.1 La corrosion sèche :

À température élevée, par contre, sous conditions de corrosion sèche, les cations et les anions diffusent plus facilement à travers un film compact. Le film croît progressivement, avec une vitesse égale à la vitesse de corrosion. La figure I.13 ci-dessous schématise la réaction d'un métal avec l'oxygène, dans cette situation, le métal s'oxyde à l'interface métal-oxyde et les cations diffusent vers l'extérieur du film.

À la surface extérieure, l'oxygène se réduit en anions O_2^- qui diffusent vers l'interface métal-oxyde. Les électrons libérés à l'interface métal-oxyde doivent traverser le film d'oxyde avant de réagir à la surface extérieure. On peut considérer la surface extérieure du film comme cathode, la surface intérieure comme anode. Contrairement aux piles électrochimiques classiques, l'oxyde est ici simultanément électrolyte et conducteur électronique [26].

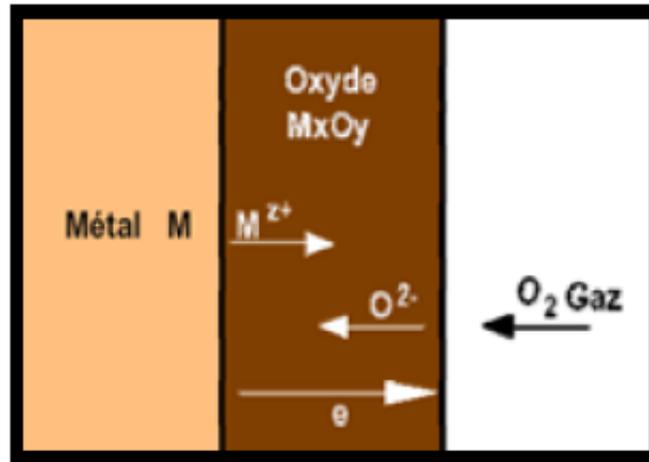


Figure I.13 : Schéma de principe de la corrosion sèche [26].

I.2.1.3.2 La corrosion humide :

La corrosion humide, appelée encore corrosion électrochimique, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. Se produit lorsqu'il existe des hétérogénéités, soit dans le métal, soit dans la solution corrosive. Ces hétérogénéités déterminent la formation à la surface du métal de micro-anodes et de micro-cathodes qui constituent des micropiles. Un courant électrique circule entre les électrodes. Les zones appelées anodes sont attaquées et les zones appelées cathodes sont le siège d'une ou plusieurs réactions de réduction. Nous reviendrons plus loin sur ce type de corrosion dont l'importance est prédominante dans l'industrie laitière [23].

La corrosion humide fonctionne comme une pile électrochimique et doit donc réunir simultanément quatre facteurs pour pouvoir se déclencher :

- ✓ **Une anode** : c'est la partie du métal où se développe la réaction d'oxydation entraînant une dissolution de cette partie sous forme de cations positifs dans le milieu aqueux,
- ✓ **Une cathode** : c'est la partie du métal où se développe la réaction de réduction d'une espèce contenue dans l'électrolyte (dégagement d'hydrogène par réduction d'ions H^+ , formation d'eau par réduction de l'oxygène en milieu acide, formation d'ions OH^- par réduction de l'oxygène en milieu basique, dépôt d'un métal par réduction d'un de ses cations...),
- ✓ **Un conducteur électrique** : qui puisse véhiculer les électrons libérés de l'anode vers la cathode. Ce rôle est assuré par le métal lui-même,
- ✓ **Un conducteur ionique** : qui puisse permettre la migration des cations libérés de l'anode vers les anions libérés à la cathode pour assurer la neutralité électrique et

I.2.1.4 Les formes de la corrosion :

Le processus de la corrosion des métaux prend quelques nombreux de formes, qui sont classées principalement selon la forme qui se manifeste à la surface corrodé.

I.2.1.4.1 Corrosion uniforme (généralisée) :

On parle de corrosion uniforme lorsque toute la surface du métal en contact avec la solution est attaquée de la même façon Elle se traduit par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent agressif [28].

Cette forme de corrosion du matériau se développe dans les milieux acides ou alcalins.

I.2.1.4.2 Corrosion localisé :

Ce phénomène survient au contraire lorsque le matériau est mis en présence d'un environnement présentant vis à vis de lui un comportement sélectif.

Ce mode de corrosion est le mode le plus fréquent et le plus ennuyeux car il vise uniquement certaines zones bien distingués du matériau, on distingue plusieurs types, à savoir :

a) La corrosion galvanique (bimétallique) :

La corrosion galvanique ou bimétallique peut se définir simplement par l'effet résultant du contact de deux métaux ou alliages différents dans un environnement corrosif conducteur. Ce contact conduit à la formation d'une pile électrochimique entre les deux métaux ou alliage. Le métal le moins résistant, moins noble, se dégrade et sa dégradation s'intensifie avec le temps [29].

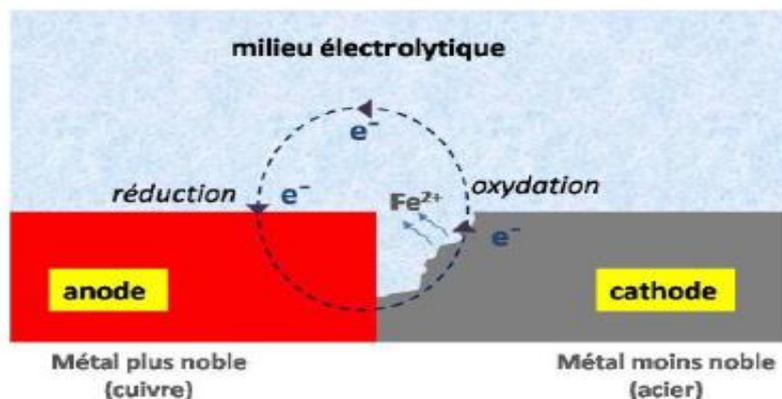


Figure I.15 : Corrosion galvanique résultante d'un assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé [29].

Ce type de corrosion est important pour l'aluminium, étant donné sa position du point de vue de potentiel : en effet parmi les métaux courant, seul le magnésium et le zinc sont plus sont plus

anodiques et assurent donc sa protection. Les assemblages les plus dangereux sont ceux effectués avec le graphite, les aciers doux, les alliages cuivreux.

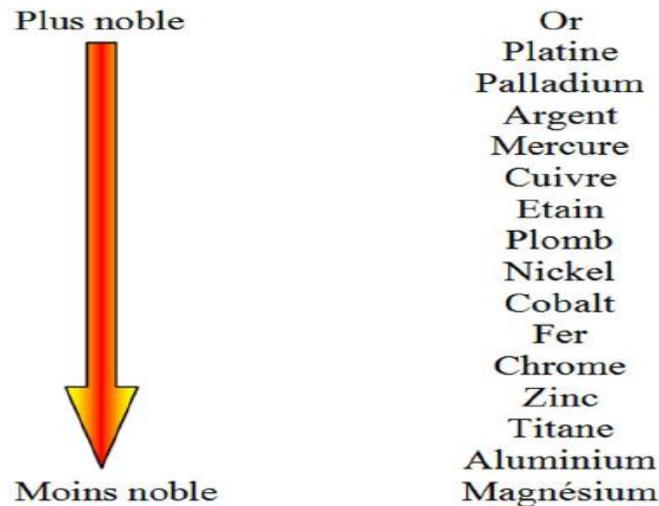


Figure I.16 : Echelle galvanique de quelques métaux du plus noble au moins noble [30].

b) Corrosion par piqûre :

Elle se produit quand les métaux protégés par un film d'oxyde mince comme l'aluminium et ses alliages et les aciers inoxydables sont mis en contact avec un milieu aqueux (pour un pH voisin de la neutralité) contenant les halogénures, notamment le chlorure Cl^- . La quantité de métal corrodé est très faible telle que, elle introduit des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre à l'intérieur du matériau à partir d'une ouverture de faible surface [31].

On distingue deux étapes dans le processus de corrosion par piqûre, l'amorçage qui se produit lors de la rupture locale de la passivité et la croissance ou propagation

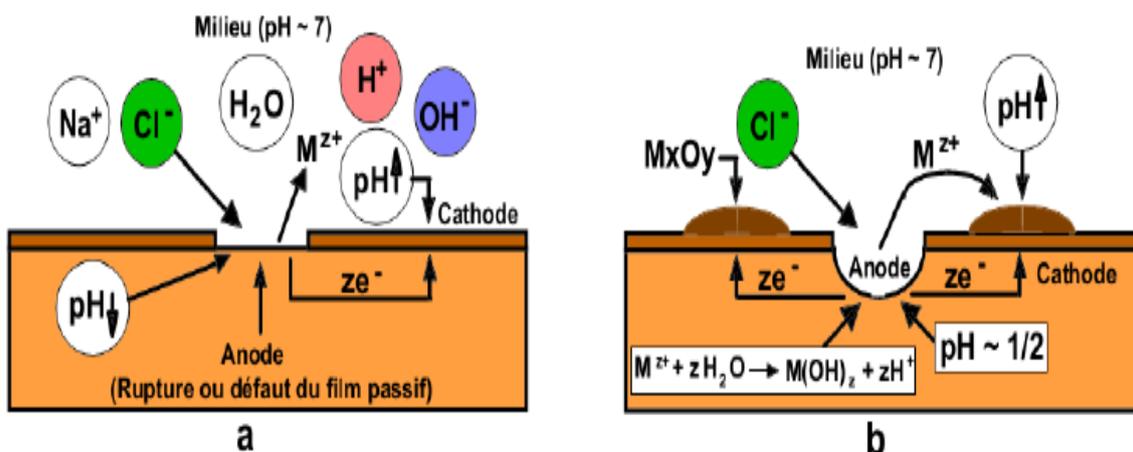


Figure I.17 : Amorçage (a) et propagation (b) d'une piqûre [32].

c) La corrosion sélective :

Comme son nom l'indique, ce mode de corrosion se traduit par la dissolution sélective de l'un des éléments de l'alliage si celui-ci est homogène, ou de l'une des phases si l'alliage est polyphasé, conduisant ainsi à la formation d'une structure métallique poreuse.

La dézincification (dissolution sélective du zinc) dans un laiton est l'exemple le plus connu [29].

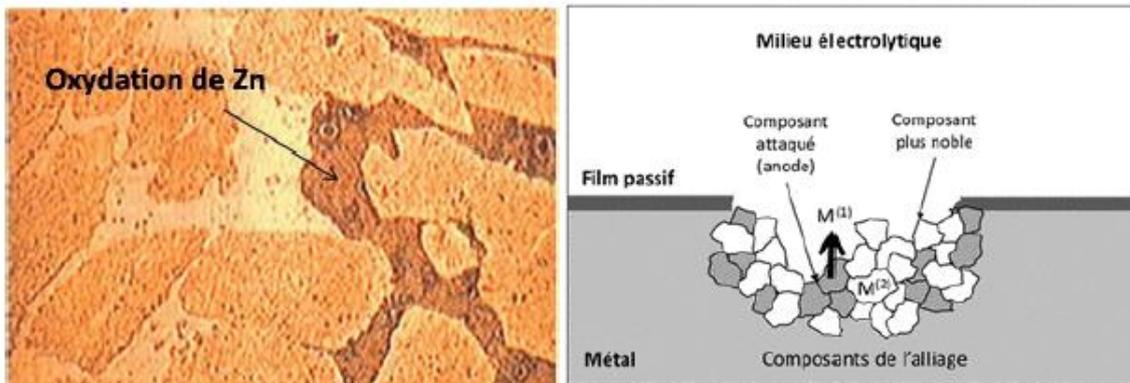


Figure I.18 : Schéma de principe Mécanisme de la corrosion sélective d'un laiton (alliage cuivre-zinc) [29].

d) La corrosion intergranulaire

Est une attaque sélective aux joints de grains ou à leur voisinage immédiat, alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. L'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques. Cette forme de corrosion est due soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants ou bien à la précipitation des phases et combinaisons chimiques lors d'un traitement thermique (martensite, carbures, etc.) [29].

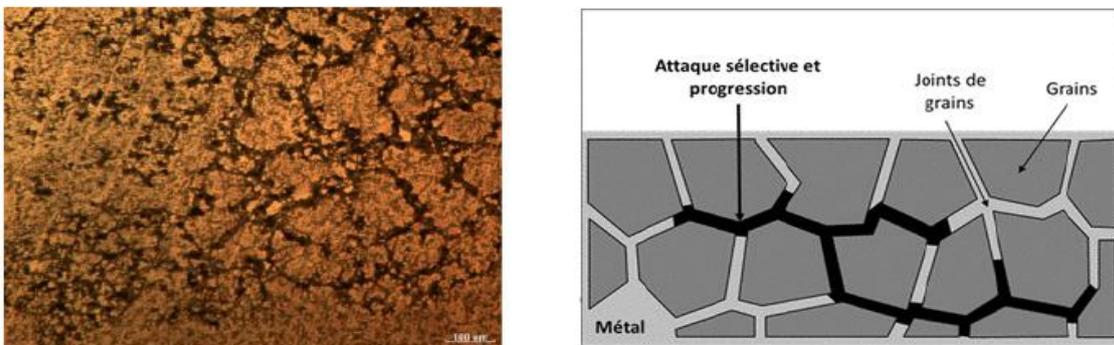


Figure I.19 : Schéma principale de la corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique [29].

d) La corrosion érosion :

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a lieu, souvent, sur des métaux exposés à un écoulement rapide d'un fluide (air, eau, etc.). La plupart des métaux et alliages y sont sensibles, en particulier les métaux mous (cuivre, plomb, etc.) ou ceux dont la résistance à la corrosion dépend de l'existence d'un film superficiel (aluminium, aciers inoxydables) [29].

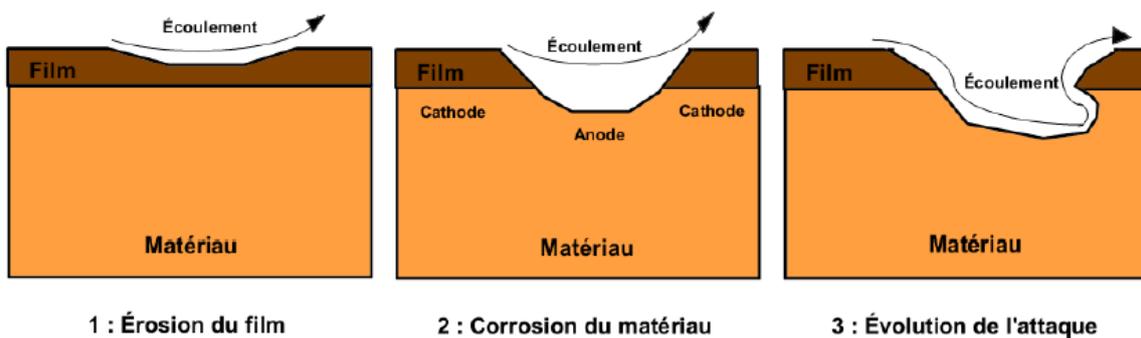


Figure I.20 : Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion [32].

e) Corrosion sous contrainte :

Ce type de corrosion se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à rupture complète de la pièce " sous l'action combinée d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif. Ces fissures sont de type intergranulaire ou transgranulaire et plus rarement de type mixte [33].

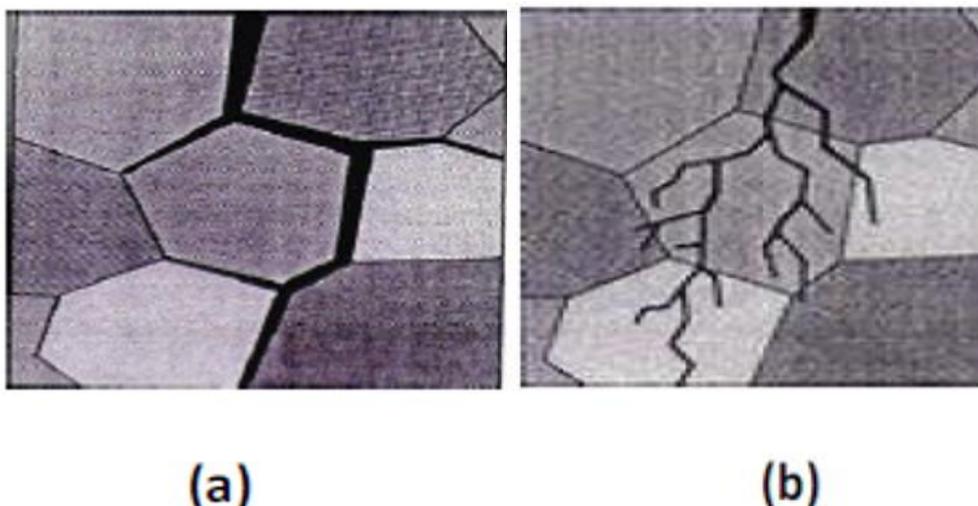


Figure I.21 : Fissuration sous contrainte ; fissure intergranulaire (a), fissure transgranulaire (b) [33].

f) La corrosion caverneuse (par crevasse) :

Cette forme d'attaque est généralement associée à la présence de petits volumes de solution électrolytique stagnante dans des interstices, sous des dépôts et des joints, ou dans des cavernes ou crevasses, par exemple sous les écrous et têtes de rivets. Le sable, la poussière, le tartre. Ce phénomène concerne tous les matériaux. C'est aussi le cas des joints en matériau souple, poreux ou fibreux (bois, plastique, caoutchouc, ciment, amiante, tissus, etc.) [29].

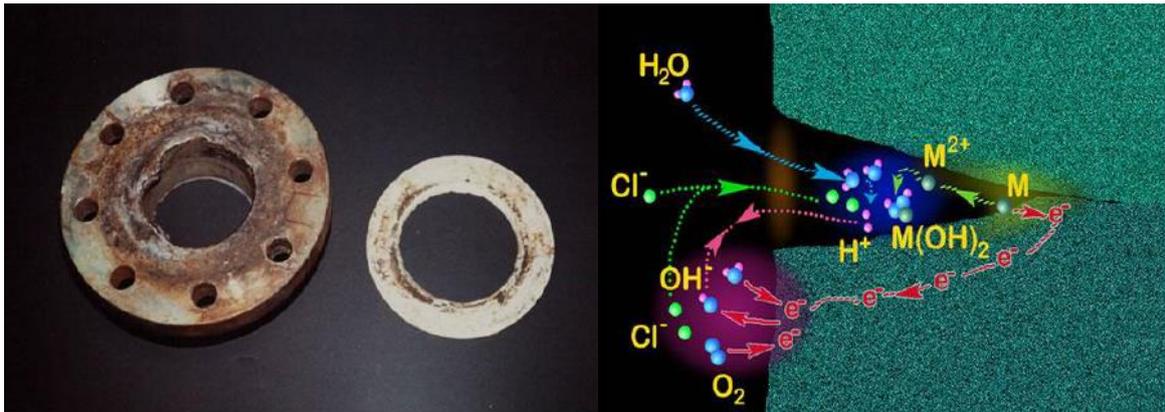


Figure 1.22 : Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse [29].

g) La fragilisation par l'hydrogène :

C'est la corrosion sous contrainte, par la propagation rapide de fissures. Bien que plusieurs mécanismes puissent être évoqués, la fragilisation est liée à la pénétration d'hydrogène dans la matrice métallique par diffusion à l'état atomique. L'hydrogène ainsi inséré dans le réseau pourrait fragiliser le matériau en rendant le mouvement des dislocations plus difficile, ou encore en diminuant l'énergie de cohésion entre les atomes [32].

I.2.2 Corrosion en milieu marin

L'eau de mer couvre plus de 70% de la surface de la terre, elle est riche en ressource naturelle mais constitue aussi un environnement très agressif vis-à-vis de nombreux métaux, en particulier les aciers et les alliages. Les exemples de structures métalliques soumis aux conditions marines ne manquent pas (plate-forme d'exploitation des ressources naturelles, bateaux, pipelines, circuit de refroidissement...) [34].

I.2.2.1 Propriétés de l'eau de mer :

a) Composition chimique [35]

L'eau de mer est un milieu très complexe contenant de nombreux éléments en solution, dont les majeurs (en plus forte concentration) sont répertoriés dans le tableau (I.3), les autres

éléments mineurs sont sous forme dissoute, colloïdale ou en suspension (dont les animaux, végétaux ou leurs résidus), minérale ou organique et de gaz dissous.

Tableau I.3 : Teneur en éléments les plus abondants dans l'eau de mer [24].

Ion	Teneur (g/kg)	Ion	Teneur (g/kg)	Ion	Teneur (g/kg)
Cl ⁻	19,354	Ca ⁺²	0,412	Sr ⁺²	0,008
Na ⁺	10,77	K ⁺	0,399	H ₃ BO ₄	0,0257
So ₄ ⁻²	2,712	HCO ₃ ⁻	0,140	F ⁻	0,0013
Mg ⁺²	1,290	Br ⁻	0,067		

b) La salinité [35] :

La salinité est définie par la masse totale en gramme de sels inorganiques contenus dans un kilogramme d'eau de mer, les carbonates étant remplacés par des oxydes, les bromures et les iodures par leurs équivalents en chlorures et les matières organiques étant oxydées. Elle peut varier selon les zones géographiques et les saisons.

L'agressivité du milieu marin est due à l'abondance de Cl⁻, principalement présent sous forme de NaCl et de MgCl₂.

c) Concentration en dioxygène dissous :

Dans l'eau de mer aérée, la concentration en oxygène dissous est très variable puisqu'elle dépend des facteurs physiques, chimiques et biologiques suivants [36] : 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 par les organismes aquatiques, la production par la photosynthèse [37].

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 $2,8 \cdot 10^{-4}$ mol.l⁻¹ à 20°C en eau pure alors qu'elle est réduite à $2,3 \cdot 10^{-4}$.mol.l⁻¹, à 20°C pour une salinité de 35‰. En général, la concentration en oxygène dissous est comprise entre 0 et $5 \cdot 10^{-3}$ mol.l⁻¹ [38].

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 [38].

d) 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 [38].

e) 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 (Figure I.24) [39].

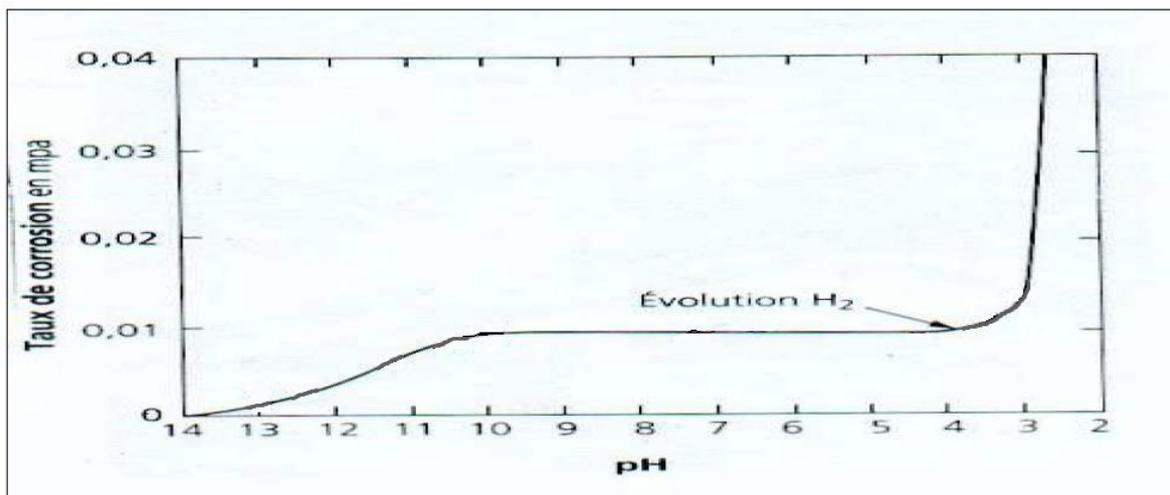


Figure I.24 : influence du pH sur le taux de corrosion [40].

I-2-2-2 Différentes zones du milieu marin [35,41] :

Le comportement à la corrosion des matériaux peut varier considérablement en fonction de leur condition d'exposition : zone atmosphérique, des éclaboussures, de marnages, immergés et des sédiments. Dans ces différentes zones, on peut observer des vitesses de corrosion très variables. A titre d'exemple, la figure (I.25) représente la perte relative d'épaisseur pour un acier au carbone d'une structure portuaire dans les différentes zones.

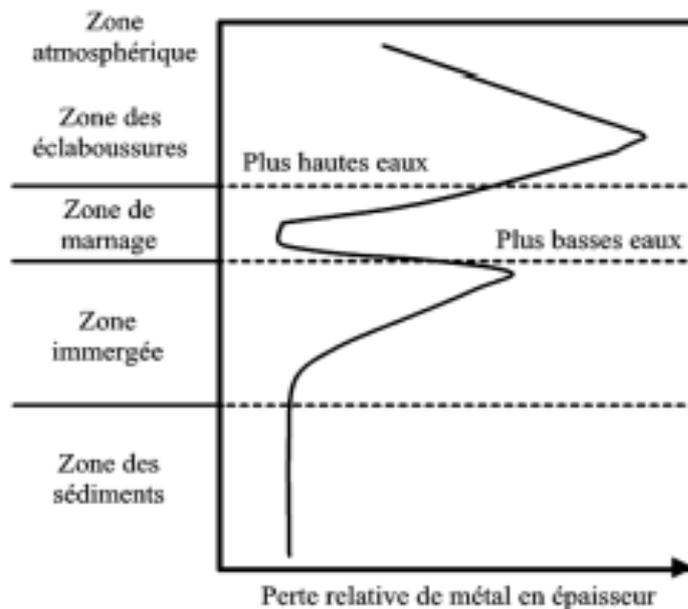


Figure I.25 : Vitesses de corrosion de palplanches en eau de mer dans différentes zones [35].

a) Zone atmosphérique :

La zone atmosphérique correspond à la partie de l'atmosphère où des particules d'origine marine peuvent être présentes. Toutes les parties émergées d'un ouvrage sont en contact avec cette atmosphère. La corrosion y est aggravée par la présence de sels dans la vapeur d'eau. Ces sels, chlorures de calcium et de magnésium principalement, peuvent se déposer sur la surface métallique ; étant hygroscopique, ils vont retenir l'humidité et former un mince film d'électrolyte et favoriser les mécanismes de corrosion.

b) Zone des éclaboussures :

La zone des éclaboussures correspond pour les ouvrages fixes en mer à la zone immédiatement au-dessus des marées les plus hautes. Pour un grand nombre de matériaux ne formant pas de films passifs adhérents, en particulier les aciers au carbone ou aciers faiblement alliés, cette zone est particulièrement sensible à la corrosion du fait de l'effet mécanique des vagues et du vent associé au contact d'une eau de mer oxygénée ; les revêtements ne résistent que difficilement à une telle agression.

c) La zone de marnage :

Est comprise entre le niveau de l'eau à marée basse et le niveau de l'eau à marée haute. Le métal se trouve donc alternativement immergé et émergé.

d) La zone immergée :

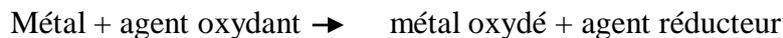
La zone d'immersion concerne la mer à proprement parler. La corrosivité dépend des caractéristiques de l'eau de mer. Les salissures marines modifient les conditions de surface.

e) La zone des sédiments :

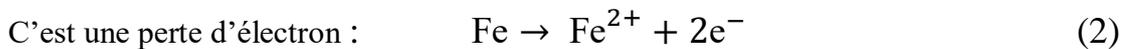
La zone des sédiments correspond aux parties enfouies ; cet environnement est très complexe. En général, elle est caractérisée par une concentration en dioxygène faible avec la possibilité de développements bactériens du type bactéries sulfato-réductrices.

I.2.3 Corrosion électrochimique [32] :

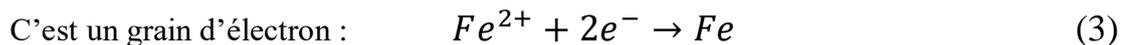
La corrosion électrochimique (humide) est le mode de corrosion le plus fréquent. Elle est due à une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant.



✓ Oxydation :



✓ Réduction :



✓ Oxydant (Ox) :

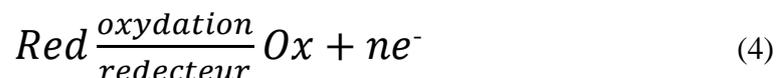
Réactif capable de provoquer une oxydation. C'est donc une espèce (atome, ion ou molécule) capable de fixer des e^{-} .

✓ Réducteurs (Red) :

Réactif capable de provoquer une réduction. C'est donc une espèce capable de céder des e^{-} .

✓ Réaction d'oxydoréduction (Redox) :

Sur la base des définitions précédentes, une réaction entre un agent oxydant et un agent réducteur consiste en un échange d' e^{-} cédés par le réducteur à l'oxydant.



L'oxydant et le réducteur constituent le couple « Ox/Red »

Ox : Oxydant, c'est la forme oxydée du couple Ox/Red,

Red : Réducteur, c'est la forme réduite du couple Ox/Red.

Les réactions d'oxydoréduction correspondent à un transfert d'électron, ce sont des réactions électrochimiques.

I.2.3.1 Thermodynamique électrochimique [42] :

L'état métallique n'est pas thermodynamiquement stable, dans des conditions naturelles d'utilisation, contrairement aux oxydes de fer Fe_2O_3 qui sont thermodynamiquement plus stables que le métal Fe. Le risque de corrosion est donc « naturel ». Le processus de corrosion aqueuse est un processus électrochimique car il se traduit par une réaction à laquelle des espèces chimiques et des charges électriques prennent part. Il est à la fois réaction chimique et transfert d'électrons (figure I.26). La corrosion électrochimique résulte de l'établissement de courants locaux dus à l'existence de piles locales, la réduction cathodique et l'oxydation anodique étant localisées en deux zones distinctes.

La corrosion correspond à la formation, à partir de l'état métallique, d'ions passant en solution donc à une oxydation. Le plus souvent, un ion en solution est identique à celui existant dans la phase métallique :

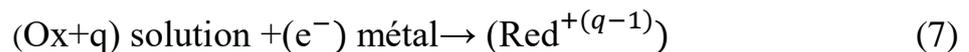


A température ambiante, la corrosion des matériaux métalliques est exclusivement due à l'eau, même si d'autres facteurs peuvent intervenir.

La réaction anodique correspond à la dissolution du fer.



La réaction (4) est nécessairement couplée avec une réaction de réduction dite réaction cathodique, éliminant les électrons produits :



Les oxydants les plus communs sont :

- ✓ la molécule d'eau selon la réaction



- ✓ les ions H^+ par



- ✓ l'oxygène dissous par



Ou par :

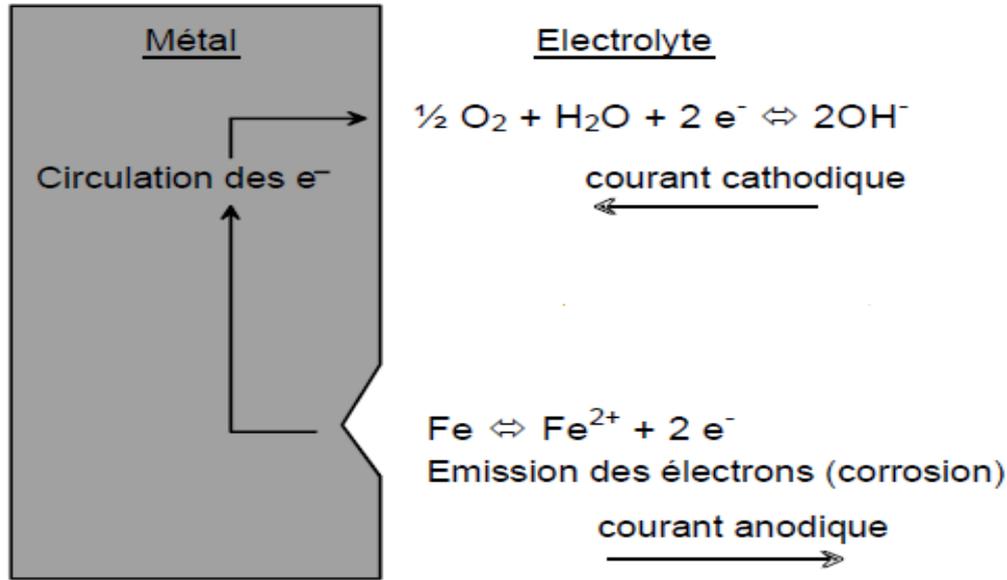
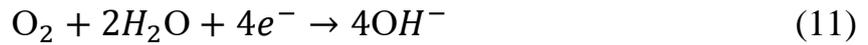
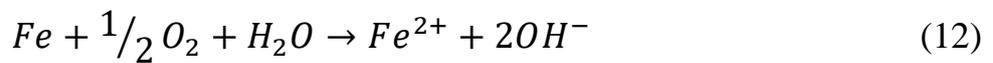


Figure I.26 : corrosion métallique du fer dans une eau neutre aérée [43].

Le processus électrochimique peut s'écrire sous la forme suivante :



Les produits de réactions anodiques et cathodiques peuvent parfois réagir :



I.2.3.2 Droite de Tafel [31,44] :

On constate expérimentalement que le courant croît avec la surtension :

$$\eta = a + b \ln i \quad (14)$$

Cette loi est connue sous le nom de loi de Tafel (1905). a et b sont des paramètres caractéristiques de la réaction et de l'électrode.

Le tracé des courbes de polarisation $i = f(E)$ sous forme linéaire dans un domaine anodique et cathodique limité, appelé domaine de Tafel. Le tracé de ces courbes en coordonnées semi-logarithmiques, pour des surtensions $\eta \geq |100|$ mV.

La figure (I.27) représente l'évolution des densités de courant j , j_a et j_c en fonction du potentiel E

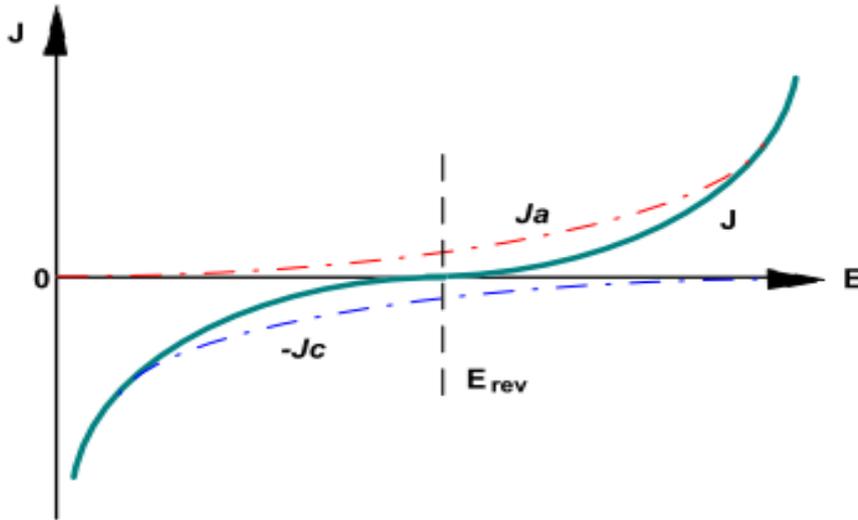


Figure I.27 : Evolution des densités de courant en fonction du potentiel [44].

Pour les valeurs de η plus importantes j_a ou j_c dominant, on montre alors très facilement,

$$j = j_0 \exp\left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT}\right) \quad (15)$$

Ce qui est strictement équivalent à :

$$\ln(j) = \ln(j_0) + \frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT} \quad (16)$$

D'où :

$$\eta = -\frac{\ln(j).RT}{\alpha nF} + \frac{\ln(j_0).RT}{\alpha nF} \quad (17)$$

Ce qui permet d'après la relation (16) de donner aux paramètres a et b de l'équation de Tafel.

La signification physique suivante :

$$a = \frac{\ln(j_0).RT}{(1-\alpha)nF} \quad (18)$$

Et

$$b = -\frac{RT}{(1+\alpha)nF} \quad (19)$$

β_a et β_c sont appelées constantes (ou coefficients) de Tafel et définies comme l'inverse des pentes des courbes anodiques et cathodiques partielles sur la représentation dite de Tafel de la courbe de polarisation ($\log j = f(E)$) :

$$\beta_a = \frac{RT}{\alpha zF} \quad (20)$$

Et

$$\beta_c = \frac{RT}{(1-\alpha)zF} \quad (21)$$

On a dans ce cas :

$$\eta_a = \beta_a \ln \left(\frac{j_a}{j_c} \right) \quad (22)$$

Et

$$\eta_c = \beta_c \ln \left(\frac{j_c}{j_a} \right) \quad (23)$$

Soit encore pour la branche anodique :

$$\log(j_a) = \eta_a / (2,3\beta_a) + \log(j_0) \quad (24)$$

Et pour la branche cathodique :

$$\log(j_c) = -\eta_c / (2,3\beta_c) + \log(j_0) \quad (25)$$

La représentation $\log I_0$ en fonction du potentiel appliqué E est couramment utilisée pour la détermination des paramètres cinétiques J_0 , β_a et β_c .

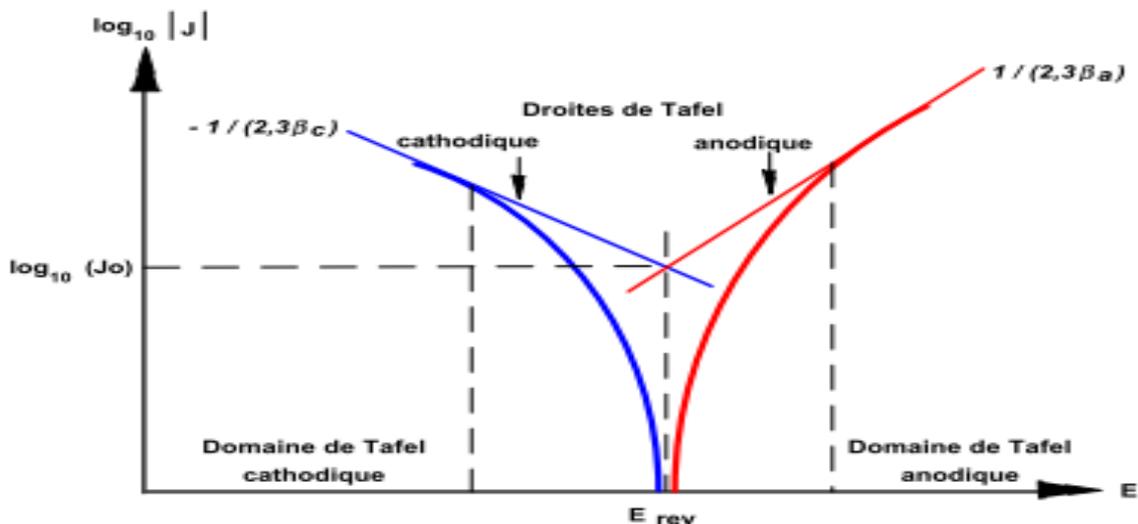


Figure I.28 : Courbe $\log_{10} |J| = f(E)$ et droites de Tafel [44].

I.2.3.3 Détermination de la vitesse de corrosion [45] :

La vitesse de corrosion peut être déterminée à partir de l'exploitation de la courbe intensité potentielle. Par construction anode et cathode peuvent être séparées et le courant de corrosion J_{corr} , intensité commune des composantes anodique et cathodique au point de courant nul. Ainsi, peut être estimé directement.

Ainsi La vitesse de corrosion exprimée en perte de matière sur une période donnée est alors exprimée à partir de J_{corr} selon :

$$V_{\text{corr}} = \frac{j_{\text{corr}} \cdot W_a \cdot t}{10 \cdot F} \quad (29)$$

Avec J_{corr} : la densité du courant de corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

T : la durée de l'essai.

W : l'équivalent électrochimique du métal.

F : la constante de Faraday égale à 96500C/mole.

I.2.3.4 Condition nécessaires pour qu'un métal se corrode [46]

La condition nécessaire pour provoquer la corrosion d'un métal donné, est d'avoir un système accepteur (subissant une réduction), capable d'échange des électrons avec le système donneur d'électrons (le métal) qui subit une oxydation anodique. Autrement dit, si la tension d'équilibre du premier système est supérieure à celle du second, la corrosion de ce dernier est thermodynamiquement possible.

Donc pour qu'un métal se corrode il est nécessaire (en absence de courant extérieur) qu'il existe dans la solution, un constituant oxydant tel que le potentiel d'équilibre E_c de la réaction cathodique soit plus élevé que le potentiel d'équilibre E_a de la réaction anodique de dissolution du métal. Alors la condition de corrosion est donc : $E_c > E_a$.

Chapitre II

**Matériaux et
techniques
expérimentales**

Introduction

Dans ce chapitre, on présentera en première 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 microstructure et la caractérisation mécanique basé sur les tests micro dureté et la caractérisation électrochimique.

Notons que les revêtements ont été réalisés au sein de l'entreprise privée « Tubiret sise à Bouira» spécialisée dans la rénovation et la récupération des pièces mécaniques usées.

II.1 Matériaux utilisés

II.1.1 Substrat

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

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

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

II.1.2 Dépôts réalisés

Dans notre travail nous avons utilisé une poudre nommée proXon21023, poudre à base du fer. Cette poudre est conçue pour produire un semi-dur et elle est utilisée généralement sur les surfaces d'appui résistant et une excellente résistance à l'oxydation et la corrosion et aux températures élevées. Cette poudre a été projetée sur les surfaces des échantillons par le pistolet flamme-poudre type CastoDyn DS8000 [43].

Les compositions chimiques et les caractérisations de matériau d'apport à base de fer sont énumérées dans le tableau :

Type	Application et caractérisation	Composition	Dureté	Température Max D'utilisation
proXon21023	<p>Portées Mécanique, Rattrapages de Cotes. Revêtements anti Usure de faibles et fortes épaisseurs s'utilise sans sous-couche d'accrochage le meilleur état de surface est obtenu par rectification.</p>	<p>Fe 52% Ni32% Al 8% Mo 6%</p>	HRB 90	815°C

Tableau II.2 : Composition et caractéristique de poudre utilisée et donnée par le fournisseur.

II.1.3 Elaboration des échantillons

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

- ✓ Un dressage, pour avoir un bon état de surface, de la structure à revêtir ;
- ✓ Un épaulement, dans le but de fixer les pièces, lors de la projection ;
- ✓ Un chanfreinage, dont le but d'avoir un contact parfait entre le revêtement et de la surface antagoniste.

Les échantillons élaborés présentent la forme suivante :

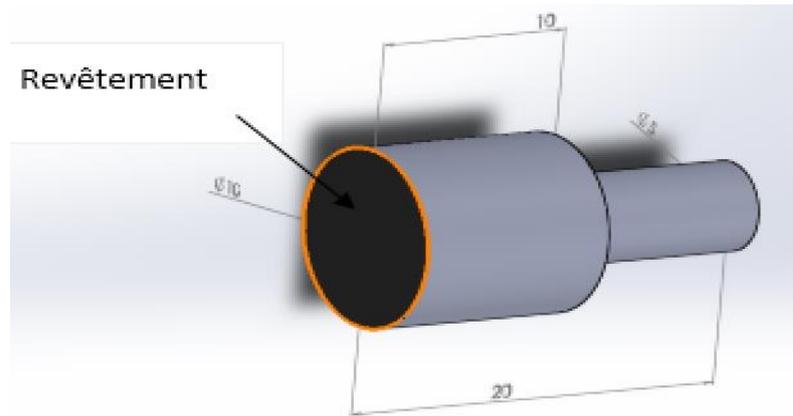


Figure II.1 : Echantillon utilisé pour la projection.

II.1.4 Préparation des surfaces à revêtir

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

- ✓ **Dégraissage** : les échantillons sont dégraissés et nettoyés avec une solution de trichloréthylène afin d'éliminer les souillures, ce sont principalement des graisses animales, végétales ou minérales.
- ✓ **Sablage** : cette opération a pour obtenir une surface rugueuse prête à recevoir le revêtement. Le principe du sablage à cribler la surface à revêtir par un jet de particules à une pression d'air de 5 bars. Ce prétraitement offre une bonne adhérence.

II.2 Réalisations des dépôts

D'après les procédés de préparation de la surface (dégraissage, sablage), l'échantillon à une forme bien déterminé, qui est prêt à effectuer l'opération de projection thermique.

II.2.1 Paramètre de projection

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

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

Tableau II.3 : paramètres de projection utilisé par l'entreprise.

II.2.2 Le pistolet utilisé [47]

Le matériau à projeter est introduit sous forme de poudre dans la flamme d'un chalumeau. Les gaz les plus couramment utilisés sont mélanges hydrogène-oxygène, cyanogène-oxygène et surtout acétylène-oxygène, qui donnent des flammes à des températures de 2600°C, 300°C respectivement.

Ce paramètre température limite la projection de certains matériaux. Dans le cas de projection à partir de poudres, ces dernières peuvent être introduites dans la flamme : soit par gravité, soit par mise en suspension préalable dans l'un des gaz ou encore par mise en suspension dans un courant d'air additionnel (Figure II.2).

L'avantage de cette technique par rapport aux autres procédés de projection thermique est son faible prix de revient et sa facilité de mise en œuvre.

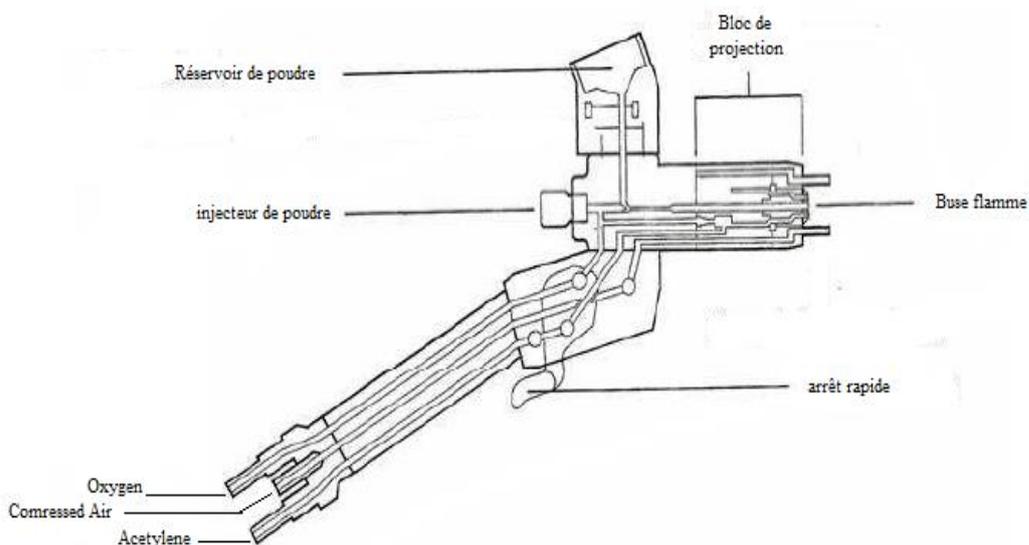


Figure II.2 : Pistolet flamme-poudre [44].

II.3 Méthodes de caractérisation des revêtements

II.3.1 Méthode d'analyse de la microstructure

II.3.1.1 Préparation des échantillons pour l'observation métallographique

Pour obtenir une surface agréable pour toutes les caractérisations, il nécessite un polissage fin de la surface de la coupe du dépôt à observer. Le polissage mécanique est obtenu en utilisant une polisseuse qui vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface à l'aide de papiers abrasifs de carbure de silicium (SiC), de différentes granulométries de plus en plus

faible (180, 320, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000 grains /cm²). Puis une finition a été faite sur du papier à pâte diamantée.



Figure II.3 : Polisseuse mécanique.

II.3.1.2 Microscope optique

La microscopie optique permet d'obtenir des informations sur les éléments constitutifs des microstructures telles que la texture, la dimension des grains et les différentes phases présentes. Afin de rendre ces éléments visibles à partir d'une surface polie.

Le microscope optique utilisé dans cette étude est de marque PHYWE, permet l'observation des échantillons avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000 fois. L'avantage de la microscopie optique c'est qu'elle nous permet l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Mais vu son faible résolution, il n'est possible de l'utiliser pour une observation fine des objets rugueux ou de petites tailles. La figure II.4 montre le microscope optique, utilisé pour l'observation de nos échantillons.



Figure II.4 : microscope Optique.

II.3.1.3 Microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope électronique à balayage (MEB) est appareil d'analyse, pouvant fournir rapidement les informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide.

Les observations au microscope électronique à balayage à l'aide d'un microscope PHILIPS type FEI Quanta 200 sous une tension d'accélération maximale de 30kV. Elle est fixée à 20 kV pour la microanalyse. L'appareillage peut utiliser les électrons secondaires (SE) ou rétrodiffusés.



Figure II.5 : microscope électronique à balayage (MEB).

II.3.2 caractérisation des propriétés mécanique des revêtements

II.3.2.1 Essai de Dureté vickers

L'essai de dureté ont été réalisée sur une machine de dureté universelle Diastor (figure II.6) au niveau Entreprise National des Matériels Travaux Publics de Bejaia, nous avons choisi la dureté Vickers, qui effectué avec un pénétrateur en diamant de forme pyramide à base carré. La valeur de la dureté Vickers H_v est le rapport de la charge F qui est égale à 30 Kgf à la surface S de l'empreinte comme le montre la relation suivant :

$$H_v = F/[d^2/2 \sin(136^\circ/2)]$$

$$H_v = 1,8544 \times 0,102 F / d$$

Avec d : diagonale de l'empreinte et F : charge appliqué



Figure II.6 : Machine de dureté universelle TYPE Diastor 2RC.

II.3.3 Etude de comportement électrochimique

L'étude des phénomènes électrochimiques se produisant au sein des matériaux considérés dans cette étude, essentiellement basée sur l'analyse des courbes de polarisation potentiocinétique.

II.3.3.1 Cellule électrochimique

Les expériences électrochimiques ont été réalisées dans une cellule en verre à trois électrodes : une électrode de travail, une contre électrode en platine et une électrode de référence au calomel saturée (SCE). Cette cellule, présentée dans la figure II.7.

✓ **Electrode de travail (ET) [45]**

C'est une électrode en acier de nuance E335, dont le potentiel et le courant sont mesurés. Elle représente la surface d'étude.

✓ **Electrode de référence (ER) [45]**

Cette électrode possède un potentiel spécifique et constant, ce qui permet d'imposer un potentiel précisément défini à l'électrode de travail. L'électrode de référence que nous avons utilisée pour mesurer la tension de l'électrode de travail est une électrode au calomel saturée (ECS).

✓ **La contre électrode (CE) [45]**

La contre électrode est un conducteur qui ferme le circuit de la cellule et permet la circulation du courant électrique dans l'électrode de travail à travers la solution. Elle est en général en métal inerte comme le platine et le graphite.

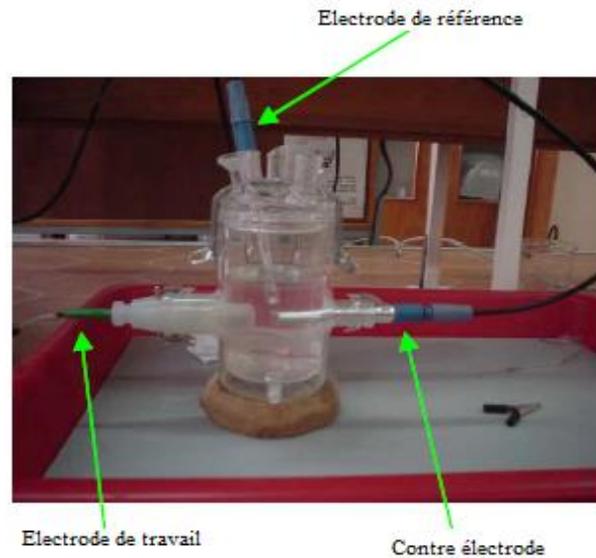


Figure II.7 : Cellule électrochimique utilisée.

II.3.3.2 Potentiel de corrosion

Un métal plongé dans un milieu électrolytique quelconque tend à se dissoudre et à se charger électriquement avec création d'une double couche électrochimique assimilable à un condensateur électrique. Au bout d'un temps suffisamment long pour qu'un régime stationnaire soit établi, l'électrode métallique prend par rapport à la solution un potentiel, appelée potentiel de corrosion (E_{corr}). Ce potentiel ne peut être connu en valeur absolue. Il est repéré par rapport à une électrode de référence.

Dans notre étude électrochimique nous avons plongé un acier (E335), dans une solution de 3% NaCl et nous avons utilisé une électrode référence au calomel saturé.

II.3.3.3 Courbe de polarisation [46,47]

Appelée aussi courbes intensité-potentiel, courbes de polarisation globale, ou courbes potentiodynamiques. La détermination des courbes intensité-potentiel des matériaux en milieu corrosif est un outil fondamental de l'étude des phénomènes de corrosion.

Pour déterminer une courbe de polarisation, on applique, à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail (acier E335) et une électrode de référence (au calomel saturée). On mesure le courant qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre cette électrode de travail et une contre-électrode.

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : la vitesse instantanée de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}) et les pentes de Tafel, la résistance polarisation R_p .

Elle donne des mesures rapides et sa mise en oeuvre est relativement simple.

La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique.

Pour déterminer expérimentalement ces paramètres électrochimiques, une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel (figure II.8).

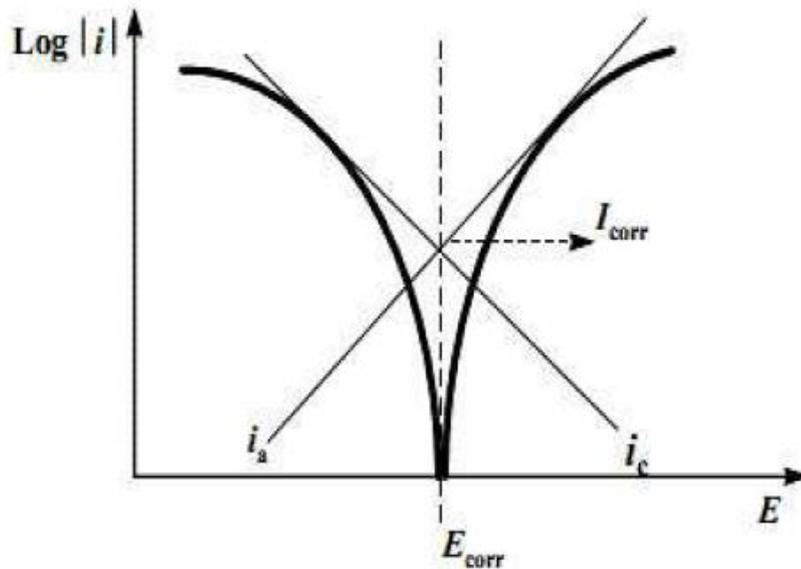


Figure II.8 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.

Elle utilise les portions de la courbe $[i = f(E)]$, éloignées du potentiel de corrosion, c'est-à-dire les portions pour lesquelles $E \gg E_{\text{corr}}$ (domaine anodique) ou $E \ll E_{\text{corr}}$ (domaine cathodique).

Le dispositif utilisé pour le tracé des courbes (Figure II.8) est constitué d'un montage classique à trois électrodes, composé d'un potentiostat, d'un générateur programmant l'évolution du potentiel en fonction du temps et d'un enregistreur. La mesure du potentiel est effectuée à l'aide d'un millivoltmètre à haute impédance par rapport à l'électrode de référence.

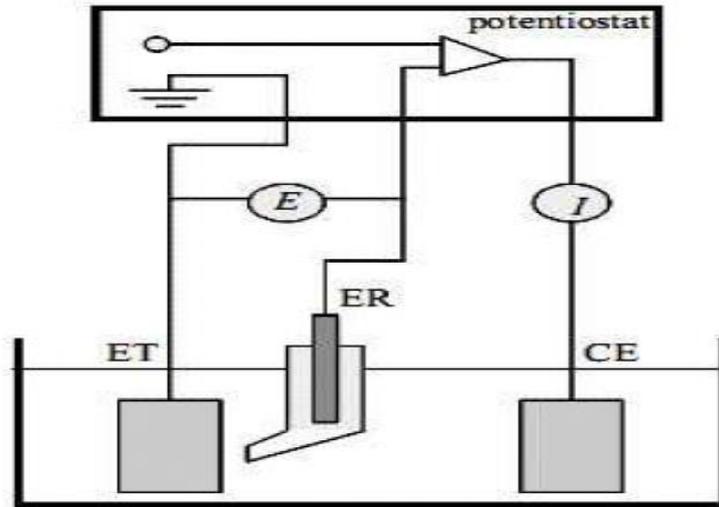


Figure II.9 : Dispositif de mesure d'une courbe de polarisation.

ET : électrode de travail, ER : électrode de référence,

CE : contre électrode, P : potentiostat.

Chapitre III

Résultats et Discussions

Introduction

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

III.1 Caractérisation de la microstructure

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

III.1.1 Caractérisation par microscope optique

L'observation par microscope optique de dépôt à base de fer, est présentée dans la figure III.1. Nous pouvons déduire que le revêtement présente une structure claire, on observe deux zones, une claire et l'autre sombre, ainsi que quelque trace de porosité.

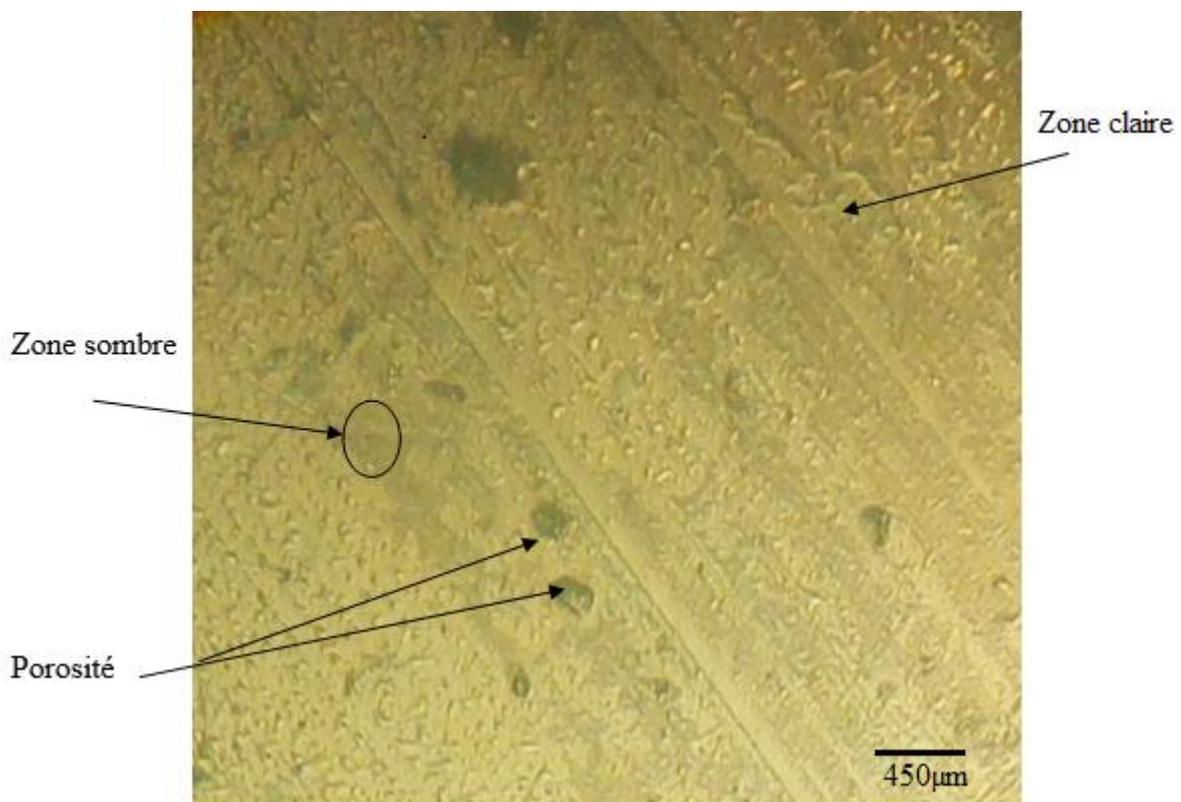


Figure III.1 : microstructure d'un revêtement à base de fer.

III.1.2 Caractérisation par microscope électronique à balayage (MEB)

III.1.2.1 La poudre utilisée

La poudre utilisée pour nos dépôts est la poudre d'alliage Fe-Ni-Al de type ProXon 21023, de granulométrie entre 125 et 325 µm, et de forme angulaire observée au microscope électronique à balayage (figure III.2) qui caractérise des poudres fondues broyées.

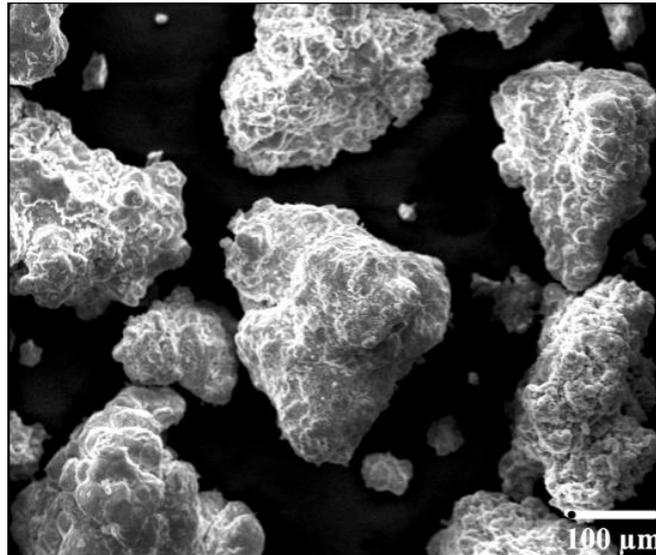


Figure III.2 : Microstructure de la poudre ProXon 21023.

III.1.2.2 Microstructure de dépôt réalisé par la poudre ProXon 21023

La figure III.3 représente la microstructure d'un dépôt issu de la poudre ProXon 21023.

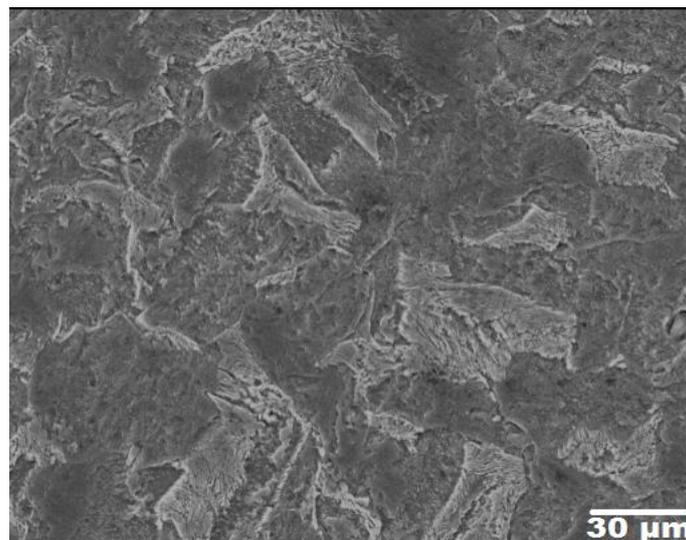


Figure III.3 : Microstructure du dépôt issu de la poudre ProXon 21023.

D'après la morphologie de dépôt issu de la poudre ProXon 21023, observé par le microscope électronique à balayage on a remarqué que :

- ✓ La structure de dépôt ne présente pas de porosité, et sont condensé et compactes.
- ✓ L'absence des particules non fondu.
- ✓ L'absence des oxydes dans le dépôt.

III.2 Evaluation de la dureté Vickers

Les essais de duretés sont réalisés sur les surfaces du dépôt à base de fer (P23), et d'un substrat en acier E335 par indentation Vickers sous une charge de 30Kgf, pendant 10 seconds. Pour chaque échantillon. La dureté Vickers était calculée par la moyenne de 03 mesures,

Les résultats sont illustrés dans le tableau III.1, et schématisé par l'histogramme de la figure III.4.

Moyen des diagonales	01	02	03	HV _{0,2}
Substrat	0,71	0,69	0,67	117
P23	0,67	0,60	0,64	138,33

Tableau III.1 : les résultats de la dureté Vickers.

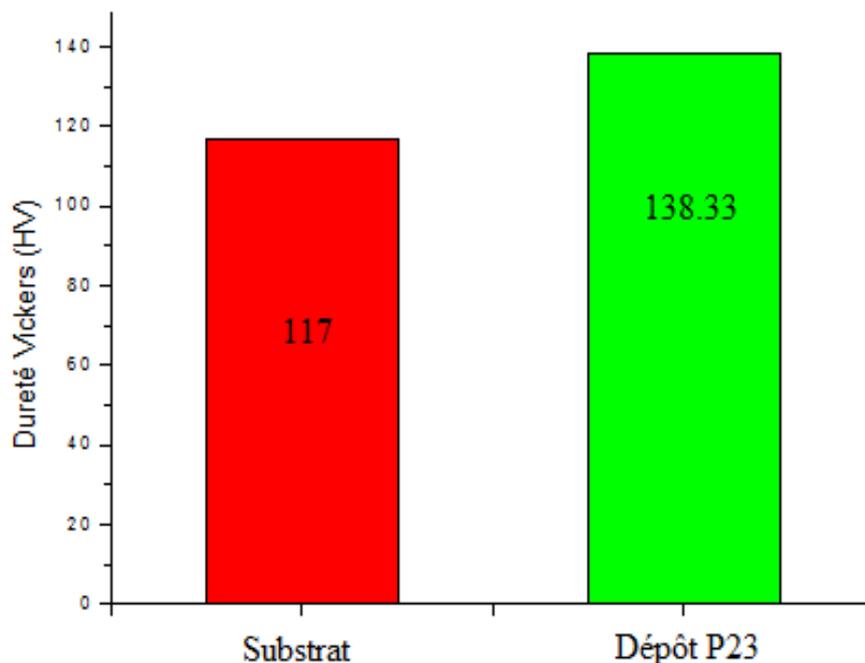


Figure III.4 : histogramme présente la dureté Vickers.

A travers cet histogramme, on remarque que le dépôt (P23) présente la meilleure dureté par rapport au substrat. Ceci s'explique par la présence des oxydes dans la microstructure du dépôt.

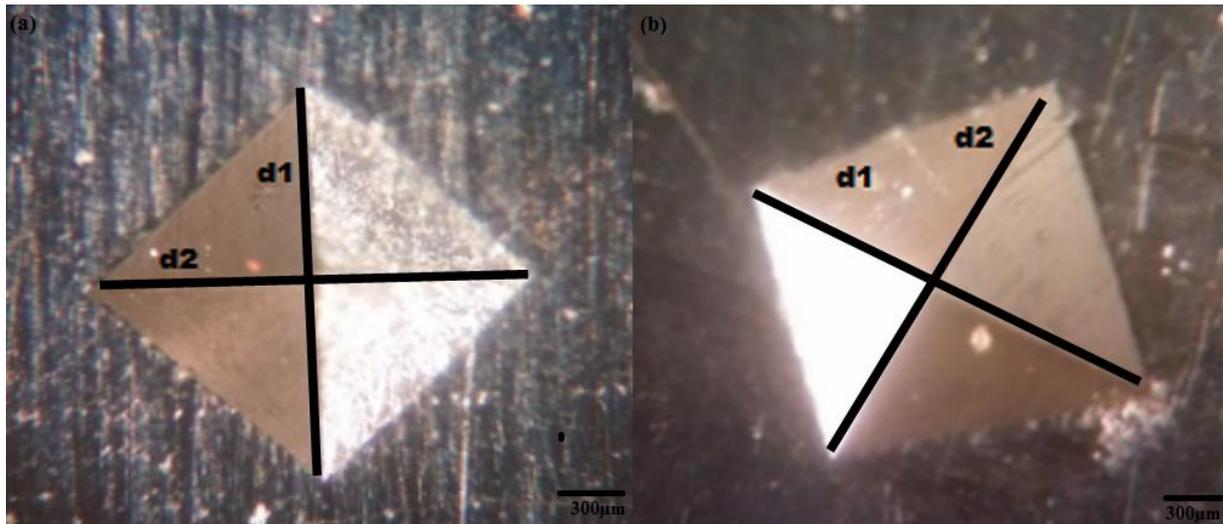


Figure III.5 : Les empreintes Vickers sur une surface lisse : (a) substrat, (b) dépôt P23.

III.3 Etude le comportement électrochimique

La représentation des courbes de polarisation permet de déterminer des intervalles de potentielles pour lesquelles différents processus électrochimique on lieu. Ils ont été étudiés dans un milieu saline (35g/l).

III.3.1 Les courbes de polarisation $i=f(E)$:

Les courbes de polarisation ont été mises en œuvre à plusieurs reprises, le plus souvent pour apprécier le comportement électrochimique des interfaces testées. Il a été également utilisé dans le cadre de la mise en œuvre de différentes techniques électrochimiques appropriées pour l'évaluation de vitesses de corrosion par technique électrochimique, comme par exemple la détermination de potentiel et la densité de corrosion, puis déduire la résistance à la polarisation R_p .

Nous avons tracé la courbe de polarisation pour les deux pièces, pièce revêtu (P23) et pièce nu (Substrat). Le calcul de la densité i_{corr} et du potentiel de corrosion E_{corr} est effectué en extrapolant les droites de Tafel anodique et cathodique.

On détermine la résistance à la polarisation R_p au voisinage de potentiel de corrosion (E_{corr}), ce dernière est déterminé à travers les courbes de Tafel.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \Big|_{\Delta E \rightarrow 0}$$

On applique la relation de Stem et Geary par la formule suivant :

$$R_p = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c) \cdot i_{corr}}$$

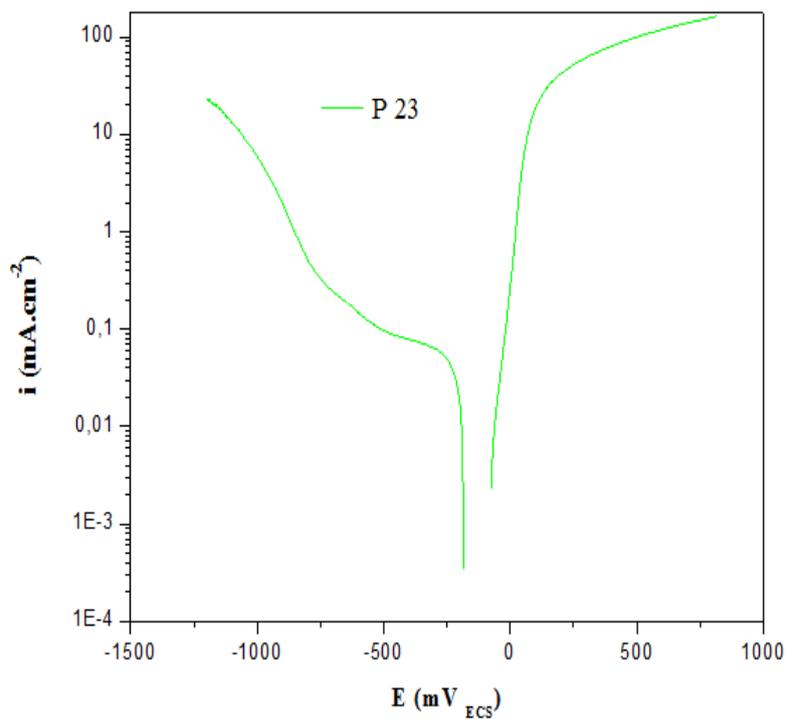


Figure III.6 : courbe de polarisation $i=f(E)$ de dépôt à base de fer (P23).

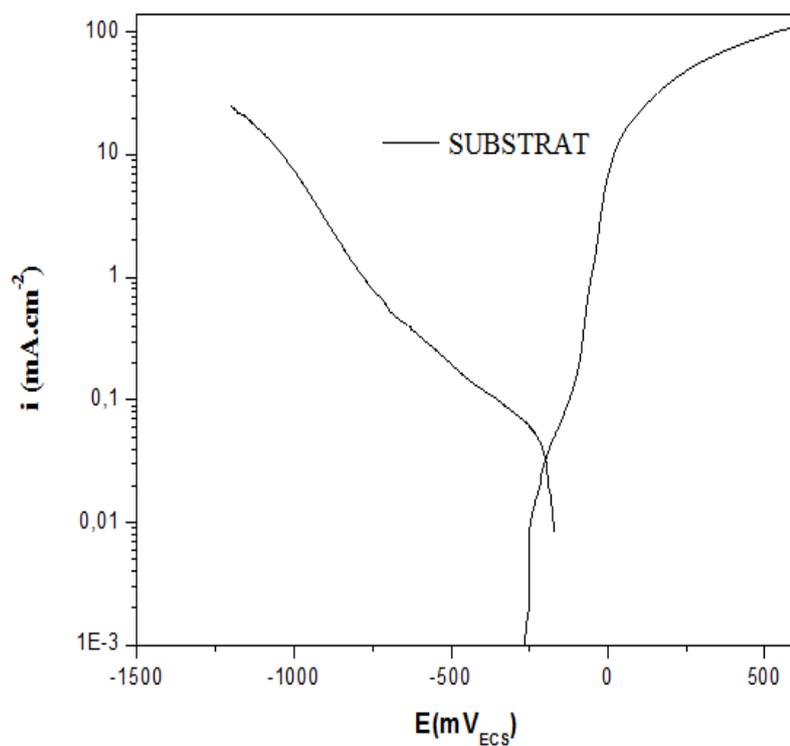


Figure III.7 : Courbe de polarisation $i=f(E)$ de sans dépôt (Substrat).

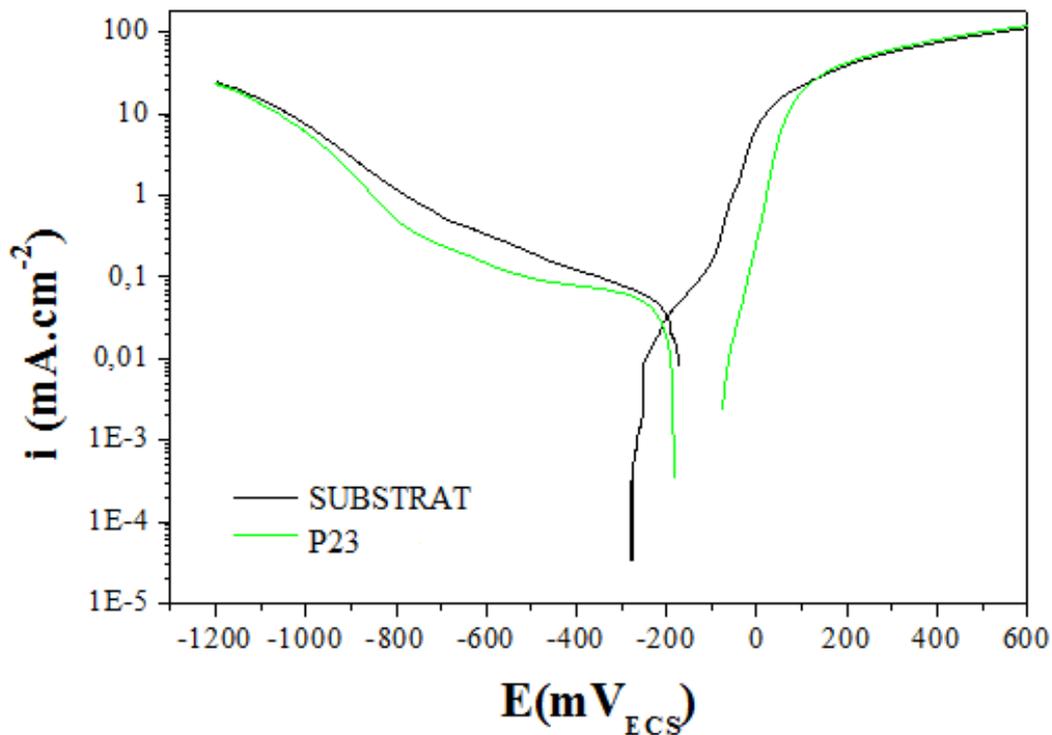


Figure III.8 : Courbe de polarisation du dépôt à base de fer (P23) et le Substrat.

Tableau (III.2) : les valeurs des paramètres de corrosion pour le dépôt à base de fer (P23) et le Substrat.

Paramètres de corrosion	$E_{corr}(mV_{ecs})$	$i_{corr}(mA.cm^{-2})$	$R_p (K\Omega/cm^2)$
Substrat	-215,39	0,046	1,096
Dépôt à base de fer (P23)	-135,43	0,002	7,919

Discussion

D'après la figure (III.8), nous observons que dans la zone anodique, une variation de la pente anodique à haute tension pour le substrat vers une gamme de densité de courant plus élevée par rapport au dépôt (P23), peut-être expliqué par la formation d'une couche de produits de corrosion qui empêche le courant de corrosion de remonter.

La couche de revêtement de fer peut retarder la réaction anodique à des hauts tensions anodique, qui est dû probablement à la formation partiel des pores ainsi limitant le courent d'attaque.

La densité du courant de substrat est de l'ordre de $0,046 mA.cm^{-2}$ avec une résistance de $1,096 khom/cm^2$. Par ailleurs, le dépôt (P23) présente un comportement actif de corrosion dont la densité du courant est $0,002 mA.cm^{-2}$ avec une résistance de $7,919 khom/cm^2$. Nous remarquons que la résistance à la polarisation du dépôt vis-à-vis la corrosion est bien meilleure

que celle du substrat. Le déplacement de potentiel de corrosion du dépôt vers une valeur plus noble par rapport à l'acier nu (substrat).

Ces résultats témoignent du rôle que joue le revêtement sur la résistance à la corrosion.

III.3.2 Détermination la perte de masse

Cette méthode consiste à effectuer une pesée avant et après immersion dans un milieu saline (35g/l) pour notre dépôt. Pour ces mesures, on a utilisé une microbalance très sensible.

Dans cette méthode on a mesuré la masse de l'échantillon, après l'avoir enrobé de résine sauf la surface à exposer à la solution, avec une microbalance sensible au milligramme avant de le plonger dans un milieu salin (35 g/l) pendant une durée de 10 et 20 jours à température ambiante. Après on a retiré l'échantillon et on l'a pesé de nouveau après rinçage à l'eau distillée et séchage.

Pour déterminer la dégradation de masse on a procédé au calcul suivant :

$$\Delta m = m_i - m_f$$

Avec Δm : est la masse perdue après la période d'immersion.

m_i : la masse initiale de l'échantillon.

m_f : la masse finale de l'échantillon

Période	Masse initiale de l'échantillon m_i (g)	Masse finale de l'échantillon m_f (g)	Masse perdue Δm (g)
Après 10 jours	8,4942	8,2132	0,281
Après 20 jours	8,8953	8,1323	0,763

Tableau III.3 : Résultats après immersion pendant 10 et 20 jours dans une solution de salin (35 g/l) à la température ambiante.

D'après ce tableau, on observe une légère augmentation de perte de masse vis-à-vis avec le revêtement.

L'observation par microscope optique des échantillons après immersion dans un milieu salin, avec différents période (10 et 20 jours) on remarque, quelle sont infecté par la corrosion par piqûre, ainsi que avec l'augmentation de la durée d'immersion, les piqûres de corrosion se grandissent. Figure (III.9)

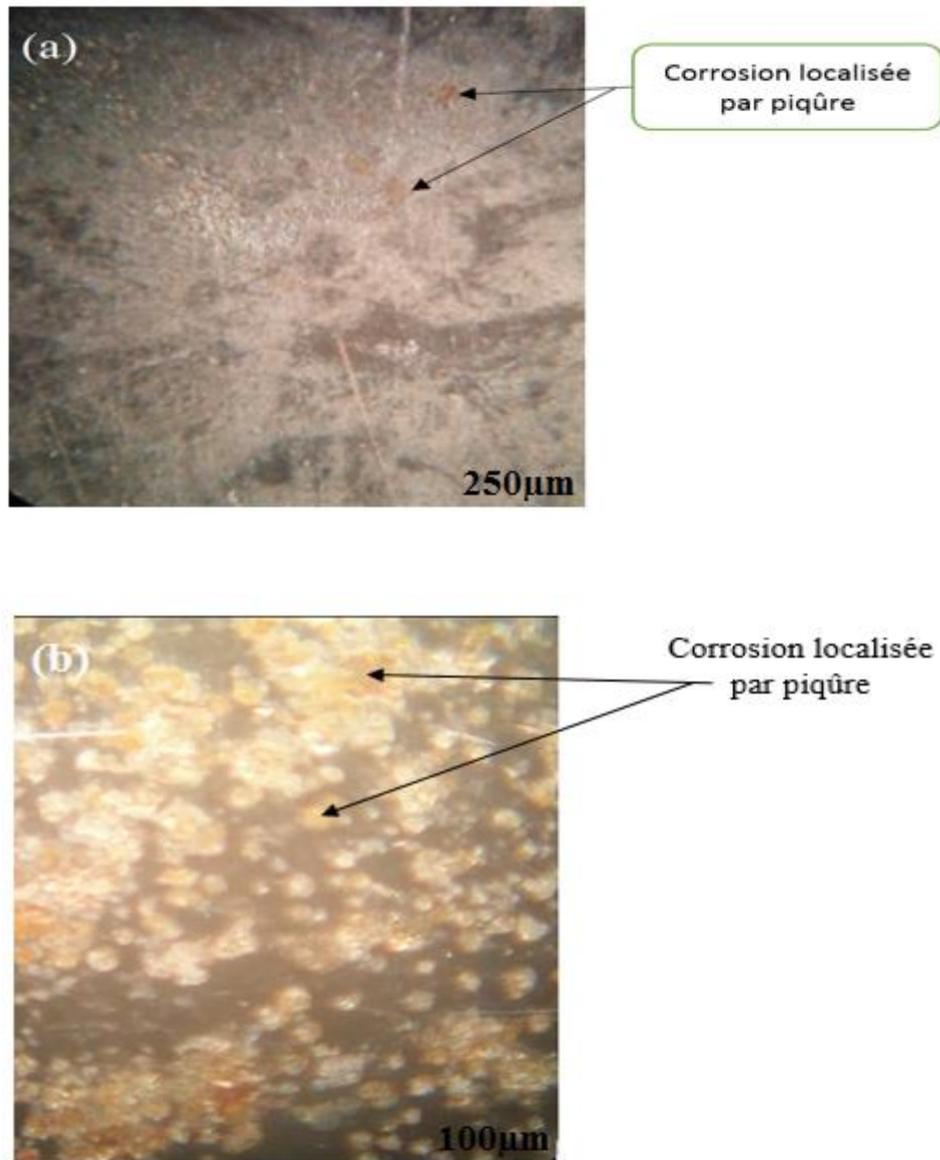


Figure III.9 : Photo par microscope optique après immersion pour le dépôt,
(a) : Après 10 jours, (b) : Après 20 jours.

Conclusion générale

Dans ces dernières années, la procédé de projection thermique font maintenant partie des traitements de surface, très utilisé dans l'augmentation la durée de vie des pièces mécaniques. Cette technique permet réalisé sur les pièces mécaniques des revêtements métalliques diversifiés. Ces revêtements ont pour de protéger la surface d'une pièce mécanique (substrat), lutté contre la corrosion et l'usure. En effet, celle-ci permet de résoudre nombreux problèmes inhérent aux matériaux si bien de maîtrise des paramètres de projections.

Notre travail avait pour l'objectif d'étudier le comportement électrochimie d'un dépôt de fer élaborée par la procédé à flamme-poudre sur un acier de construction mécanique d'usage général de type E335, qui très utilisé dans l'industrie mécanique.

Pour ce faire, nous avons commencé par la première étape concerne la caractérisation structurale de dépôt utilisé avant et après de projection en étudiant leurs microstructures à l'aide microscope optique (MO), et microscope électronique à balayage (MEB).

La deuxième étape, pour détermination la micro dureté de notre dépôt et le substrat, à fin de discuter les résultats obtenues.

La troisième étape, nous avons effectué la caractérisation électrochimie pour déterminer les paramètres de corrosion, telles que la densité de courant, le potentiel de corrosion, leur résistance polarisation, des différents échantillons (dépôt de fer et l'acier E335).

Les principaux résultats obtenus dans ce travail se résumant comme suite :

- ✓ Les observations montrent que la poudre utilisée avant la projection a une forme angulaire et fondue broyées, après la projection on a un revêtement d'une morphologie lamellaire homogène et plus dense et plus compacte.
- ✓ Les mesures de micro duretés effectuées sous une charge de 300g, ont montré que le substrat (acier E335) présente des valeurs les plus élevées par rapport à le revêtement de fer.
- ✓ Les essais électrochimies réalisés au cours de cette étude à bien confirmé l'importance des revêtements de fer, a la résistance à la corrosion autant que

Conclusion générale

sacrificiel au milieu salin (35 g/l), on a observé une amélioration considérable de la résistance à la corrosion par comparaisant au le substrat nu.

Dans ce travail on a confirmé que le dépôt de fer présent un bon comportement électrochimique dans un milieu salin, par rapport au substrat nu, peut être une solution de lutte contre la corrosion.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] D.E. SOKOLOV « Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression » thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, 2009.
- [2] M.KEHIL, « Tenue à l'usure d'un acier ordinaire à dépôt d'alumine par plasma, thèse de magister, mécanique appliqué » université Sétif, 2012.
- [3] S.NOUROUZI, « Contribution à l'étude du procédé ARC-FIL, pour la réalisation de dépôt métalliques durs résistants à l'usure abrasive » thèse de doctorat, université de Limoges, France, 2004.
- [4] A. Proner, revêtement par projection thermique, (éd) technique de l'ingénieur, M 1645, P 1-20,1999.
- [5] E. R. SAMPSON, Cored wire application using electric arc spray, p 133-137 of Thermal Spray Meeting the Challenges of the 21st Century, Pub. ASM international, Materials Park, OH-USA, 1998
- [6] <http://surfatec.org/>, guide du sablage, des grenailages, du microbillage, etc.
- [7] A. P. ALKHIMOV, V. F. KOSAREV, S. V. KLINKOV, the Features of Cold Spray Nozzle Design, J. Thermal Spray Technol., 10(2), p. 375-381, 2000.
- [8] S.BEAUVAIS, « Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma » Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003.
- [9] T. Mana, « évaluation de la tenue à l'usure d'un dépôt en acier 100Cr6 réalisée par technique de projection thermique à flamme-fil » mémoire de fin d'études, science des matériaux, université Bejaia, 2007.
- [10] F.CHOUIT « Elaboration et caractérisation des matériaux de revêtements de types (Ni-Al-Zn) par projection thermique (torche), mémoire de fin d'études, Matériaux supraconducteurs et diélectriques » université annaba, 2008.
- [11] N. HIDJA , A. AIS, mémoire de fin d'étude « frottements des dépôt obtenue par projection thermique à l'arc électrique », université de béjaia.2009.
- [12] Site web <http://www.gordonengland.co.uk> , Nature of Thermal Spray Coatings.
- [13] R. YOUNES, mémoire de fin d'étude « étude du comportement mécanique et microstructural des revêtement en céramique obtenue par projection thermique3 », université de béjaia.2016.
- [14] B.SADOUDI, mémoire de fin d'étude « étude comparative de la tenue à l'usure de deux types de dépôts réalisée par projection thermique via le teste de perte de mase en fonction du temps », université de béjaia.2007.
- [15] C.CHABROL-F.SCHUSTER, Caractérisation et contrôle des couches(1998).
- [16] A. LAMRAOUI, thèse de doctorat « traitement de surface par texturation laser : une alternative "propre" de préparation de surface pour la projection thermique », Université de Belfort-Montbéliard, France, 2011.
- [17] Y. Danlos, thèse de doctorat « Etude de l'association laser-projection thermique pour l'optimisation de revêtements », Université de Belfort-Montbéliard, France, 2009.
- [18] F. TOURI, Mémoire de fin d'étude « Synthèse de nouveaux matériaux moléculaires par phosphorylation des dérivés aminés et étude de leurs propriétés électrochimiques et complexâtes » Université de setif, 2012.
- [19] Michel Dupeux, aide-mémoire science des matériaux, Dunod, Paris, 2004, p 200, 201, 203.
- [20] Michel Colombié, matériaux métalliques, Dunod, Paris, 2001, 2008.
- [21] :F. BOUNAB, Mémoire de fin d'étude en Master « Evolutions microstructurales Lors des traitements thermiques imposés à un acier faiblement allié (53MnSi4) » Université de Biskra, 2013.
- [22] G. Dau_n, J. Talbot. Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitier. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. le lait, Inra éditions, 1971, 51 (507), pp.375-398. <hal-00928553>
- [23] S.YESSAD, A.DJEMAA « mémoire fin d'étude ; << protection cathodique d'une canalisation au sien du complexe CEVITAL », Bejaia, 2008-2009.
- [24] K.Faiza « Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (eau, huile et gaz) » Mémoire de Magister, Université de Boumerdès, 2008.
- [25] K.GHARBI « Etude de corrosion et protection des équipements de production du gaz brut à HASSI R'mel » mémoire fin d'étude, Université Ouargla, 2015.
- [26] Jacques L., Protection contre la corrosion, Techniques de l'ingénieur, France, 1990.

Références bibliographiques

- [27] S.KHERRAF « comportement électrochimique de l'acier A105 dans différents milieux. Influence de quelques inhibiteurs » mémoire de magister, Université de Skikda, 2008.
- [28] Matériaux Métalliques «Phénomènes de Corrosion, 4ième partie» Les différentes formes de corrosion aqueuse.
- [29] H.BENSABRA, cours de corrosion et protection métallique, génie des matériaux, université jijel, 2016.
- [30] B. GROSGOGEAT, P. COLON, la corrosion, Université Médicale Virtuelle Francophone, 2009-2010.
- [31] A.HABCHI «étude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier xc52 en présence du sulfarlem et leur sel correspondent dans un milieu h2so4 20% » mémoire fin d'étude, université Ouragla, 2013.
- [32]A.LEKOU, mémoire de magistère « Comportement à la corrosion des revêtements de cermet en milieux salins » université skikda, 2014.
- [33] I.BOURECHOUCHE, S.BOURDJAH, mémoire fin d'étude « contribution à la résolution du problème de corrosion de la partie supérieure du dock flottant de l'ERENAV de Bejaia », université de Bejaia, 2011/2012.
- [34] Gérard BERANGER et Henri MAZILLE ; «corrosion des métaux et alliages : mécanismes et phénomènes», hermes-science, paris, 2002, p354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361.
- [35] H. Ohfuji, D. Rckrd, High resolution transmission electron microscopy study of synthetic nanocrystallinemackinawite, Earth and Planetary Science Letters 241 (2006) p. 227-233.
- [36] A.Aminot, M.Chausse-pied, Manuel des Analyses Chimiques en Milieu Marin; CNEXO: Brest, France, 1983.
- [37] L.BABOURI, mémoire de magister «étude de la résistance à la corrosion des alliages de cuivre en milieu salin», université de skikda, 2008.
- [38] Reinhart F.M., Corrosion of Materials in Hydrospace. US Naval Civil Engineering Laboratory, report R504. 1966.
- [39] Jean- Jacques LAMOREUX, Sciences des matériaux, Précis de corrosion, pp.93, Ed, Beauchemin, (1994).
- [40] I. VERVISCH-FORTUNÉ, « Sensibilité de la technique d'émission acoustique à la corrosion des armatures dans le béton », these de doctorat, université de toulouse, 2009.
- [41] Nguyen-They LE, protection cathodique « aide-mémoire science des matériaux », Dunod, paris, 2004.
- [42] « Matériaux métalliques : phénomène de corrosion », aspect électrochimique de la corrosion, troisième partie.
- [43] HANNIA, YOUNES.R, « influence des post-traitements sur la tenue à l'usure d'un dépôt à base du fer réalisé par projection thermique », mémoire fin d'étude, Université de béjaia, 2012.
- [44] Site Web :[http:// www.castolin.fr](http://www.castolin.fr) Alliage en poudre et en filpour la projection thermique.
- [45] M. BOUAOUD, « tenue à la corrosion en milieu acide d'un dépôt Zn Sn sur acier inoxydable », mémoire de magistère, université de Sétif, 2014 ;
- [46] BOUKHATEM. A, AOUF. R, « Contribution à l'étude des propriétés anti-oxydatives et de l'efficacité anticorrosive sur l'acier API 5L X52 d'une prodigiosine d'une souche de Serratiamarcescens », mémoire fin d'étude, Université de Chelf, 2016.
- [47] NEBBAR.MA, « Etude de la tenue à la corrosion de l'acier N80 et évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion », thèse de magistère, Université de Biskra, 2010.

Annexe

Présentation l'Enterprise

ERENAV est un Chantier de Réparation Navale, propose des prestations globales de maintenance à tous les types de navires de moyen tonnage : dragues, navires de recherche, vraquiers, navires à passagers, cargos, port conteneurs, remorqueurs, barrages, pétroliers.

Dès sa création, ERENAV a eu pour mission d'assurer un rôle de soutien technique aux différents armateurs nationaux et de fournir des prestations aux armateurs étrangers touchant les ports algériens, et cette spécificité fait d'ERENAV une société prestataire de services à part entière, et d'une superficie de 12 000 m² dont 2500 m² couverts et d'une valeur brute des équipements de 1 346 millions dinars.

ERENAV est une EPE-SPA, au capital de 1.550 Millions dinars. Elle fait partie du portefeuille de Groupe Algérien de transport Maritime « G.A.T. MA » sous la tutelle du Ministère des Travaux Publics et des transports, reconnue pour sa réactivité, ses compétences, la qualité de ses travaux, le respect de ses engagements.

Elle est basée dans 4 des plus grands ports d'Algérie, répartis sur le 1.200 km de côtes Algériennes, son implantation géographique est favorable. Ces ports sont situés en baies relativement abritées contre les perturbations météorologiques. De plus, les tirants d'eau y sont également favorables, dont le siège social est à Alger, opère à travers ses trois unités implantées à Alger, à Bejaia et à Oran. Elle dispose d'un dock flottant de 15000 tonnes (190×32 m) à Bejaia et utilise deux cales sèches à Alger et d'une cale de halage à Oran, pour les mises à sec, ainsi que d'ateliers dans ces trois sites. Une annexe à l'Unité d'Oran a été créée à Arzew en 2007.

Les métiers d'ERENAV

1. Les Traitement de surfaces

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



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

2. Réparation mécanique

- ✓ Mécanique Bord : constituée de travaux de mécanique réalisés à bord des navires, tels que les démontage remontage des hélices, arbres porte hélice, gouvernails, vannes de coque, visite et réparation d'auxiliaire de bord, etc. c'est une spécialisation purement navale.
- ✓ Mécanique diesel : l'intervention pour le démontage, l'inspection et expertise suivie de la réparation et des essais de tous les types de moteurs diesels. Les interventions sont réalisées soit à bord pour les moteurs qui ne sont pas déplaçables, ou en raison de l'urgence de la réparation, soit au niveau de l'atelier.

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 fer de type ProXon 21023 ont été réalisés sur le substrat en acier 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 de température de 3000°C 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 essais de dureté Vickers ont été réalisés pour mesurer la dureté des revêtements à base de fer. Les dépôts composites ont été sélectionnés pour étudier leur comportement électrochimique (corrosion) dans le milieu salin (35g/l). Cet essai permis de déterminer les paramètres électrochimiques tels que la vitesse de corrosion, le potentiel de corrosion et leurs résistances de polarisation cyclique.

Mots clés : Projection thermique, Dépôt, Microstructure, Corrosion électrochimique

Abstract

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 21023 iron-based powder were produced on the E335 grade steel substrate, 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 of temperature is 3000°C, 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), the Vickers micro hardness test was used to measure the hardness of the coatings Based on iron. Composite deposits were selected to study their electrochemical behavior (corrosion) in the saline medium (35 g / l). This test made it possible to determine the electrochemical parameters such as the corrosion rate, the corrosion potential and their cyclic polarization resistances.

Key words: Thermal spraying, Deposit, Microstructure, Electrochemical corrosion

ملخص

الطلاء بالرش الحرارية تستخدم لحماية المواد ضد التآكل على الرغم من استخدام على نطاق واسع في مجال الاحتكاك. في هذا العمل نقوم بالطلاء عن طريق مسحوق الحديد من (Proxon 21023) على راسب من الفولاذ الهيكلي من نوع (E335). تعد هذه الطلاء بالمسحوق رش الشعلة بإدخال مواد حشو على شكل مسحوق، في درجة حرارة اللهب 3000 درجة مئوية التي ان يتم ذوبان العجين ثم يتم اسقاطه على سطح الفولاذ بأكمله، بنية الطلاء حددت بواسطة المجهر الضوئي (OM) والمجهر الإلكتروني الماسح (BEM). تجارب الصلابة لطلاء قاعدة من الحديد تمت بواسطة قياسات وقد تم هذا الاختبار لدراسة سلوك الكهروكيميائية (التآكل) مما يسمح لنا باستخراج إمكانيات التآكل، مقاومات التآكل في المياه المالحة (35غ/ل)

الكلمات الدالة: الرش الحرارية، الإيداع، المجهرية، التآكل الكهروكيميائية.