

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

---

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de master  
en Génie Mécanique

Option : Matériaux et traitement des surfaces (MTS)

Thème

**Influence de la déposition des rechargements durs par  
torche à flamme sur la microstructure des  
substrats**

Proposé et dirigé par :

**Le Professeur Mr NACER Bacha**

Présenté par :

**BOUARIOUA Hicham**

ANNEE UNIVERSITAIRE 2014/2015

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes parents pour  
leur soutien indéfectible.*

*A Mes frères et à ma femme et ma petite fille.*

*A toute ma famille.*

*À tous mes amis.*

*A tous la promotion MTS 2015.*



*Bouarioua Hicham*

# REMERCIEMENTS

*Tout d'abord je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience de mener à bien mon travail de PFE.*

*Je remercie ma famille, à qui revient le mérite de m'avoir éduqué, encouragé et soutenu.*

*Je tiens à remercier mon promoteur Mr professeur BACHA Nacer-Eddine d'avoir bien voulu me proposer le sujet et ensuite encadré mon travail en m'apportant l'orientation et l'aide nécessaire.*

*Aussi bien je remercie Mr. N. Dilmi pour son encouragement et ses aides. Ainsi que mes amis.*

*Je n'oublie pas de remercier les enseignants de Département Génie mécanique, en particulier ceux de la spécialité science des matériaux, pour m'avoir offert un agréable cadre de formation, Grand merci.*

*Je souhaiterai également remercier tous mes collègues de la promotion MTS2015, pour avoir encouragé à accomplir ce travail.*

*Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'élaboration de ce travail.*

BOUARIOUA Hicham

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	01
------------------------------------	----

## **Partie bibliographique**

### **Chapitre 1 : projection thermique**

1.1. Historique.....	03
1.2. Principe de la Projection thermique.....	03
1.3. Procédés de la projection thermique.....	04
1.3.1. La projection à la flamme.....	04
1.3.1.1. Projection à flamme-poudre.....	05
1.3.1.2. Projection à flamme-fil.....	05
1.3.1.3. La projection a flamme fusion-refusions (Torche Super-Jet).....	07
1.3.2. La projection plasma.....	07
1.3.3. La projection thermique à froid (cold spray).....	08
1.3.4. Projection à haute vitesse (HVOF).....	09
1.3.5. Projection hypersonique à tir discontinu.....	10
1.3.6. Projection à l'arc électrique.....	11
1.3.6.1. Les avantages et les inconvénients du procédé .....	12
1.3.6.2. Formation du dépôt.....	13
1.4. Comparaison des procédés.....	14
1.5. Préparation du substrat.....	15
1.6. Caractéristiques générales des dépôts.....	16
1.6.1. Microstructure.....	16
1.6.2. Teneur en oxydes et porosité.....	17
1.6.3. L'adhérence.....	18
1.6.4. Contraintes résiduelles.....	18
1.7. Conditions pour l'obtention d'un bon dépôt.....	18
1.8. Traitement des dépôts après la projection.....	19
1.9. Conclusion.....	19

### **Chapitre 2 : Généralités sur les aciers et les traitements thermiques**

2.1. Introduction.....	21
------------------------	----

2.2. Définition de l'acier.....	21
2.3. Classification des aciers .....	21
2.3.1. Les aciers ordinaires ou aciers au carbone.....	22
2.3.2. Aciers à outils.....	23
2.3.3. Les aciers de traitement thermique.....	23
2.3.4. Les Aciers inoxydables.....	23
2.3.4. 1. Aciers inoxydables austénitiques.....	24
2.3.4. 2. Aciers martensitiques.....	24
2.3.4. 3. Aciers ferritiques.....	24
2.4. Les éléments d'alliages.....	24
2.5. Désignation des aciers.....	25
2.6. Les propriétés des métaux.....	26
2.7. Traitement thermique.....	26
2.7.1. La Trempe.....	27
2.7.1.1. Trempe martensitique.....	27
2.7.1.2. Trempe bainitique.....	27
2.7.1.3. Trempe d'aciers austénitique ou hypertrempe.....	27
2.7.1.4. Cycle de trempe.....	27
2.7.1.5. Qualité de trempe.....	28
2.7.1.6. Aptitude à la trempe.....	28
2.7.1.7. Recommandations.....	28
2.7.2. Revenu.....	29
2.7.3. Recuit.....	29

## **Partie expérimentale**

### **Chapitre 3 : Techniques expérimentales**

3.1. Introduction.....	30
3.2. Les Substrats.....	30
3.2.1. Nuance XC38 .....	30
3.2.2. Acier faiblement allié 42CrMo4 .....	31
3.2.3. Nuance X30Cr13.....	31
3.3. La poudre.....	32

3.4. Découpage des échantillons.....	33
3.5. Préparations des pièces à projeté .....	34
3.5.1. Rechargement par projection thermique.....	34
3.5.2. Le dépôt projeté.....	34
3.6. Paramètres de projection.....	35
3.7. Mesure d'épaisseur de revêtement.....	37
3.8. Principe de traitement thermique.....	38
3.8.1. La mise en solution.....	38
3.9. Caractérisation métallographique.....	39
3.9.1. Préparation des échantillons.....	39
3.9.2. L'enrobage.....	40
3.9.3. Le polissage.....	41
3.10. Attaque chimique.....	42
3.11. Analyse micrographique.....	42
3.12. L'essai de dureté.....	43

## **Chapitre 4 : Résultats et interprétations**

4.1. Introduction.....	44
4.2. Les aspects de surface des différents revêtements réalisés.....	44
4.3. Mesure d'épaisseur.....	44
4.4. Etude métallographique.....	45
4.5. La dureté.....	49

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>54</b>
---------------------------------	-----------

## **Références bibliographiques**

### Conclusion générale

Toutes les techniques de revêtement des surfaces ont pour but principalement d'améliorer la surface d'un matériau en lui conférant ainsi des propriétés fonctionnelles plus adaptées et donc plus satisfaisantes. A la lumière des résultats obtenus par les différentes techniques après la réalisation par projection thermique à la flamme des revêtements durs de propriétés par un poudre Ni-B-Si sur un substrat en différents aciers.

Nous avons voulu à valeur l'effet de la chaleur d'une torche à flamme pour la microstructure d'un acier. Pour cela, nous avons choisis trois types d'acier : un acier au carbone, un acier allié et un acier fortement allié.

Les substrats constitués par ces trois types d'aciers ont subi déposition à la torche Eutalloy puis refusion à la flamme au soumis à la chaleur d'un four de traitement thermique.

Les résultats montrent que :

1. Pour les aciers au carbone, il n'y a une relaxation des contraintes résiduelles, la dureté baisse légèrement par rapport au métal de base et il n'y a pas de formation de martensite. Le TT n'a pratiquement aucun effet par rapport à celui de la torche.
2. Pour les aciers alliés, le refroidissement à l'eau après une déposition à la torche Eutalloy provoque la formation d'une martensite. Il peut être indésirable de voir apparaître cette microstructure. Il faudra donc éviter le refroidissement à l'eau pour ce genre d'acier. Un traitement thermique a le même effet qu'une déposition à la torche Eutalloy avec refroidissement à l'air.
3. Pour les aciers fortement alliés, il faut être prudent lorsqu'on dépose un revêtement avec une torche Eutalloy. Quelque soit le mode de refroidissement employé, il y a un risque de formation de martensite qui provoque une fissuration.

A notre avis, il faut une étude plus poussée sur ce type de substrat.

# Liste des figures et des tableaux

## Liste des figures

### Chapitre 1 : projection thermique

Figure 1.1. Principe fondamental de la projection thermique.....	3
Figure 1.2. Microstructure d'un dépôt projeté thermiquement.....	4
Figure 1.3. Projection à la flamme.....	4
Figure 1.4. Schéma du procédé de projection par flamme.....	5
Figure 1.5. Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil.....	6
Figure 1.6. Principe de la projection à flamme par fil.....	6
Figure 1.7. La projection par le Pistolet Eutalloy (super Jet-S).....	7
Figure 1.8. Principe de la projection par plasma à l'air.....	8
Figure 1.9. Schéma de principe de la projection thermique du système H.V.O.F.....	10
Figure 1.10. Principe du fonctionnement d'un canon à détonation .....	10
Figure 1.11. Schéma du dispositif de projection à l'arc électrique.....	12
Figures 1.12. Mécanismes d'écrasement des particules.....	13
Figure 1.13. Grenailleuse.....	15
Figure 1.14. Coupe du dépôt projeté thermiquement.....	16
Figure 1.15. Microstructures des dépôts réalisées par projection thermique.....	17
Figure 1.16. Micrographie de l'interface du dépôt.....	17

### Chapitre 2 : Généralités sur les aciers et les traitements thermiques

Figure 2.1. Diagramme d'équilibre des aciers au carbone.....	27
--------------------------------------------------------------	----

### Chapitre 3 : Techniques Expérimentales

Figure 3.1. Microstructure de XC38 (Ferrite + Perlite) de 0.385 % C.....	30
Figure 3.2. Microstructure initiale de l'acier 42CrMo4 .....	31
Figure 3.3. Micrographies optiques de l'acier X30Cr13 non traité .....	32
Figure 3.4. Guillotine.....	33
Figure 3.5. Médaille circulaire.....	33
Figure 3.6. Grenailleuse.....	34



Figure 3.7. La projection par le Pistolet Eutalloy (super Jet-S).....	35
Figure 3.8. Dépôt de 05 couches avec refusion par la torche et Réalisé par la poudre chrome tec, Refroidissement par (air et eau).....	36
Figure 3.9. Dépôt de 05 couches avec refusion par traitement thermique et Réalisé par la poudre chrome tec, Refroidissement par (air et eau).....	36
Figure 3.10. Appareil de mesure des couches de revêtements.....	37
Figure 3.11. Le four utilisé pour le traitement de mise en solution.....	38
Figure 3.12. micro-tronçonneuse.....	39
Figure 3.13. Découpage des médailles revêtues.....	40
Figure 3.14. Enrobeuse.....	40
Figure 3.15. Polisseuse.....	41
Figure 3.16. Polisseuse de finition.....	41
Figure 3.17. Microscope optique utilisé pour l'analyse métallographique.....	42
Figure 3.18. Duromètre.....	43

#### **Chapitre 4 : Résultats et interprétations**

Figure 4.1. Dépôt de 05 couches sans et avec refusion d'un acier au carbone.....	44
Figures 4.2. Coupe transversale de revêtement déposé sur un acier au carbone XC38.....	46
Figures 4.3. Coupe transversale de revêtement déposé sur un acier au 42CD4.....	47
Figures 4.4. Coupe transversale de revêtement déposé sur un acier au X30CR13.....	48
Figures 4.5. Les courbes de la variation de dureté des revêtements d'acier XC38.....	51
Figures 4.6. Les courbes de la variation de dureté des revêtements d'acier 42CD4.....	52
Figures 4.7. Les courbes de la variation de dureté des revêtements d'acier X30CR13.....	53

#### **Liste des tableaux**

Tableau 1.1. Les caractéristiques particulières des procédés de projection thermique.....	14
Tableau 2.1. Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés.....	22
Tableau 3.1. Teneurs en masse des impuretés présentes dans l'acier XC38.....	30
Tableau 3.2. Composition chimique en % de 42 Cr Mo 4 (42 CD 4).....	31
Tableau 3.3. Composition chimique en % de X30 Cr13.....	31

Tableau 3.4. Les caractéristiques de la poudre utilisées.....	32
Tableau 3.5. Les paramètres de la projection fusion – refusion.....	35
Tableau 3.6. Les échantillons réalisés.....	37
Tableau 3.7. Programme de traitement thermique appliqué.....	39
Tableau 4.1 Epaisseurs des revêtements.....	45
Tableau 4.2. Les résultats de la dureté Hv moy des substrats.....	49
Tableau 4.3. Les résultats de la dureté Hv moy des revêtements.....	50

# **Chapitre 1**

## **Projection thermique**

## 1. Projection thermique

### 1.1. Historique

La projection thermique occupe une place considérable dans le monde des traitements de surface. Son apparition date de 1909 grâce à l'invention de l'ingénieur suisse Schoop, portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme. Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'Aluminium), ou encore en décoration (dépôts de bronze). Dès 1914 également des essais de projection par arc électrique furent réalisés [1, 2, 3].

Les techniques de projection thermiques se développent suivant trois axes [3] :

- L'augmentation de l'énergie cinétique des particules ;
- L'amélioration de la productivité de projection ;
- Le meilleur contrôle d'atmosphère de projection ;

### 1.2. Principe de la projection thermique

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique à l'aide d'une source de chaleur, puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie [1].

La matière à déposer sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma) [1, 3]. Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir (figure 1.1).

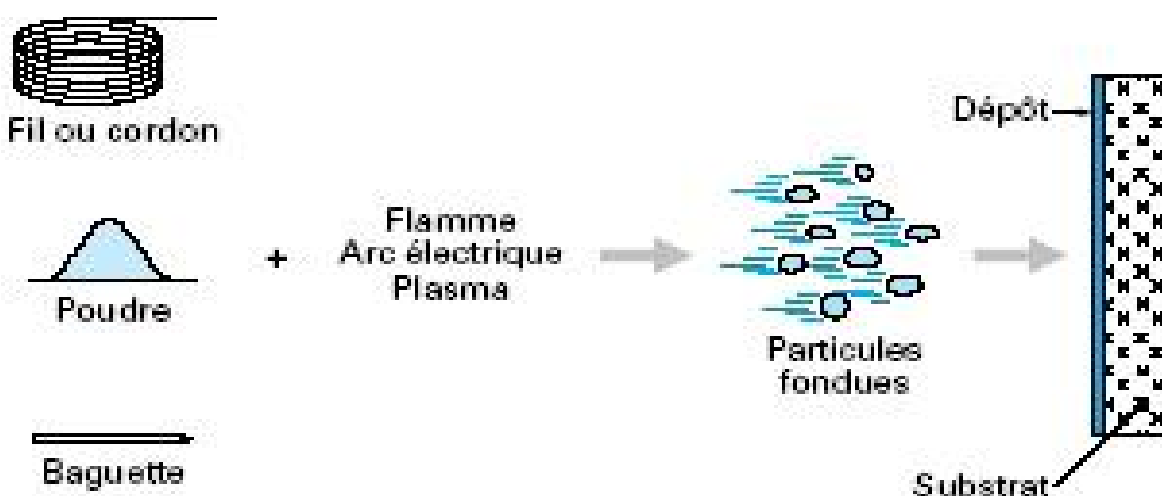


Figure 1.1. Principe fondamental de la projection thermique [1].

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est de type lamellaire [1, 3], comme c'est décrit dans la figure 1.2.

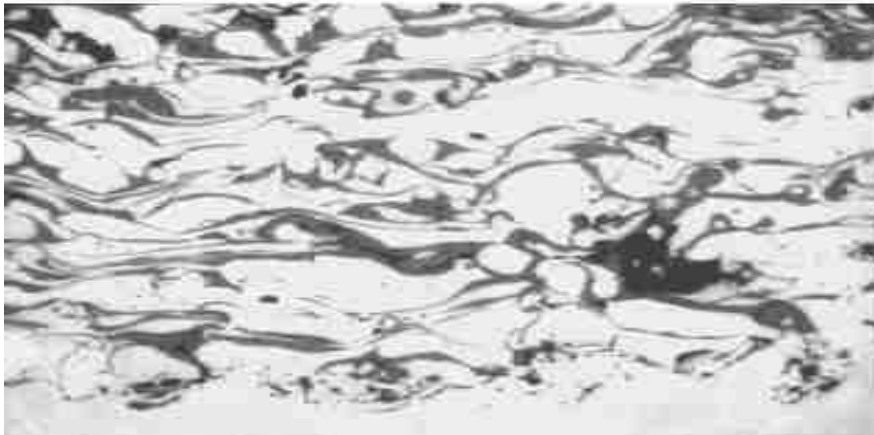


Figure 1.2. Microstructure d'un dépôt projeté thermiquement [1].

### 1.3. Procédés de la projection thermique

#### 1.3.1. La projection à la flamme

Dans ce type de projection thermique (figure 1.3), une réaction chimique est utilisée comme source d'énergie. Les matériaux à projeter sont introduits soit sous forme de poudre soit sous forme de fil, de tige ou de cordon (pour les céramiques dans ces deux derniers cas). Dans le premier cas, la température de fusion ne peut dépasser 0,7 à 0,8 fois la température de la flamme alors que dans le second, il est possible de fondre des matériaux dont le point de fusion est de 0,95 fois la température de flamme. Les matériaux déposés par cette technique sont usuellement des métaux, des alliages, des cermets ou des céramiques à basse température de fusion. [4].



Figure 1.3. Projection à la flamme [5].

### 1.3.1.1. Projection à flamme-poudre

La projection flamme poudre est certainement le procédé le plus simple de tous les procédés de projection thermique. Il consiste à introduire une poudre à travers l'orifice central d'une buse-brûleur, la poudre fond et est entraînée par les gaz oxygène-carburant (généralement oxygène-acétylène ou oxygène-hydrogène) sur la pièce à revêtir. Ce système de projection est peu énergétique. Les revêtements réalisés par ce procédé contiennent un taux d'oxydes élevé ainsi qu'une forte porosité pouvant approcher 20%. La qualité des revêtements dépend aussi de la qualité des poudres. Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure suivante 1.4. L'utilisation de débit-litres pour contrôler les débits de gaz est un facteur important [2].

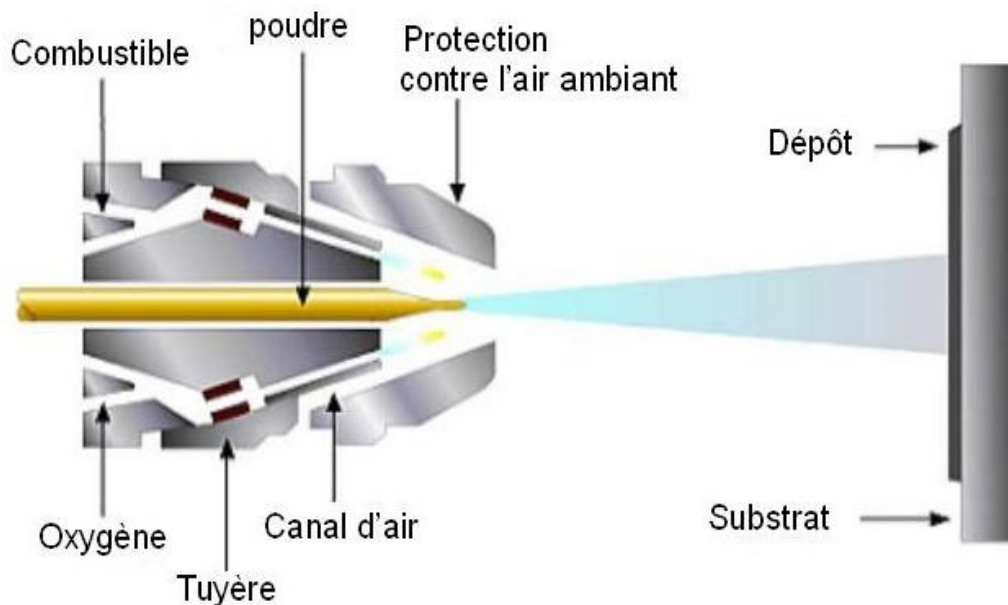


Figure 1.4. Schéma du procédé de projection par flamme [6].

### 1.3.1.2. Projection à flamme-fil

Dans ce procédé, le matériau d'apport est sous forme de fil, de baguette ou de cordon. Il utilise les mêmes 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 [1, 2].

Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres (figure 1.6).

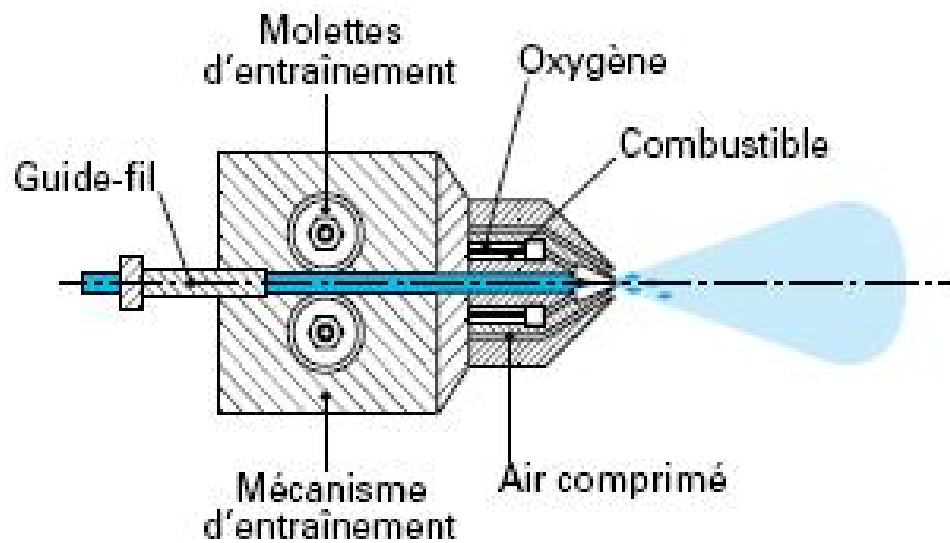


Figure 1.5. Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil [1].

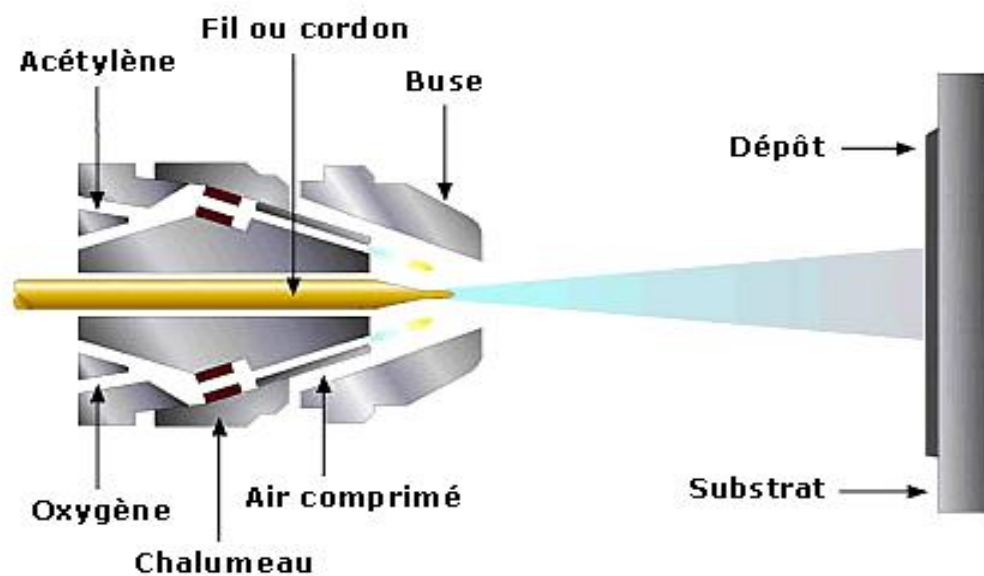


Figure 1.6. Principe de la projection à flamme par fil.

L'application de la projection flamme-fil :

Cette technique permet de projeter des métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Ni, Mo), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques ( $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3 - TiO_2$ ,  $ZrO_2$  avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguettes.

### 1.3.1.3. La projection à flamme fusion-refusion (Torche Super-Jet)

Principe :

La torche à flamme Eutalloy est un chalumeau oxy-acétylène destiné pour la projection thermique qui dépose des revêtements sous forme de poudre anti-usure ou un rechargement dur (figure 1.7). Les poudres alliées sont projetées sur la pièce à revêtir et suivies d'un chauffage pour les fusionner. Dans ce type de déposition, l'adhérence des revêtements est de type métallurgique. Le revêtement dense n'est pas affecté par la dilution et conserve toutes ses propriétés intrinsèques [8].

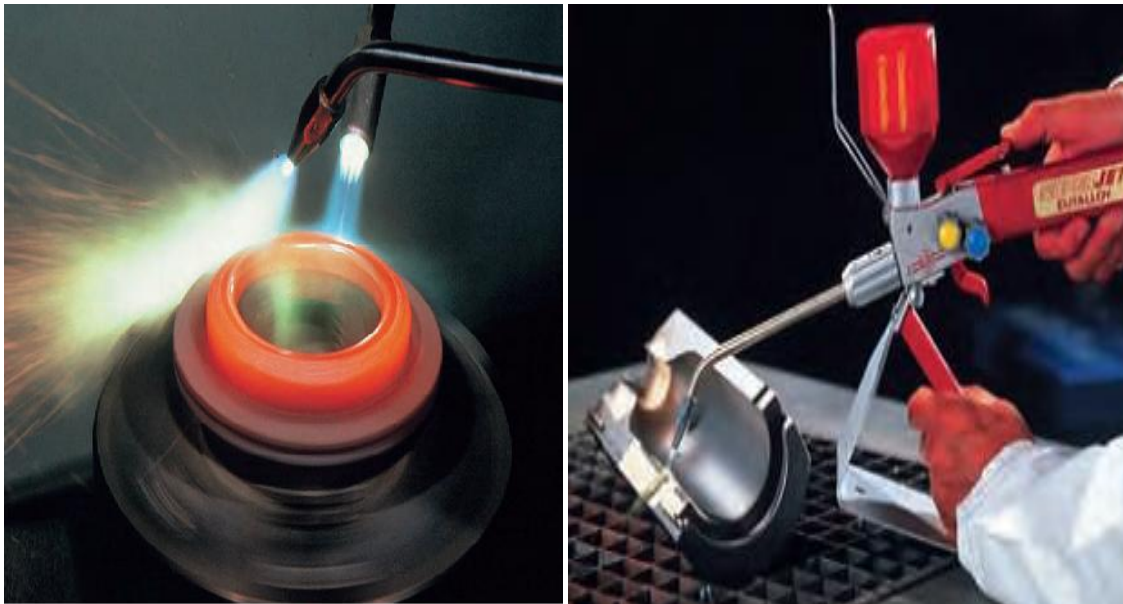


Figure 1.7. La projection par le Pistolet Eutalloy (super Jet-S).

Les applications de la projection à flamme Eutalloy :

Cette technique de projection est polyvalente et rapide, elle est très utilisable dans toutes les positions sur un large éventail de métaux de base y compris les aciers, aciers alliés, aciers inoxydables et la fonte. Elle permet aussi de projeter plusieurs poudres telles que les alliages de nickel-chrome, les carbures « carbure de tungstène ».

### 1.3.2. La projection plasma

Dans la projection plasma, le matériau à déposer est introduit, au moyen d'un plasma thermique créé par l'ionisation partielle d'un gaz plasmagène, dans le jet d'une torche à plasma sous forme de grains de poudre de 20 à 100  $\mu\text{m}$  de diamètre (figure 1.8) [3, 7].



Les torches conventionnelles utilisées en projection plasma sont constituées d'une cathode de tungstène en forme de tige et d'une anode concentrique de cuivre qui assure également le rôle de tuyère. Le gaz plasmagène circule entre ces deux composants [7, 9].

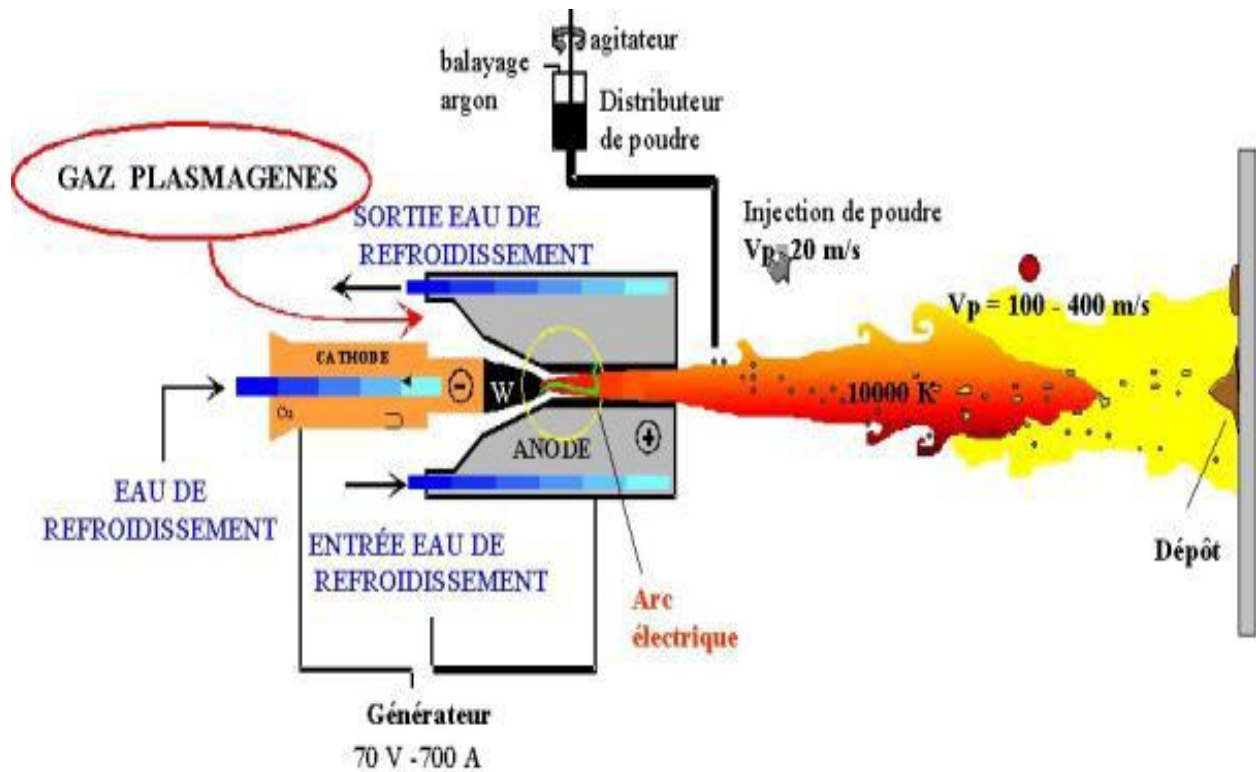


Figure 1.8. Principe de la projection par plasma à l'air [7].

Le dispositif de projection est installé dans une enceinte dans laquelle on pratique une forte dépression (à environ  $P = 0,05$  bar). Ceci permet d'éviter l'oxydation des particules projetées, d'augmenter la vitesse des gaz dans le jet de plasma et d'allonger la flamme qui augmente la vitesse d'impact des particules fondues et, par voie de conséquence, diminue la porosité de la couche formée [2].

### 1.3.3. La projection thermique à froid (cold spray)

Principe :

Cette technique, communément appelée «cold spray», consiste à accélérer le matériau sous forme de poudre à une vitesse supersonique pour obtenir une déformation suffisante à l'impact sur le substrat afin de permettre la formation d'un revêtement. Sa particularité réside

dans la faible température des gaz porteurs, inférieure dans certains cas à 600 °C, ce qui permet au matériau de rester à l'état solide.

Ce procédé permet d'éliminer ou de minimiser les effets néfastes communs aux techniques traditionnelles de projection thermique, tels que l'oxydation à haute température, l'évaporation, la recristallisation, les contraintes résiduelles... Les dépôts réalisés peuvent avoir des épaisseurs comprises entre 10 µm et 10 mm. Cette technique permet de conserver la structure initiale de la poudre et d'obtenir des dépôts denses avec très peu d'impuretés [10].

L'application de la projection cold spray :

La déformation à grande vitesse des particules au moment de l'impact permet d'obtenir des dépôts de grande compacité. Cette technique de dépôt se limite aux métaux et alliages ductiles comme Zn, Sn, Ag, Cu, Al, Ti, Ni-Cr, Cu Al... ainsi qu'aux polymères ou mélanges supérieurs à 50 % de matériaux ductiles et de métaux cassants ou céramiques [11].

Cette technologie est principalement utilisée pour résoudre les problèmes de corrosion, d'usure ou de conductivité électrique, avec des applications dans de nombreux domaines tels que le biomédical, l'aérospatial, la chimie ou l'électronique. A titre d'exemple, la conductivité électrique des dépôts de cuivre obtenus par ce procédé atteint 90 % de celle du métal massif, ce qui est très supérieur aux 50 % obtenus par les procédés classiques de projection à la flamme ou HVOF.

#### **1.3.4. Projection à haute vitesse (HVOF)**

Cette variante des procédés flamme classiques réside dans la vitesse très élevée acquise par les particules projetées grâce aux importantes pressions régnant dans la chambre de combustion [1].

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

1. Le procédé HVOF: High Velocity Oxygene Fuel;
2. Le procédé HVAF : High Velocity Air Fuel.

La technique de la projection HVOF a été développée à la fin des années 1970 et début des années 1980. Le procédé HVOF utilise la combustion de deux gaz: d'une part, l'oxygène O<sub>2</sub> et d'autre part un gaz tel que le propane, propylène, tétrène ou hydrogène, (figure 1.9).

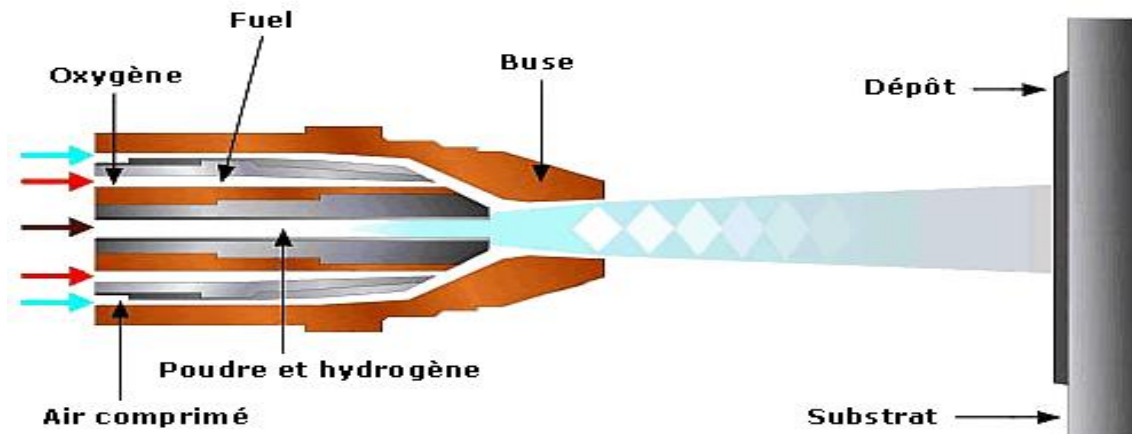


Figure 1.9. Schéma de principe de la projection thermique du système H.V.O.F [9].

Le procédé HVAF utilise quant à lui un mélange kérosène - air comprimé pour la combustion. Les gaz de combustion pénètrent dans la chambre de combustion puis sont éjectés du pistolet sous l'effet de la pression élevée (5 à 7 bar). La poudre est injectée à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme [1].

### 1.3.5. Projection hypersonique à tir discontinu

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport (sous forme de poudre) dans un tube appelé canon à détonation (figure 1.10), en même temps que le gaz de combustion (oxygène, acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de huit allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée et éjectée à très grande vitesse (950m/s) par l'onde de choc créée [1], le régime de projection est donc discontinu. Entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué.

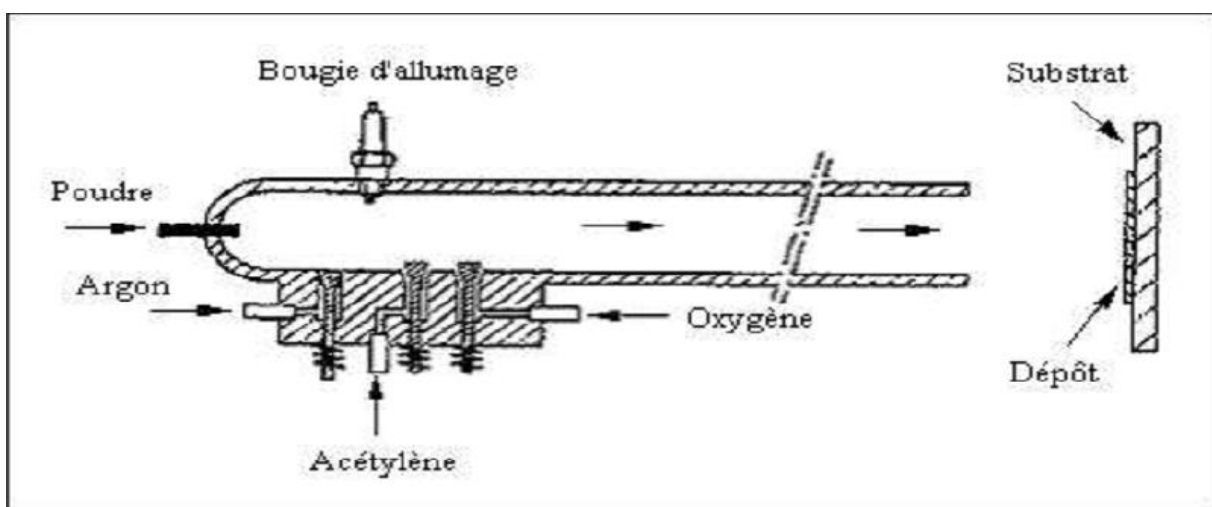


Figure 1.10. Principe du fonctionnement d'un canon à détonation [6].

### 1.3.6. Projection à l'arc électrique

La projection à l'arc est une technique relativement économique qui compte de nombreuses applications industrielles. Elle est utilisée industriellement en Europe depuis 1945 [2, 3].

Le principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables et à atomiser le matériau fondu par un jet de gaz comprimé (généralement de l'air) qui le projette sur le substrat (figure 1.11). Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500 A. Ils sont essentiellement constitués de deux parties:

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

Le pistolet est arrangé de sorte que les fils forment un petit angle entre eux et se réunissent à un point, permettant une atomisation axiale du jet à l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes permettant, d'une part, le positionnement du fil avant son entrée dans la zone de fusion et, d'autre part, la transmission du courant électrique aux fils.

Une buse située derrière le point d'intersection des fils, dirige un flux de gaz comprimé à grande vitesse sur l'extrémité des fils en fusion, et propulse le matériau atomisé sur le substrat [2].

La température de l'arc, d'environ 6000K dans l'aire à pression ambiante, est largement au-dessus du point de fusion des matériaux projetés, ce qui peut entraîner une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes. Cependant, ce dernier peut aider à créer des zones d'interaction métallurgique dans le dépôt ou à l'interface dépôt substrat et des zones de diffusion améliorant, ainsi, sensiblement l'adhérence et la cohésion des dépôts [2].

La température atteinte et l'énergie cinétique élevée acquise par les particules grâce au jet d'air comprimé ( $V = 250$  m/s) permettent des projections avec des caractéristiques de dépôts performantes [1].

- Porosité de 5 à 10 % ;
- Epaisseur des dépôts de 0,2 à 3 mm ;
- Force d'accrochage : 20 à 40 MPa ;
- Taux horaire de dépôt de 5 à 30 kg/h.

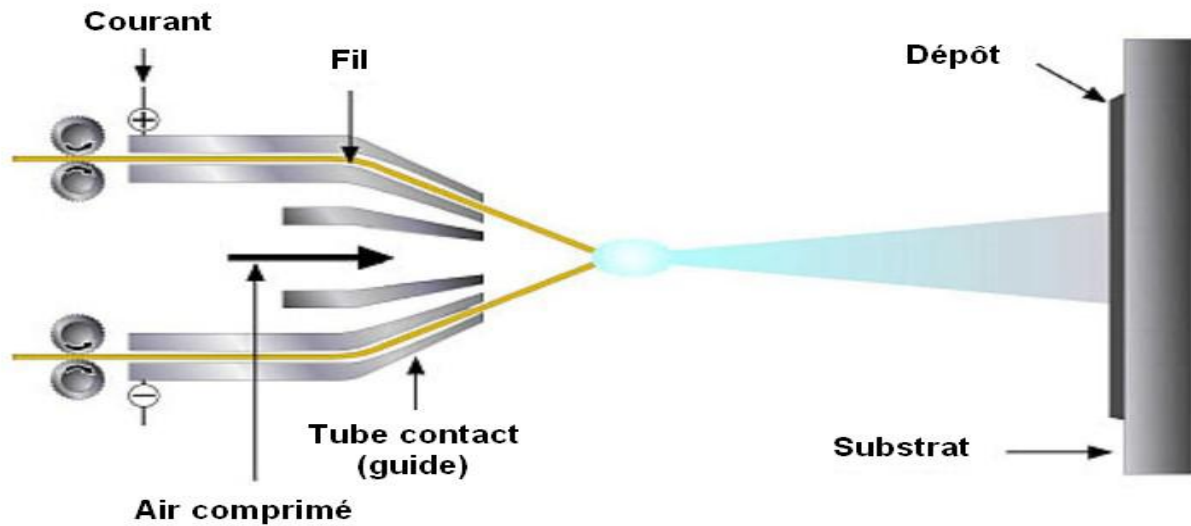


Figure 1.11. Schéma du dispositif de projection à l'arc électrique [6].

### 1.3.6.1. Les avantages et les inconvénients du procédé

Les principaux avantages de ce procédé sont les suivants :

- Un procédé économique : la puissance électrique est de l'ordre de 5 à 10 kW et le gaz utilisé comme gaz d'atomisation est généralement de l'air comprimé ;
- Un taux de dépôt élevé : 5- 40 kg/h ;
- Un rendement énergétique important: 60 à 70 % de la puissance électrique fournie est utilisée pour fondre les fils ;
- Avec un fil plein le matériau projeté est complètement fondu ;
- Le pistolet à arc électrique est très maniable et léger (moins de 2Kg).

Les principaux inconvénients de la projection par arc électrique sont les suivants :

- Un jet de particules divergeant qui se traduit par une tache d'impact sur le substrat relativement large (25 à 50mm de diamètre à 100mm de la sortie de la torche) ;
- Des dépôts présentant une porosité (de l'ordre 10%) et une teneur en oxyde (jusqu'à 25%) relativement élevées par rapport aux dépôts obtenus avec les autres techniques de projection thermique ;
- Une perte des composants les plus volatils du fait de la température de l'extrémité des fils est au delà de la température de fusion ;
- Des fluctuations élevées de tension dues à une variation continue de la distance inter-électrode à cause de la différence de fusion entre le fil cathode et le fil anode, ce qui rend le procédé instable [2, 3].

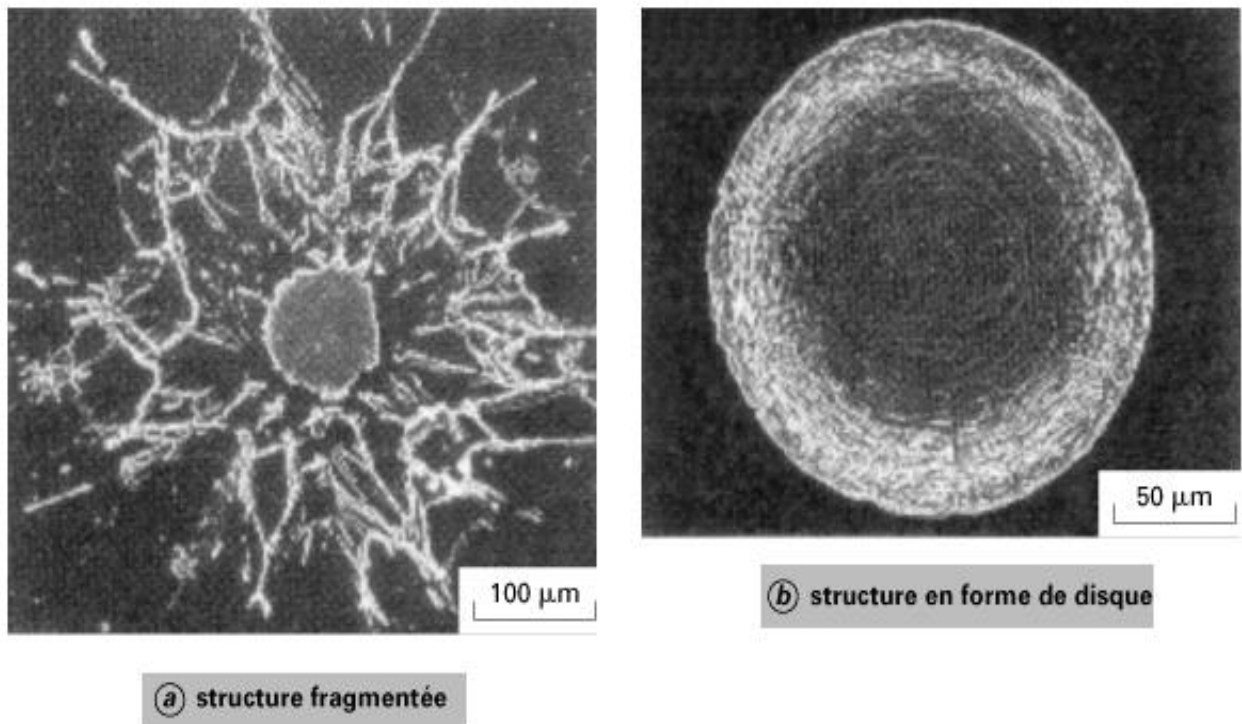
### 1.3.6.2. Formation du dépôt

La formation du dépôt est obtenue par l'impact, la déformation et la solidification rapide des particules sur le substrat. Le revêtement présente une structure lamellaire comportant éventuellement des oxydes, des micro-porosités, des fissurations inter et intra lamellaires, des zones de contact entre lamelles et avec le substrat plus ou moins parfaites [2].

La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques :

1. L'écrasement de chaque gouttelette ;
2. La formation d'une couche de matériau, résultant de la cinématique liée au processus (mouvements relatifs torche/pièce).

Les mécanismes d'étalement et de solidification des particules sont relativement complexes, car ils dépendent de l'énergie cinétique et thermique des gouttelettes, de leur viscosité et de leur mouillabilité vis à vis du substrat, de la nature et de l'état de surface du substrat ainsi que de sa température [2, 3]. Comme c'est décrit dans la figure 1.12.



Figures 1.12. Mécanismes d'écrasement des particules [1].

Deux types de structures existent après impact :

1. Une structure « fragmentée », constituée d'un disque central de faible diamètre et de ramifications dirigées vers l'extérieur, et reliées ou non à celui-ci;

2. Une structure en forme de disque, constituée à partir d'un écoulement continu et stable du liquide, allant du point d'impact de la particule vers la périphérie.

### 1.4. Comparaison des procédés

Le tableau ci-dessous 1.1 récapitule les caractéristiques particulières à chaque procédé de projection, sachant que le choix doit se faire en tenant compte du résultat à obtenir et des paramètres énoncés.

Tableau 1.1. Les caractéristiques particulières des procédés de projection thermique [8].

Caractéristiques	Flamme Poudre	Flamme fil-cordon	Arc électrique	Plasma ASP*	HVOF	Canon à détonation
Source de chaleur	Flamme	Flamme	Arc électrique	Plasma	Flamme	Flamme
Température de la source chaude (°C)	3000	3000	6000	12000	3000	3000
Vitesse d'écoulement (m/s)	80 – 100	100 – 300	200 – 300	300 – 1200	400 – 2000	900 – 2000
Transport des Particules	Gaz Flamme	Air comprimé	Air comprimé	Gaz Flamme	Gaz flamme	Gaz Flamme
Vitesse des particules (m/s)	40	150	150	200	700	950
Forme du produit d'apport	Poudre	Fil-cordon	Fil	Poudre	Poudre	Poudre
Taux horaire de dépôt (kg/h)	1 à 3	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Taux d'oxyde (%)	6 – 12	4 – 8	1 – 10	1 – 5	0,5 – 2	0,1 – 0,5
Rendement moyen* (%)	50	70	80	70	70	70
Force d'adhérence (MPa)	20 à 40	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Taux de porosité (%)	10 à 20	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0,5 à 2	0,5 à 2
Epaisseur déposée (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,2 à 3	0,05 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1
Exemples de matériaux d'apport	Métaux Cermets Céramiques	Métaux Cermets Céramiques	Métaux Fils fourrés	Métaux Alliages Céramiques	Métaux Alliages Cermets	Cermets Céramiques

ASP = Air Plasma Spraying, (projection dans l'air ambiant).

\* Rendement moyen = Pourcentage du matériau d'apport projeté qui adhère au substrat.

## 1.5. Préparation du substrat

Dans le cas de la projection thermique, l'état physico-chimique de la surface du substrat joue un rôle très important sur la structure des lamelles, la formation du dépôt et, par conséquent, son adhérence. Cette propriété est un critère de qualité important, car il est en effet inutile de réaliser un revêtement aux propriétés remarquables, si celui-ci n'adhère pas au substrat [2].

Les techniques de préparation de surface doivent permettre de nettoyer les matériaux et de modifier l'état géométrique de leur surface. La réalisation d'un dépôt par projection thermique impose de réaliser une série d'opérations indispensables dans un ordre bien établi:

- Un dégraissage qui consiste à la destruction et l'élimination de la plupart des impuretés (graisses, inclusions superficielles, etc.) généralement responsables de la mauvaise tenue des revêtements ;
- Un traitement mécanique appelé sablage ou grenailage qui permet la création d'un état de surface rugueux (figure 1.13). En effet, ce traitement permet aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique. Le grenailage se fait généralement à l'aide de particules d'abrasifs, le plus souvent de l'alumine, entraînées par de l'air sous pression et dirigées sur le substrat [1, 2, 12].



Figure 1.13. Grenailleuse [13].



Comme nous avons vu précédemment, suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle du support, on obtiendra un accrochage plus ou moins important. Raison pour laquelle, un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence. Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre et surtout pour les matières plastiques qui ne sont pas conductrices de chaleur.

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

## 1.6. Caractéristiques générales des dépôts

### 1.6.1. Microstructure

Les espèces qui constituent les dépôts sont des particules dont les dimensions varient entre quelques dizaines et une centaine de micromètres. Ces particules entrent en contact avec un substrat à l'état liquide, partiellement liquide ou solide. La microstructure du dépôt résulte de la solidification des particules projetées sur le substrat ou elles se déforment en grains lenticulaires (lamelles) [3].

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

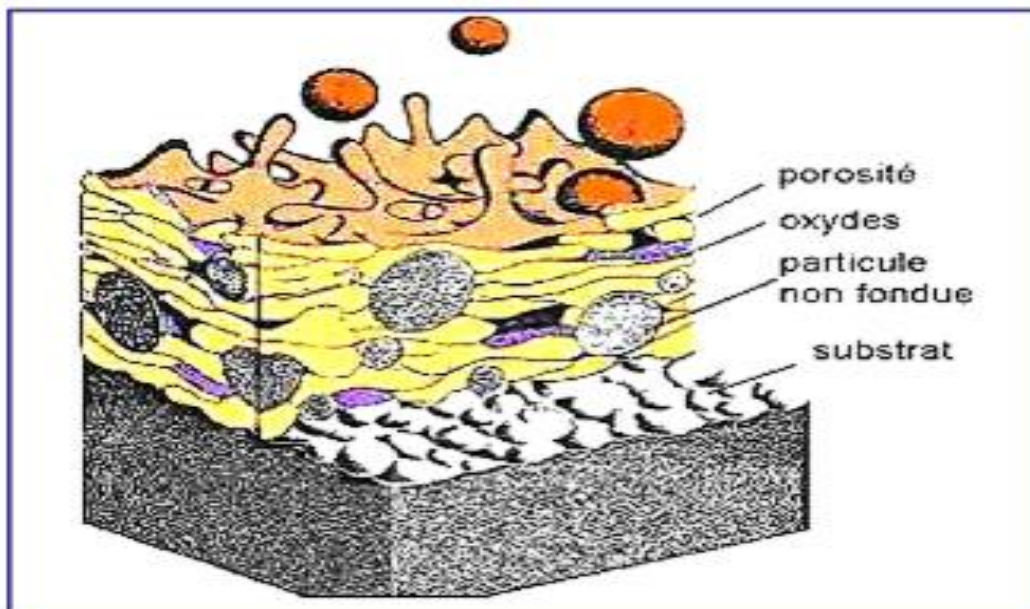


Figure 1.14. Coupe du dépôt projeté thermiquement [6].

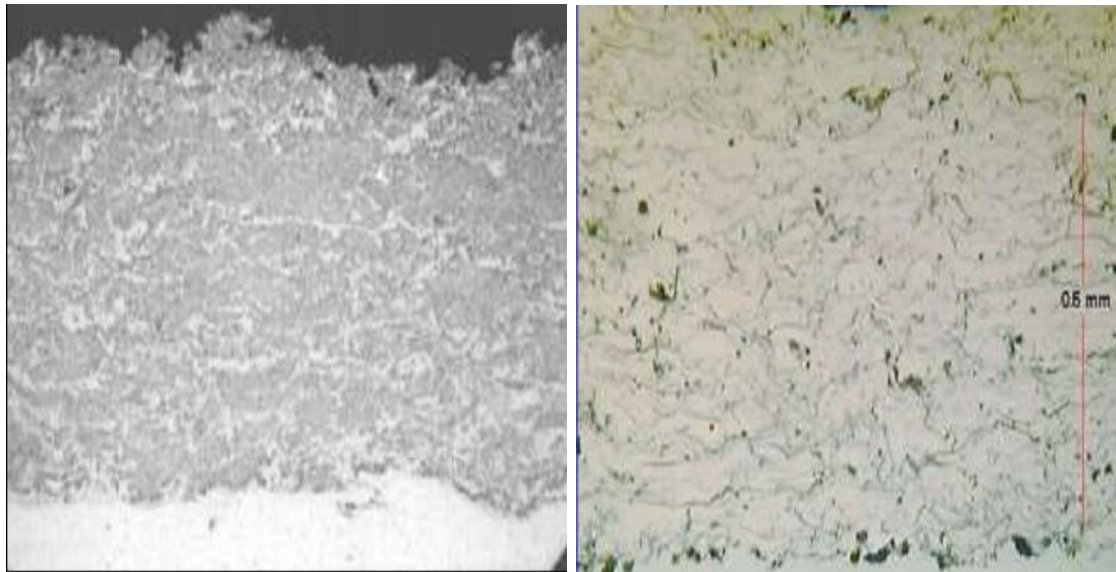


Figure 1.15. Microstructures des dépôts réalisées par projection thermique.

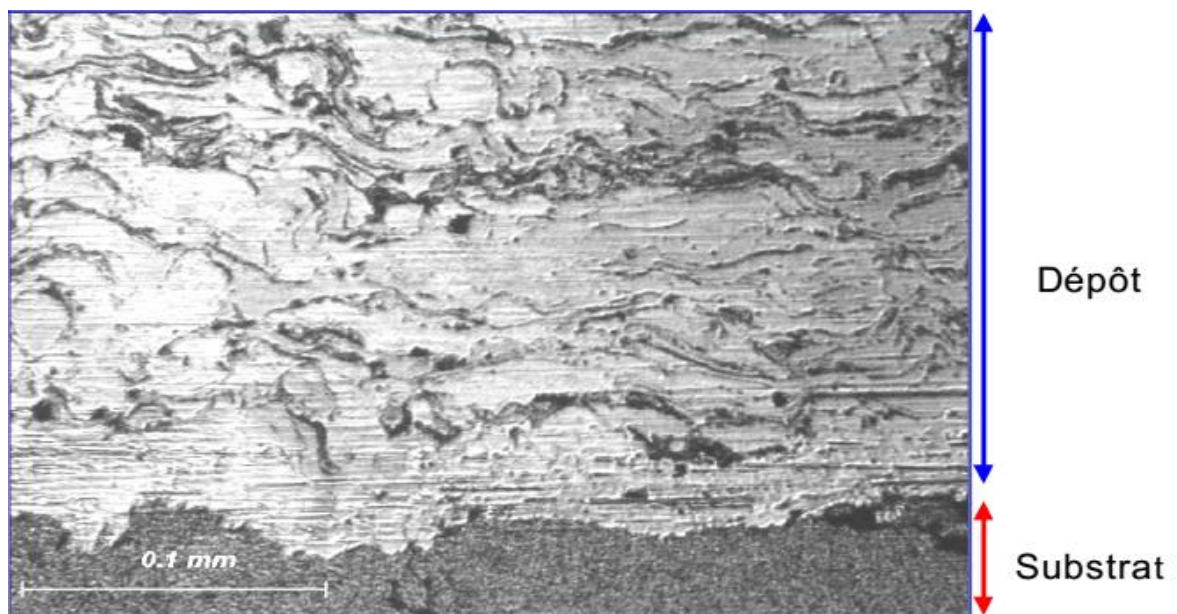


Figure 1.16. Micrographie de l'interface du dépôt.

### 1.6.2. Teneur en oxydes et porosité

Fondamentalement, trois paramètres principaux, la vitesse, la température et la taille de particules, influencent la porosité et la teneur en oxydes des dépôts. La fraction d'oxydes dans le dépôt est inversement proportionnelle au diamètre et à la vitesse de particules et directement proportionnelle à la température de surface des particules.

L'augmentation de la température des particules se traduit par une diminution de leur viscosité et la rugosité du dépôt est réduite [2].

### 1.6.3. L'adhérence

Dans une grande majorité des cas, l'adhérence a un caractère mécanique. Elle est initiée par des particules liquides qui tombent sur les pics de la surface du substrat activée. Les particules se transforment en lamelles qui serrent les pics en se solidifiant. On appelle parfois ce mécanisme l'ancrage mécanique [14].

L'adhérence résulte aussi d'un des mécanismes d'interaction suivants :

- L'interaction physique par les forces de van der Waals,
- L'interaction métallurgique qui se réalise par :
  1. Diffusion réalisée par les lacunes présentes dans une lamelle en train de solidifier ;
  2. Réaction chimique entre une lamelle et un substrat.

L'énergie d'adhésion peut être définie comme la différence entre deux états. Celui où deux surfaces sont libres et celui pour lequel dépôt et substrat sont liés. L'énergie d'adhésion est donc la somme de toutes les interactions interatomiques physico-chimiques à l'interface.

### 1.6.4. Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles dans les dépôts peuvent atteindre des valeurs qui dépassent la résistance du matériau, ce qui provoque la fissuration des dépôts [3]. Elles sont la somme des:

- Contraintes de trempe, qui résultent de la trempe d'une particule individuelle sur le substrat ou sur le dépôt ;
- Contraintes générées au cours d'un passage de la torche ;
- Contraintes thermiques générées lors du refroidissement jusqu'à la température ambiante ;
- Contraintes de transformation de phase ;
- Contraintes mécaniques générées en particulier par les particules qui ne sont pas complètement fondues.

## 1.7. Conditions pour l'obtention d'un bon dépôt

L'obtention d'un revêtement dense et adhérent exige que :

- une fraction importante des particules injectées soient dans un état liquide ou semi pâteux lorsqu'elles atteignent le substrat ou les particules précédemment déposées ;

- les particules fondues aient une vitesse suffisante pour s'étaler et couler sur les irrégularités du substrat ou sur les particules précédemment déposées ;
- une forte adhérence inter particules et particule-substrat soit établie ;
- une sous-couche d'accrochage est souvent projetée avant la projection du dépôt pour permettre une adhésion du revêtement sur le substrat.

Une attention toute particulière doit évidemment être portée à la fusion des particules.

Cette fusion dépendra :

- du niveau de température de la flamme, fonction du mélange de gaz employé ;
- de la quantité de chaleur disponible dans cette flamme ;
- du point d'injection de la poudre dans la flamme ;
- de la vitesse d'injection des particules [15].

## 1.8. Traitement des dépôts après la projection

Les dépôts projetés thermiquement ont beaucoup de défauts (porosité, faible adhérence, phases métastables, rugosité de surface ...) qui peuvent être améliorés par des post traitements :

- Traitement thermique qui inclut le chauffage au four, traitement laser et qui sert surtout à éliminer les phases métastables et améliorer les propriétés mécaniques [16].
- Traitement mécanique, rectification et finition de la surface des dépôts.
- Imprégnation avec les composés organiques et inorganiques.

## 1.9. Conclusion

La projection thermique est une technique de revêtement de surface offrant une très grande flexibilité au niveau des types de matériaux appliqués. Ceci permet d'accroître les propriétés de surface de différentes façons, et d'adresser une multitude de problématiques industrielles. Il est également possible de combiné divers types de matériaux ensemble pour obtenir des propriétés complémentaires, comme, par exemple, un revêtement anti usure et autolubrifiant.

Les applications de la projection thermique sont très variées revêtement contre l'usure, protection contre la corrosion et la chaleur, revêtement à propriétés électriques, réparation de surfaces endommagées... Et ces procédés sont utilisés dans de nombreux secteurs : mécanique

(rouleaux de laminoirs, guides fils, pompes, pistons...), aéronautique (aubes de turbine, blindage, barrière thermique...), biomédical (prothèses, couches biocompatibles...), industrie nucléaire (protection contre la corrosion et l'usure, réacteurs chimiques...).

# **Chapitre 2**

## **Généralités sur les aciers et les traitements thermiques**

## 2.1. Introduction

L'étude bibliographique réalisée tout au long de ce travail est exposée dans le deuxième chapitre de ce manuscrit. Elle a été rédigée dans la perspective de répondre à plusieurs questions inhérentes à ce travail de master: présentation des aciers de construction mécanique, description d'une opération de traitement thermique, conséquences thermomécaniques et métallurgiques du traitement thermique, présentation des travaux existants.

Les aciers sont d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Ce progrès est essentiellement dû à la présence d'une vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers, en recourant à l'addition d'éléments d'alliages et aux différents mécaniques, thermiques et chimiques [17].

## 2.2. Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer et de carbone renfermant au maximum 2 % de ce dernier élément. L'acier est un métal ductile, il peut subir des changements de forme par compression ou extension à chaud ou à froid. Il est caractérisé par une propriété fondamentale : il « prend la trempe », c'est-à-dire qu'il est susceptible d'acquérir une grande dureté lorsqu'il est chauffé à une température suffisamment élevée et refroidi à une vitesse assez grande [18].

## 2.3. Classification des aciers

Les alliages à base de fer (aciers et fontes) jouent et continuent de jouer un rôle capital sur le plan technologique. Ils constituent en masse près de 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques. Plusieurs facteurs expliquent cette importance : les alliages ferreux se prêtent facilement à une production en masse, ils sont bon marché et on peut les acquérir sous des formes très variées grâce à la diversité des traitements thermiques et des éléments d'addition. Ils ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique [18].

Nous pouvons distinguer :

- les aciers d'usage général ;
- les aciers de traitement thermique ;
- les aciers à outils ;
- les aciers inoxydables ;

### 2.3.1. Les aciers ordinaires ou aciers au carbone

Ces aciers sont définis principalement par leurs propriétés mécaniques. Leur résistance mécanique est de l'ordre de 500 MPa pour la rupture et de 350 MPa pour la limite élastique ; ils sont ductiles puisque leur teneur en carbone est faible (elle ne dépasse pas 0,2 %) ; l'allongement relatif avant rupture est de l'ordre de 25 %. Ces aciers sont produits sous la forme de profilés (produits longs) ou sous la forme de tôles (produits plats) en fonction de leur utilisation.

Les produits longs comprennent les poutrelles, les profilés de sections diverses, les fers marchands, les tubes, les fils, les câbles et les rails.

Les produits plats comprennent les tôles fortes, les plaques (épaisseurs supérieure à 5 mm), les tôles minces pour l'emboutissage. Ces pourcentages les teneurs limitent de ces éléments dans ces aciers.

Tableau 2.1. Aciers ordinaires ou aciers au carbone non alliés [19].

Nuance	Pourcentage de carbone	Résistance Rm (MPa) état recuit	Emplois
extra-doux	$C < 0,15$	330 – 420	tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge
doux	$0,15 < C < 0,20$	370 – 460	charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons, fils ordinaires
demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	480 – 550	pièces de machines pour applications mécanique, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
demi-dur	$0,30 < C < 0,40$	550 – 650	petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission
dur	$0,40 < C < 0,60$	650 – 750	pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulée et traitées
extra-dur	$0,60 < C$	>750	outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts



### 2.3.2. Aciers à outils

Toutes les étapes de la fabrication nécessitent des outils dont les conditions d'utilisation peuvent être très variées (chocs, tranchant, dureté). La teneur en carbone est en général assez élevée (de l'ordre de 0,6 à 1 %) sauf pour les outils travaillant aux chocs (moule d'injection pour matière plastique). Ce sont en général des aciers fortement alliés de chrome (entre 5 et 12 %) pour éviter la corrosion. Ils doivent posséder la dureté la plus élevée possible, une très bonne résistance à l'usure et une grande ténacité [20].

### 2.3.3. Les aciers de traitement thermique

On distingue 3 grands types de traitement thermique : les recuits, les traitements dans la masse (trempe, revenu, austénisation) et les traitements de surface (trempe superficielle, nitruration, cémentation). Ces aciers sont définis par leur composition chimique. Celle-ci détermine le type de traitement qu'on peut leur appliquer. Les aciers de traitement thermique sont soit des aciers au carbone (sans autre élément d'addition que les éléments d'accompagnement, Mn et Si), soit des aciers alliés contenant en proportions variables, un ou plusieurs éléments d'addition (Cr, Ni, Mo, V, ...) ; le chrome favorise le durcissement et augmente la résistance à la corrosion ; le nickel augmente la ténacité à basse température ; le molybdène augmente la résistance mécanique et la dureté ainsi que la résistance au fluage, ...[18]

### 2.3.4. Les Aciers inoxydables

Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages à base de fer dont la principale propriété est la résistance à la corrosion généralisée. Toutefois, bien qu'on les qualifie d'inoxidables, ces aciers ne sont pas dans tous les cas totalement exempts d'une possibilité de corrosion. Par exemple, les aciers inoxydables austénitiques (les plus courants), présentent dans certains cas le phénomène de corrosion intergranulaire, quand ils sont maintenus au contact prolongé de certains réactifs. Celui-ci provient d'une déchromatisation des régions voisines des frontières des grains provoquée par la formation de carbures de chrome et de fer dans les joints intergranulaire. Le chrome est l'élément essentiel qui, à des teneurs supérieures à environ 12 % rend l'acier inoxydable en favorisant, en milieu oxydant, la formation d'un film passif à sa surface [18].

On utilise ce type d'acier en visserie, pour les ressorts, pour les arbres de pompes, la coutellerie, les soupapes... Dans la suite, nous allons brièvement décrire les différents types d'aciers inoxydables.

#### **2.3.4. 1. Aciers inoxydables austénitiques**

Les aciers inoxydables austénitiques contiennent généralement entre 0,02% et 0,1% carbone, 17 à 20% de chrome, 7 à 25% de nickel et 2 à 5% molybdène [21, 22].

La teneur en nickel sert à donner et à conserver la structure austénitique à ces aciers même à température ambiante, en plus d'augmenter leur résistance à la corrosion. Les aciers austénitiques sont ductiles, résistants au choc et non-magnétiques; ils ne se trempent pas, mais peuvent acquérir une certaine dureté par déformation à froid. A l'état recuit, ils possèdent à ce moment une plus grande ductilité et une meilleure ténacité que les aciers ordinaires. Ils possèdent une très bonne résistance à la corrosion [23].

#### **2.3.4. 2. Aciers martensitiques**

Comme pour tous les aciers non ou faiblement alliés, le carbone joue un rôle fondamental. Pour ces aciers, la teneur maximale en carbone est limitée à 1.2%. Leur teneur en chrome est comprise entre 11.5 et 18%, et ils peuvent contenir jusqu'à 6% de nickel et jusqu'à 1.5% de molybdène [23,24].

#### **2.3.4. 3. Aciers ferritiques**

Les aciers inoxydables ferritiques sont caractérisés par une remontée de la température de transition a-d du diagramme de phase, qui fait qu'en pratique leur structure reste ferritique dans tout l'intervalle de température de la gamme thermomécanique. Leur teneur en chrome est de 12-20% pour les aciers inoxydables ferritiques et supérieure à 20% pour les aciers inoxydables superferritiques [22, 23].

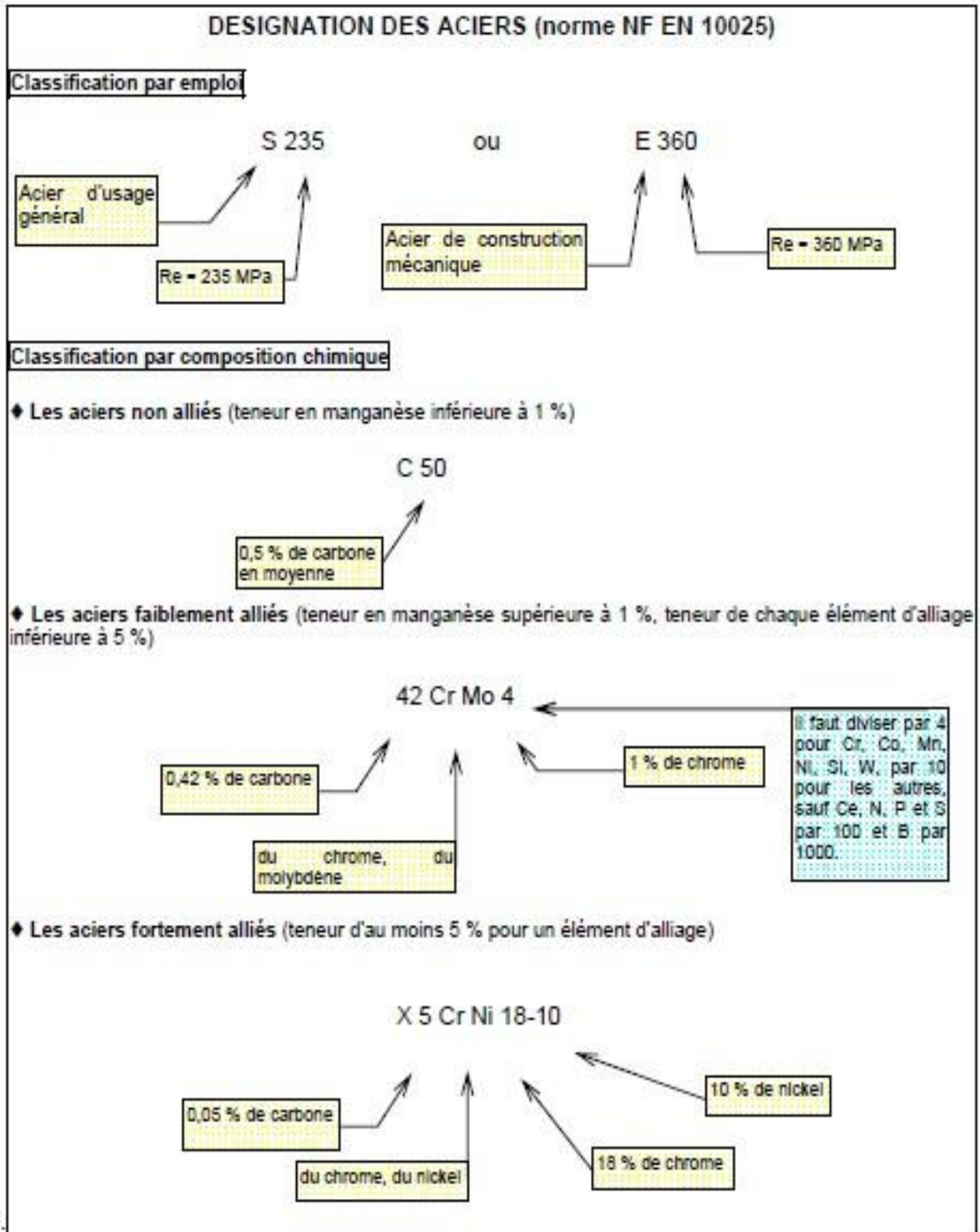
### **2.4. Les éléments d'alliages**

Les éléments d'alliages, et leurs proportions, peuvent modifier le diagramme d'équilibre fer-carbone. Ils peuvent être regroupés en deux familles :

- la première est la famille des éléments alphas : ils favorisent la prépondérance à température ambiante d'une structure cristallographique cubique centrée. Ce sont notamment : le chrome, le molybdène, le silicium, le titane, le niobium, le vanadium, le tungstène, l'aluminium et le tantale.

- La seconde est la famille des éléments gammagène : ils favorisent la prépondérance à température ambiante d'une structure cristallographique cubique à face centrée. Ce sont notamment : le nickel, le carbone, l'azote, le cobalt et le manganèse [24,25].

## 2.5. Désignation des aciers



## 2.6. Les propriétés des métaux

Les matériaux métalliques, comme leur nom l'indique, comportent des liaisons essentiellement métalliques, c'est-à-dire en partie assurées par des électrons délocalisés. Ces derniers sont responsables des bonnes propriétés de conductivité thermique et électriques des métaux. Les métaux sont généralement paramagnétiques voire ferromagnétiques. Leur température de fusion et de vaporisation sont en général élevées.

Les métaux sont pour la plupart ductiles et relativement tenaces et l'association de leur ténacité et de leur ductilité est un atout majeur pour leur mise en forme. Par contre, après mise en forme, on peut facilement donner aux alliages métalliques une bonne résistance mécanique par des traitements thermiques appropriés grâce à la précipitation de phases durcissantes (durcissement structural). Du fait de leur plasticité, leur tenue à la fatigue peut poser des problèmes et ils sont de plus souvent sensibles à la corrosion. Enfin, les métaux sont en général des matériaux lourds et denses ce qui est parfois un handicap [18].

## 2.7. Traitement thermique

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud et destinée à modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Pour les aciers d'amélioration, c.-à-d. certains aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, certains traitements sont quasi obligatoires pour obtenir une performance optimale. Ces traitements sont la trempe et le revenu. Ils permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques de l'acier: limite élasticité, résistance à la traction, ténacité, dureté et résilience aux besoins de l'utilisation. D'autres traitements, normalement désignés comme recuits, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. En général, les traitements thermiques pratiqués ont des conséquences sur les propriétés suivantes: la résistance à la corrosion, les propriétés mécaniques (résistance, ductilité et fragilité), l'état de surface (oxydation superficielle, rugosité) voir figure 2.1.

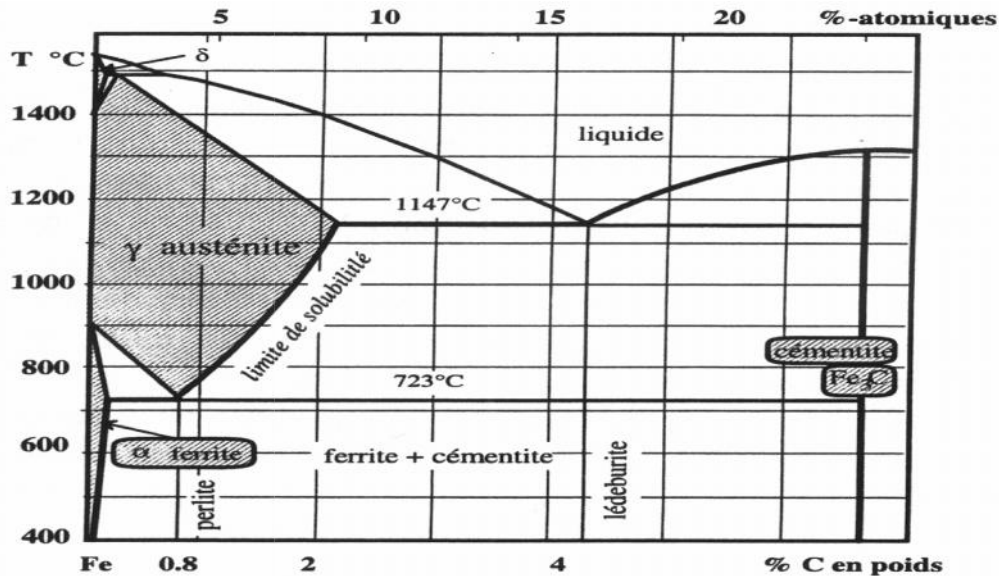


Figure 2.1. Diagramme d'équilibre des aciers au carbone.

### 2.7.1. La Trempe

C'est un traitement thermique de durcissement consistant à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer  $\alpha \rightarrow$  fer  $\gamma$  (austénisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale.

#### 2.7.1.1. Trempe martensitique

Elle provoque l'apparition d'une structure martensitique ayant une dureté très élevée. Les lois de refroidissement peuvent être continues ou discontinues.

#### 2.7.1.2. Trempe bainitique

C'est une austénisation suivie d'un refroidissement rapide jusqu'à  $\theta_b$  (température de trempe bainitique), maintenue pendant le temps nécessaire à la transformation complète de l'austénite. On refroidit ensuite jusqu'à température ambiante.

#### 2.7.1.3. Trempe d'aciers austénitiques ou hypertrempe

Sur certains aciers austénitiques, cette trempe crée une structure d'austénite homogène à température ambiante. Elle provoque l'adoucissement du matériau (comme certains aciers inox). Elle se produit si la température de trempe est trop élevée.

#### 2.7.1.4. Cycle de trempe

On cherche à obtenir la transformation de l'austénite (stable à température élevée) en constituants métastables (pas stables mais la très faible vitesse de réaction donne une apparence de stabilité) : solution sursaturée de carbone dans le fer  $\alpha$ . Le cycle de trempe comprend deux étapes : l'austénisation puis le refroidissement.

### ➤ Austénisation

Chauffage jusqu'à une température élevée permettant la formation de l'austénite. Il est nécessaire d'avoir :

- une température uniforme dans toute la pièce.
- un maintien en température assez long pour permettre une homogénéisation complète de l'austénite.

La température d'austénisation dépend de la teneur en carbone et des éléments d'addition. La durée de maintien est variable, elle dépend beaucoup de la géométrie de la pièce. Elle se situe en général entre 15 et 30 minutes.

### ➤ Refroidissement

But : transformer l'austénite en martensite ou bainite, plus durs. La méthode de refroidissement dépend du constituant et de la structure souhaitée.

#### **2.7.1.5. Qualité de trempe**

Facteurs influençant la qualité de la trempe :

- pouvoir refroidissant du bain
- masse de la pièce : plus la pièce est grosse, plus le refroidissement n'est pas homogène.
- conductibilité thermique
- état de surface

#### **2.7.1.6. Aptitude à la trempe**

L'aptitude d'une pièce à la trempe dépend :

- de l'intensité du durcissement : correspond à la dureté maximale (martensite) que l'on peut espérer. Elle dépend de la teneur en carbone en solution dans l'austénite.
- de la trempabilité : variation de dureté entre le cœur et la surface d'une pièce. Elle dépend des quantités de carbone et des éléments d'alliages en solution dans l'austénite.

La trempabilité dépend :

- de la composition chimique
- des conditions d'austénisation
- de la grosseur du grain austénitique

#### **2.7.1.7. Recommandations**

Il faut éviter les chocs thermiques (fissuration. . .) La température de chauffage se situe entre 30 et 75 °C au dessus de la ligne AC3 (850 → 900 °C). Pour les aciers rapides ou les inox, la température d'austénisation peut atteindre 1300 °C.

Le temps de maintien ne doit pas être trop court pour permettre une austénisation complète, pas trop long pour éviter une augmentation de la grosseur du grain qui diminuerait la dureté finale.

Attention aux variations de refroidissement entre le cœur et la surface de la pièce.

La trempe se situe entre l'ébauche et la finition.

### **2.7.2. Revenu**

La trempe crée une structure martensitique très dure, donc très fragile. Le but du revenu est de modifier la structure pour obtenir un bon compromis dureté/fragilité. Le revenu diminue aussi les contraintes résiduelles de trempe.

### **2.7.3. Recuit**

Opération thermique qui annule les effets des traitements thermiques ou mécanique antérieurs.

# **Chapitre 3**

## **Techniques Expérimentales**



### 3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie expérimentale de notre travail, les étapes de la réalisation de ce travail sont bien détaillé tel que le découpage des échantillons et la préparation de leurs surface, ainsi que la technique de réalisation des revêtements par projection thermique. Les différents moyens et techniques expérimentaux utilisés dans cette étude sont décrits.

### 3.2. Les substrats

Les substrats concerné par cette étude est un acier ordinaire de très faible taux de carbone, sous forme de tôle de 4 mm qui est très pratique pour réaliser nos revêtements et un acier de construction faiblement allié 42CD4 et l'acier inoxydable martensitique X30Cr13.

#### 3.2.1. Nuance XC38

Le tableau 3.1 est représenté la composition chimique d'acier au carbone XC38, et leur microstructure représenté dans la figure 3.1.

Tableau 3.1. Teneurs en masse des impuretés présentes dans l'acier XC38.

Elément	C	Mn	Si	S	P	Fe
(%) massique	0,30-0,35	0,5-1,0	0,15-0,35	0,035	0,035	Balance

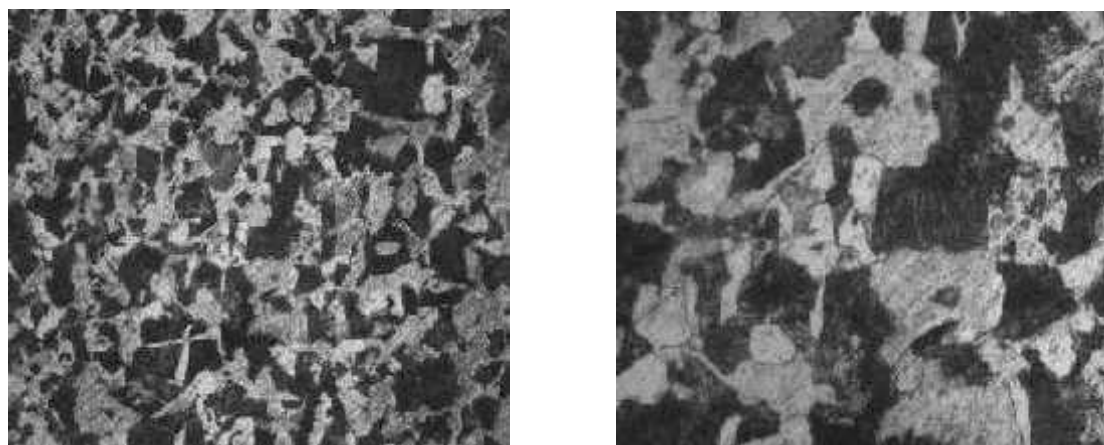


Figure 3.1. Microstructure de XC38 (Ferrite + Pearlite) de 0.385 % C.

### 3.2.2. Acier faiblement allié 42CrMO4

Le 42CrMo4 est un acier faiblement allié au chrome et au molybdène (tableau 3.2). Il présente une structure bainito-martensitique caractéristique d'un acier trempé revenu (figure 3.2). La taille de grain assez homogène semble proche de 15  $\mu\text{m}$ .

Tableau 3.2. Composition chimique en % de 42CrMo 4 (42CD4).

C	Cr	Mo	S	Mn	P	Si
0.38 – 0.45	0.90 – 1.20	0.15 – 0.30	$\leq 0.035$	0.60 -0.90	$\leq 0.035$	maxi 0.40



Figure 3.2. Microstructure initiale de l'acier 42CrMO4 [26].

### 3.2.3. Nuance X30Cr13

Seule cette nuance ferrite-martensitique sera utilisée pour procéder à nos essais de rechargement dur par torche à flamme super jet. Sa composition chimique est donnée dans le tableau 3.3, tandis que ses micrographies optiques sont précisées dans la figure 3.3.

Tableau 3.3. Composition chimique en % de X30Cr13.

Elément	Fe	Cr	C	Si	Ni	Mn	P
(%) massique	85.92	12.62	0.30	0.63	0.11	0.41	0.011

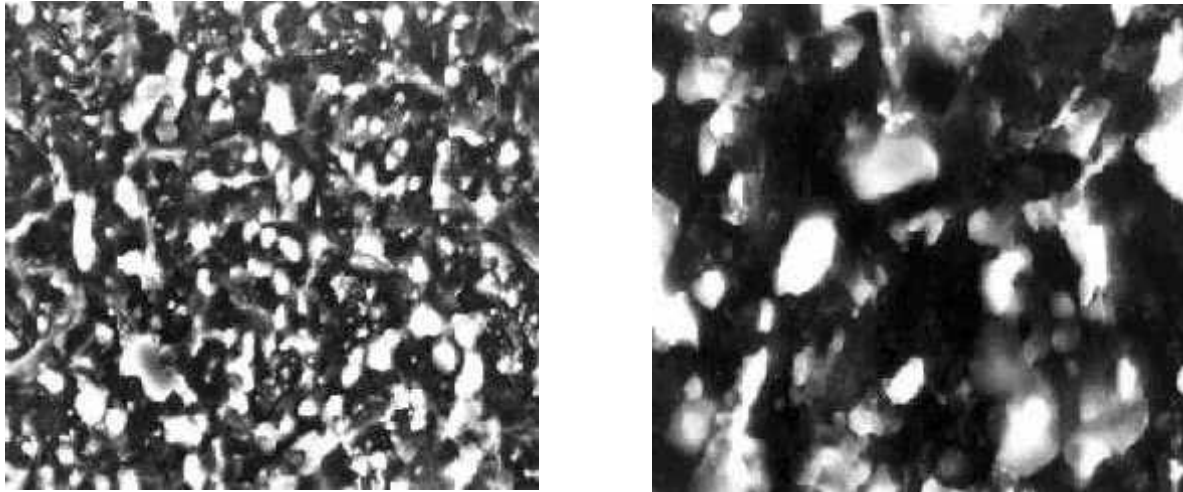


Figure 3.3. Micrographies optiques de l'acier X30Cr13 non traité [27].

### 3.3. La poudre

La poudre utilisées dans le cadre de ce projet ont été choisie à partir une poudre sélectionnées parmi celles disponibles au laboratoire LTSM, et ce pour leurs propriétés très intéressantes.

- Poudre d'un alliage Ni-B-Si nommé sous Eutalloy® chrome tec 10680 selon désignation du producteur Castollin Eutectic.

Les propriétés et la nature chimique de poudre utilisées dans le cadre de ce projet ont été relevées à partir des documents des fabricants, ils sont regroupés dans le tableau qui suit :

Tableau 3.4. Les caractéristiques de la poudre utilisées.

Poudre	Référence	Composition	Dureté	Caractéristiques
Chrome tec	10680	Alliage de Ni-B-Si.	240 HV	-Faible coefficient de frottement. - Excellente résistance à l'abrasion à basse pression et de l'érosion. - Bonne résistance à la corrosion. - Facile à utiliser. -T max de service=700 <sup>0</sup> C

### 3.4. Découpage des échantillons

- Des échantillons sous forme de plaquette rectangulaire d'un acier au carbone de dimensions de (40–40) mm x (40- 40) mm et de 4 mm d'épaisseur ont été découpés à l'aide d'une machine de découpage 'La guillotine', le découpage est réalisé dans l'atelier de soudage du département de mécanique figure 3.4.



Figure 3.4. Guillotine.

- Des échantillons sous forme de plaquette carrée d'un acier X30Cr13 de dimensions de (15 –15) mm ont été découpés à l'aide d'une machine de découpage 'La malle', le découpage est réalisé dans l'atelier d'usinage privé MK industrie.
- Des échantillons médailles circulaires de diamètre 50 mm et d'épaisseur de 6mm d'un acier au 42CD4 (figure 3.5) ont été découpés à l'aide d'une machine de découpage lacé mécanique.

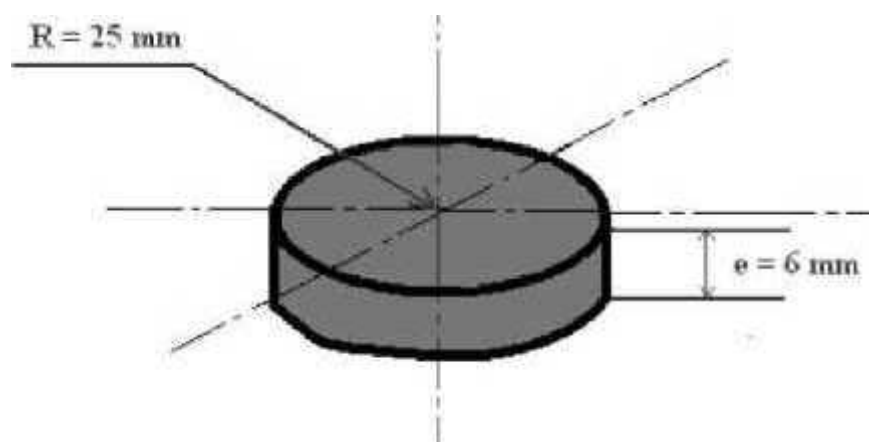


Figure 3.5. Médaille circulaire.

Toutes les opérations de préparation des échantillons (usinage) ont été réalisées au sein d'un atelier d'usinage de soudage du département de mécanique et atelier d'usinage privé MK industrie.

### 3.5. Préparations des pièces à projeté

#### 3.5.1. Rechargement par projection thermique

Nous avons réalisé la métallisation par projection thermique au sein du laboratoire LTSM.

L'ensemble des travaux s'est porté sur:

- 1- quatre échantillons d'acier au carbone XC38 ayant subies un préchauffage.
- 2- quatre médailles circulaires ayant subies un préchauffage de 42CD4.
- 3- quatre carrés de X30Cr13 ayant subies un préchauffage.

#### 3.5.2. Le dépôt projeté

L'adhésion des revêtements réalisés par projection thermique est basée principalement sur l'accrochage mécanique, donc pour une meilleure adhérence du dépôt au substrat (plaquette) nous avons utilisé le grenailage pour créer la rugosité nécessaire pour favoriser l'ancrage mécanique. Cette opération est faite aussi pour éliminer toute trace de graisse de rouille et d'oxydes qui se trouvent éventuellement sur la surface des plaquettes. L'augmentation de la rugosité de surface est obtenue par un lancement à grande vitesse des grains de tailles micrométriques de sables d'alumine ( $Al_2O_3$ ) contre l'échantillon à l'aide d'air comprimé sous une grande pression (figure 3.6).



Figure 3.6. Grenailleuse.

Après la préparation des surfaces tel que décrit précédemment, l'élaboration de nos revêtements a été faite par projection thermique à la flamme oxyacétylénique. Une torche à flamme de type fusion-refusion de Castollin Eutectic désigné par Eutalloy Super Jet à été utilisé pour l'exécution des revêtements sur les substrats en acier.



Figure 3.7. La projection par le Pistolet Eutalloy (super Jet-S).

### 3.6. Paramètres de projection

Les paramètres de projection utilisés lors de la projection sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.5. Les paramètres de la projection fusion – refusion.

L'arrivée d'oxygène	90 à 1200 NI / h
Débit d'oxygène	90 à 1200 NI / h
Débit d'acétylène	80 à 1100 NI / h
Pression d'oxygène	1.5 à 2.5 bars
Pression d'acétylène	0,5 à 0,6 bar
Distance de projection	30 – 40 mm
Angle de projection	90°
Distance de la refusion	15 – 20 mm
Angle de refusion	45°

La technique de projection est décrite comme suit :

- Afin d'assurer une bonne adhérence du dépôt au substrat un préchauffage de la surface du substrat a été effectué jusqu'au bleu par un passage de la torche sans apport de poudre.
- Projection thermique de la poudre par un balayage de toute la surface du substrat par la torche à flamme.
- Refusion du revêtement déposé (certains dépôts) par un repassage avec la torche (sans apport de poudre) sur le substrat afin de fusionner la matrice.

Plusieurs échantillons ont été utilisés dans le cadre de notre étude afin de réaliser la caractérisation métallurgique des revêtements, Pour réaliser des revêtements nous avons procédé comme suit :

- La déposition de tous les nuances est 05 couches en utilisant la même poudre chrome tec sur tous les échantillons.
- Refusion de tous les échantillons pour les caractérisés.
- Refroidissement de tous les échantillons par l'eau et l'air.
- Une autre déposition pour un refusion de caractérisation de traitement thermique austinisation dans le four.

Une schématisation de la technique est faite dans les figures suivantes :



Figure 3.8. Dépôt de 05 couches avec refusion par la torche Eutalloy et Réalisé par la poudre chrome tec, Refroidissement par (air et eau).



Figure 3.9. Dépôt de 05 couches avec refusion par traitement thermique et Réalisé par la poudre chrome tec, Refroidissement par (air et eau).

Après l'opération de la projection et la réalisation du revêtement des différents substrats, le tableau au dessous regroupe tous les échantillons.

Tableau 3.6. Les échantillons réalisés.

Les nuances	La nature de refroidissement	Nombre des échantillons
Acier Xc38 Acier 42Cd4 Acier X30Cr13	Un dépôt de 05 couches réalisé par la poudre chrome tec, refroidissement par l'air et l'eau pour chaque acier.	06
Acier Xc38 Acier 42Cd4 Acier X30Cr13	Un dépôt de 05 couches réalisé par la poudre chrome tec sachant que le refroidissement par l'air et l'eau après traitement thermique pour chaque acier.	06

- Traitements thermiques

Nous avons effectué des traitements thermiques, de six échantillons projetés, à une température de chauffage de 750 °C.

On programme la montée de la température du four électrique avec une vitesse définie. Une fois la température de traitement voulue est atteinte, on introduit l'échantillon dans le four. Le traitement se fait pendant un temps de maintien d'une 30 minute, puis l'échantillon est extrait du four trempé dans l'eau et l'air.

### 3.7. Mesure d'épaisseur de revêtement

Après projection thermique, les mesures d'épaisseur ont été prises avec un appareil à ultrasons Positest DFT montré à la figure 3.10.



Figure 3.10. Appareil de mesure des couches de revêtements.



### 3.8. Principe de traitement thermique

Le traitement thermique d'une pièce consiste à lui faire subir des transformations de structure grâce à des cycles prédéterminés de chauffage et de refroidissement afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques : dureté, ductilité, limite d'élasticité, ...

Dans notre cas pratique on a choisi 3 nuances (XC38, 42CD4, X30Cr13) pour avoir une différence de composition chimique qui vont subir à un traitement thermique. Les traitements thermiques utilisés sont comme suite :

#### 3.8.1. La mise en solution

Cette opération consiste à un chauffage à température élevée (750 °C). La mise en solution est sensée homogénéiser la microstructure, à l'état brut de coulée, et minimiser la ségrégation des éléments alliés. Comme mentionné précédemment, la mise en solution permet surtout de dissoudre les composés intermétalliques. Dans notre expérience, Nous avons appliquées pour chaque acier (XC38, 42CD4, X30Cr13) un traitement de mise en solution sur de température 750 °C avec un temps de maintien de 30 min. Dans notre cas la mise en solution est à l'eau et à l'air.



Figure 3.11. Le four utilisé pour le traitement de mise en solution.

Le tableau résume l'application de traitement thermique pour chaque acier.

Tableau 3.7. Programme de traitement thermique appliqué.

Mise en Solution : <b>750 °C</b>
Temps de maintien pour chaque mise en solution : <b>30 min</b>

Nous avons appliquées pour chaque acier (XC38, 42CD4, X30Cr13) un traitement de mise en solution sur de température 750 °C avec un temps de maintien de 30 min puis subissent à un refroidissement à l'eau et à l'air.

### 3.9. Caractérisation métallographique

#### 3.9.1. Préparation des échantillons

La préparation métallographique sert à préparer les échantillons afin de révéler la microstructure au microscope optique. Nos échantillons sont découpés transversalement afin de visualiser le substrat et le revêtement.

- **Découpage par Micro-tronçonneuse :**

On a utilisé un micro-tronçonneuse de marque isomet 1000 (voir figure 3.12) pour découper des petits échantillons pour l'embrober.



Figure 3.12. micro-tronçonneuse.

Les échantillons destinés à la caractérisation métallographique ont été découpés à l'aide d'une micro-tronçonneuse à partir des échantillons traités (figure 3.13).

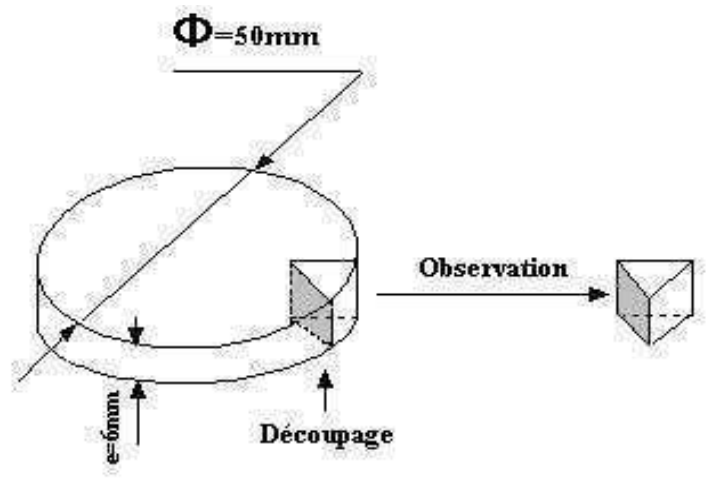


Figure 3.13. Découpage des médailles revêtues.

### 3.9.2. L'enrobage

Cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation des échantillons et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. L'enrobeuse permet d'enrober les échantillons dans une résine thermodurcissable. La figure (3.14) montre une photo de l'enrobeuse de marque STRUERS utilisée.

Pour cela, on a effectué un enrobage à chaud à une température de  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  afin de permettre une manipulation plus aisée des échantillons et d'assurer la planéité de la surface lors du polissage.



Figure 3.14. Enrobeuse.

### 3.9.3. Le polissage

Après l'enrobage, les échantillons ont subi un polissage mécanique comportant trois stades :

Le polissage grossier

Cette opération s'effectue manuellement avec des disques tournants en carbures de silicium (papiers abrasifs de 80, 280, 400, 600, 800, 1000 et 1200), à l'eau courant comme un lubrifiant. La figure 3.15 montre la polisseuse utilisée au niveau de laboratoire de SDM.



Figure 3.15. Polisseuse.

- Le polissage de finition

Un polissage de finition très fin avec une poudre d'alumine  $Al_2O_3$  ayant une granulométrie de  $0.3\mu m$ , en suspension sur un tissu en soie. La figure 3.16 représente la polisseuse de finition utilisée.



Figure 3.16. Polisseuse de finition.

Après polissage de finition, les échantillons ont subis un rinçage à l'eau et séchage.

### 3.10. Attaque chimique

L'attaque chimique provoque une dissolution différentielle des phases suivant leur nature et leur composition. Le seul réactif que nous avons utilisé et le meilleur adapté aux échantillons de notre étude est le nital à 4% (4 ml de  $\text{HNO}_3$  + 100 ml de l'eau distillée), il permet la révélation des joints de grains ferritiques, perlitiques, et les interfaces.

### 3.11. Analyse micrographique

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon.

L'observation micrographique des échantillons est effectuée à l'aide d'un microscope optique de type NEOPHOT 32.

- **Microscope optique**

Un microscope métallographique de type NEOPHOT 32 a été utilisé pour l'observation de nos revêtements, avec un grossissement qui varie de 100 à 1000. Ce microscope est muni d'une caméra numérique permettant le transfert des images vers un PC. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. La figure 3.17 représente le Microscope optique utilisée.



Figure 3.17. Microscope optique utilisé pour l'analyse métallographique.

### 3.12. L'essai de dureté

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet d'une norme précise. Dans notre cas l'essai de la dureté à été effectués avec un duromètre.



Figure 3.18. Duromètre.

# **Chapitre 4**

## **Résultats et interprétations**

## 4.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude suivi d'une discussion et d'interprétation afin d'établir des relations entre les microstructures et les propriétés mécaniques, tout en prenant en compte le procédé de déposition et technicité avec laquelle ces revêtements ont été réalisés.

## 4.2. Les aspects de surface des différents revêtements réalisés

Après la mise en marche de la machine de projection, nous avons réussi à projeter des dépôts des alliages de Ni-B-Si, en utilisant une seule poudre chrome tec avec plusieurs aciers. La figure 4.1 montre un aspect des revêtements déposés par la torche Eutalloy.

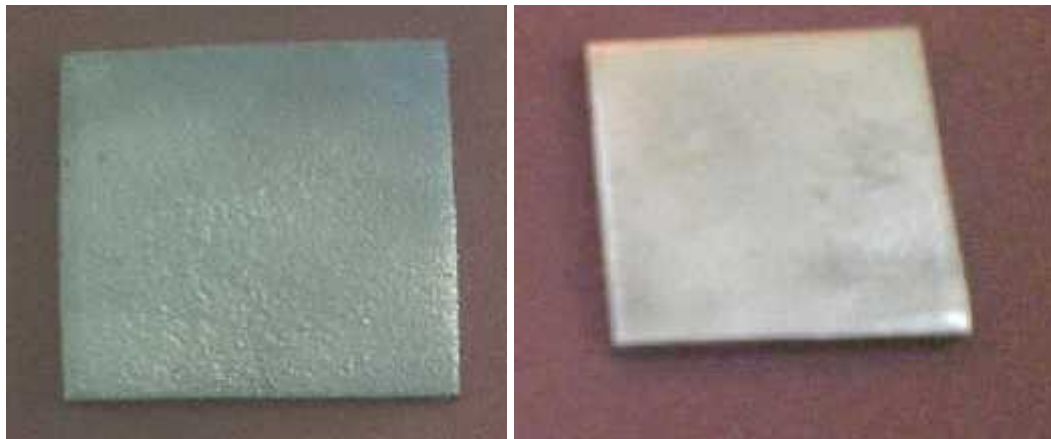


Figure 4.1. Dépôt de 05 couches sans et avec refusion d'un acier au carbone XC38.

A partir des images de la figure (figure 4.1) on constate clairement que les différents dépôts de toutes les nuances ont le même état de surface avec une rugosité importante. Pour les échantillons sans refusion lorsqu'on produit une refusion sur les échantillons, la surface de dépôt est complètement lisse.

## 4.3. Mesure d'épaisseur

Les mesures moyennes des épaisseurs des revêtements déposés par la torche Eutalloy sont regroupées au tableau 4.1.



Tableau 4.1 Epaisseurs des revêtements.

	Substrat	XC38		42CD4		X30Cr13	
	Refroidissement	air	eau	air	eau	air	eau
Epaisseur moyenne ( $\mu\text{m}$ )	avec refusion par la torche Eutalloy	<b>324</b>	<b>197</b>	<b>281</b>	<b>192</b>	<b>320</b>	<b>201</b>
	sans refusion (pour traitement thermique)	<b>104</b>		<b>179</b>		<b>127</b>	
	avec refusion par traitement thermique	<b>128</b>	<b>138</b>	<b>144</b>	<b>153</b>	<b>169</b>	<b>155</b>

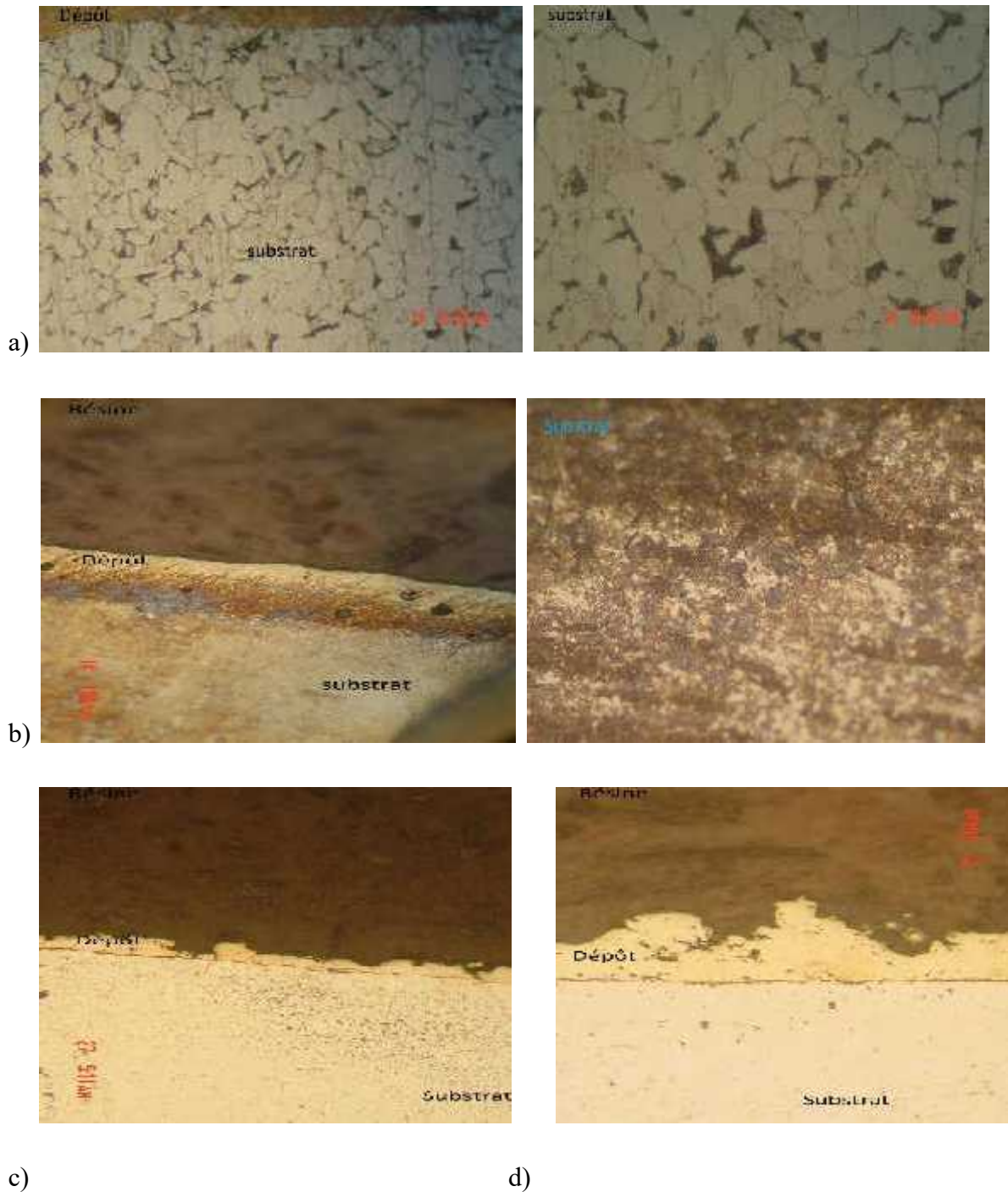
Les épaisseurs moyennes des revêtements ont été calculées à partir de 5 mesures d'épaisseur effectuées dans des zones différentes de la plaque revêtue et cela pour chaque dépôt, les mesures d'épaisseur des revêtements déposées on a remarqué que :

Il ya une dissimilitude remarquable entre les épaisseurs mesurés dans différentes zones de la même plaque revêtue (même dépôt). Ce phénomène est causé par l'opérateur, car la projection thermique avec la torche à flamme Eutalloy est manuelle, alors la réalisation d'un dépôt uniforme est très difficile.

#### 4.4. Etude métallographique

Après la préparation métallographique des échantillons, l'observation microscopique au microscope optique nous mène aux résultats présentés ci-dessous.

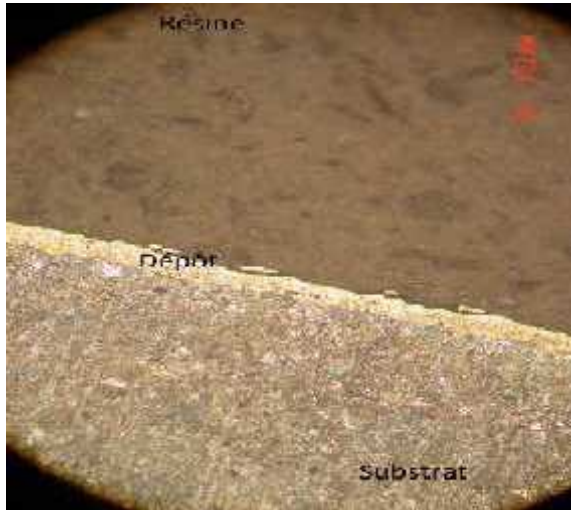
Les coupes transversales des revêtements déposés sur un acier au carbone XC38, avec refusion par la torche Eutalloy, et avec traitement thermique sont montrées à la figure 4.2.



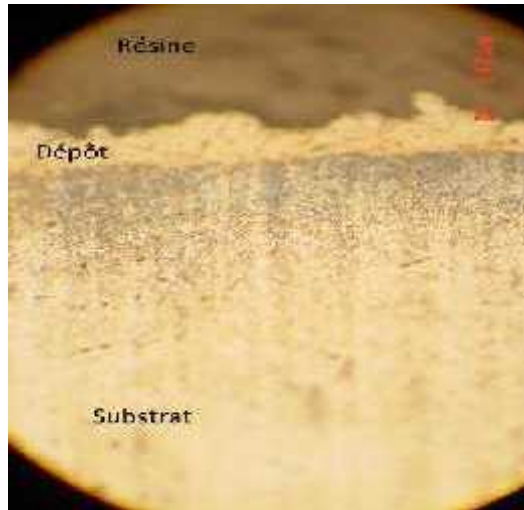
Figures 4.2. Coupe transversale de revêtement déposé sur un acier au carbone XC38.

- a) Refroidit à l'air avec refusion.
- b) Refroidit à l'eau avec refusion.
- c) Refroidit à l'air avec traitement thermique.
- d) Refroidit à l'eau avec traitement thermique.

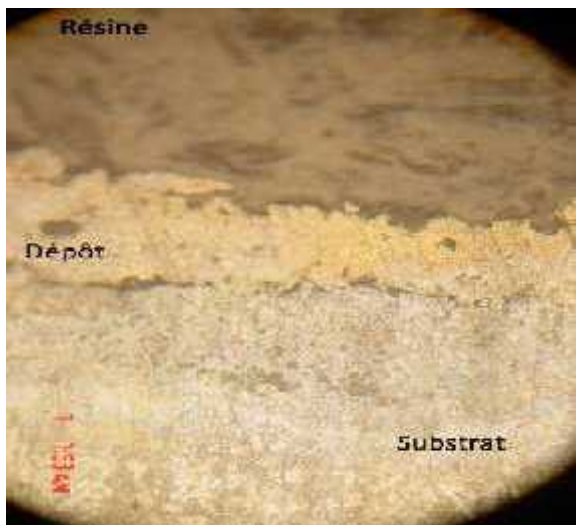
Les coupes transversales des revêtements déposés sur un acier au 42CD4, avec refusion par la torche Eutalloy, et avec traitement thermique sont montrées à la figure 4.3.



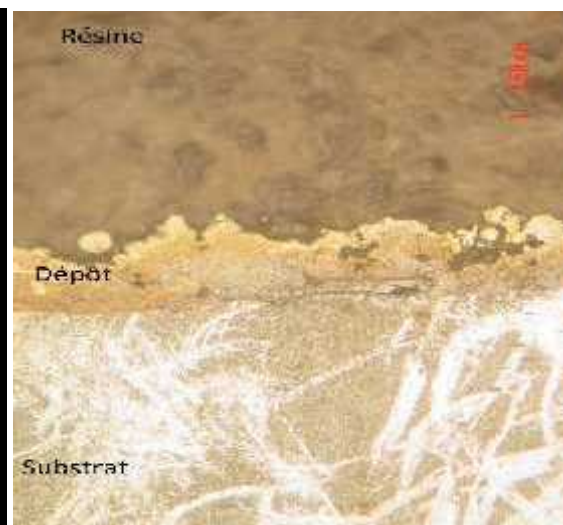
a)



b)



c)

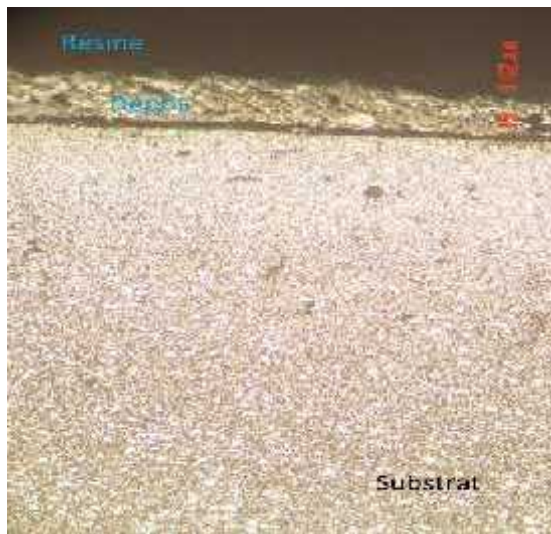


d)

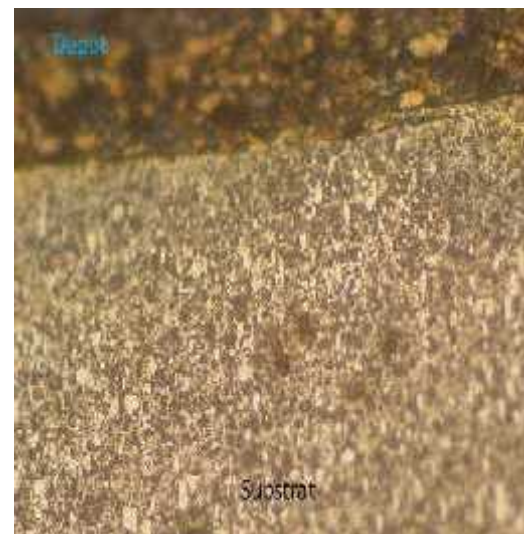
Figures 4.3. Coupe transversale de revêtement déposé sur un acier au 42CD4.

- a) Refroidit à l'air avec refusion.
- b) Refroidit à l'eau avec refusion.
- c) Refroidit à l'air avec traitement thermique.
- d) Refroidit à l'eau avec traitement thermique.

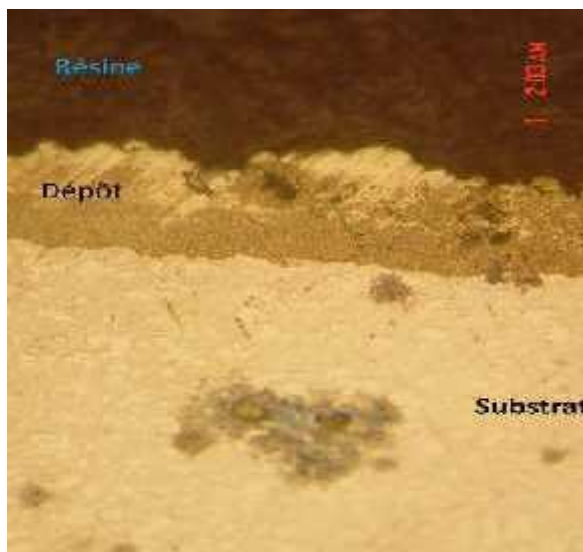
Les coupes transversales des revêtements déposés sur un acier au X30Cr13, avec refusion par la torche Eutalloy, et avec traitement thermique sont montrées à la figure 4.4.



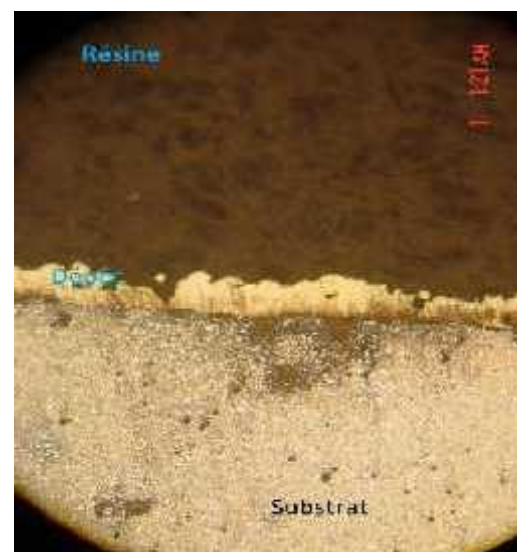
a)



b)



c)



d)

Figures 4.4. Coupe transversale de revêtement déposé sur un acier au X30Cr13.

a) Refroidit à l'air avec refusion.

b) Refroidit à l'eau avec refusion.

c) Refroidit à l'air avec traitement thermique.

d) Refroidit à l'eau avec traitement thermique.

D'après ces micrographies on peut affirmer que des revêtements déposés par la torche à flamme Eutalloy ont une très bonne adhésion, ceci est dû au préchauffage des substrats avant la déposition de revêtement et à la refusion par chauffage jusqu'au rouge après déposition. En général les revêtements déposés par l'Eutalloy ne sont pas toujours uniforme, car la déposition est manuelle.

Dans les revêtements contenant le NiBSi le chauffage des pièces après la déposition de revêtement permettent de fusionner la poudre.

Pour la microstructure du substrat n'est pas bon parce que le polissage est manuel et la solution chimique disponible n'est très efficace parce qu'elle n'est pas conçue dans les normes.

#### 4.5. La dureté

Pour les trois aciers (XC38, 42CD4, X30Cr13), on a mesuré la dureté avant et après défèrent projection thermique et traitements thermiques, les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Les résultats de la dureté HV moy des substrats.

Substrat	XC38	42CD4	X30Cr13
HV moy (hv)	<b>200</b>	<b>230</b>	<b>260</b>

La dureté a été mesurée en considérant la surface extérieure du dépôt. Après des mesures de la dureté de tous les échantillons, la dureté moyenne à été calculée à partir de 03 mesures. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous tableau 4.3.

Tableau 4.3. Les résultats de la dureté HV moy des revêtements.

	Substrat	XC38		42CD4		X30Cr13	
	Refroidissement	air	eau	air	eau	air	Eau
HV moy (HV)	Avec refusion par la torche Eutalloy	<b>175</b>	<b>240</b>	<b>345</b>	<b>552</b>	<b>230</b>	<b>250</b>
	sans refusion (pour traitement thermique)	<b>230</b>		<b>305</b>		<b>180</b>	
	avec refusion par traitement thermique	<b>194</b>	<b>255</b>	<b>367</b>	<b>310</b>	<b>205</b>	<b>210</b>

D'après les valeurs de la dureté, on peut dire qu'il y a dans le même dépôt des variations de la dureté ce qui veut dire qu'il existe dans le revêtement des zones très dures. Les valeurs de dureté les plus élevées ont été enregistrées dans le dépôt 42CD4 ER.

Les symboles suivants pour les courbes de la dureté :

Substrat ER : dépôt Eutalloy avec refusion.

Substrat ESR : dépôt Eutalloy sans refusion.

Substrat ETT : dépôt Eutalloy avec traitement thermique.

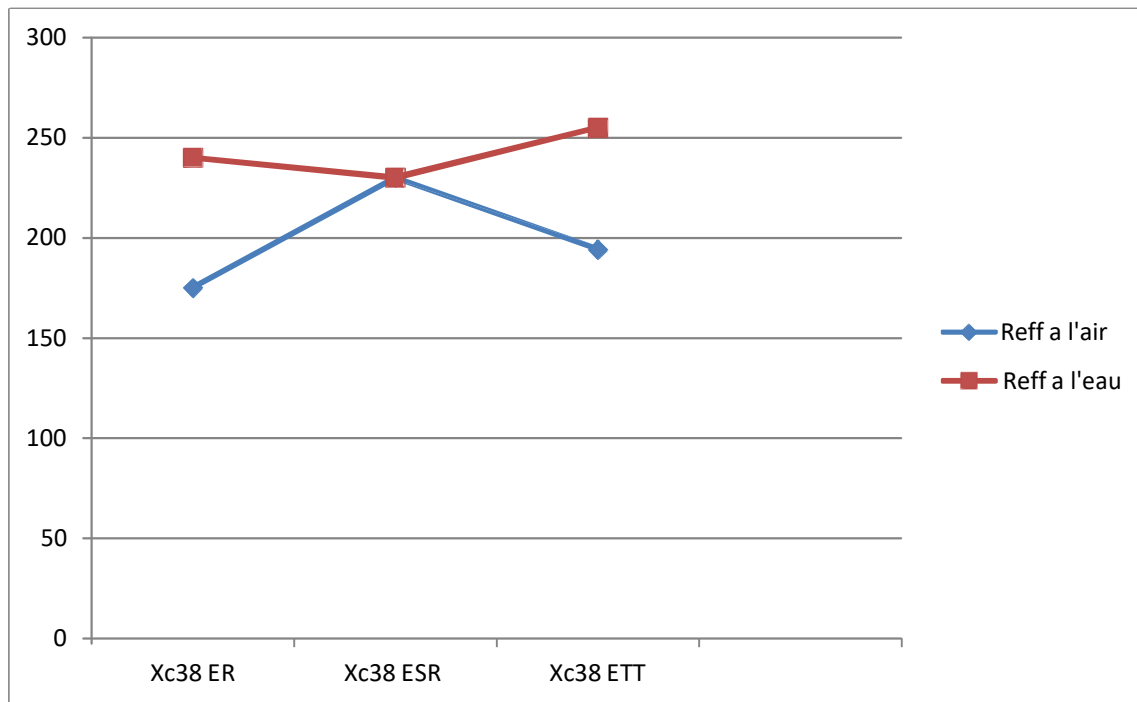


Figure 4.5. Les courbes de la variation de dureté des revêtements d'acier XC38.

A partir de la courbe de figure 4.5 d'acier au carbone on remarque que lorsqu'il n'y a pas de refusion à la torche, il n'y a pas pratiquement aucun changement au niveau de la microstructure ni de la dureté comme le montre les points XC38 à de la figure 4.5.

Lorsque le revêtement est déposé à la torche Eutalloy puis refusionner, nous avons deux cas qui se présentent :

- a) Si le revêtement est refroidi à l'air, le substrat subit un revenu et on observe une baisse de dureté.
- b) Si le revêtement est refroidi à l'eau, le substrat subit un léger affinage des grains qui fait augmenter sa dureté par rapport à celui refroidi à l'air.

Le substrat tel que reçu garde cependant une légère hausse de la dureté va qu'il est reçu à l'état écroui.

Lorsque le revêtement est déposé à la torche Eutalloy mais placé dans un four, la microstructure du substrat est comparable au traitement reçu avec la torche Eutalloy.

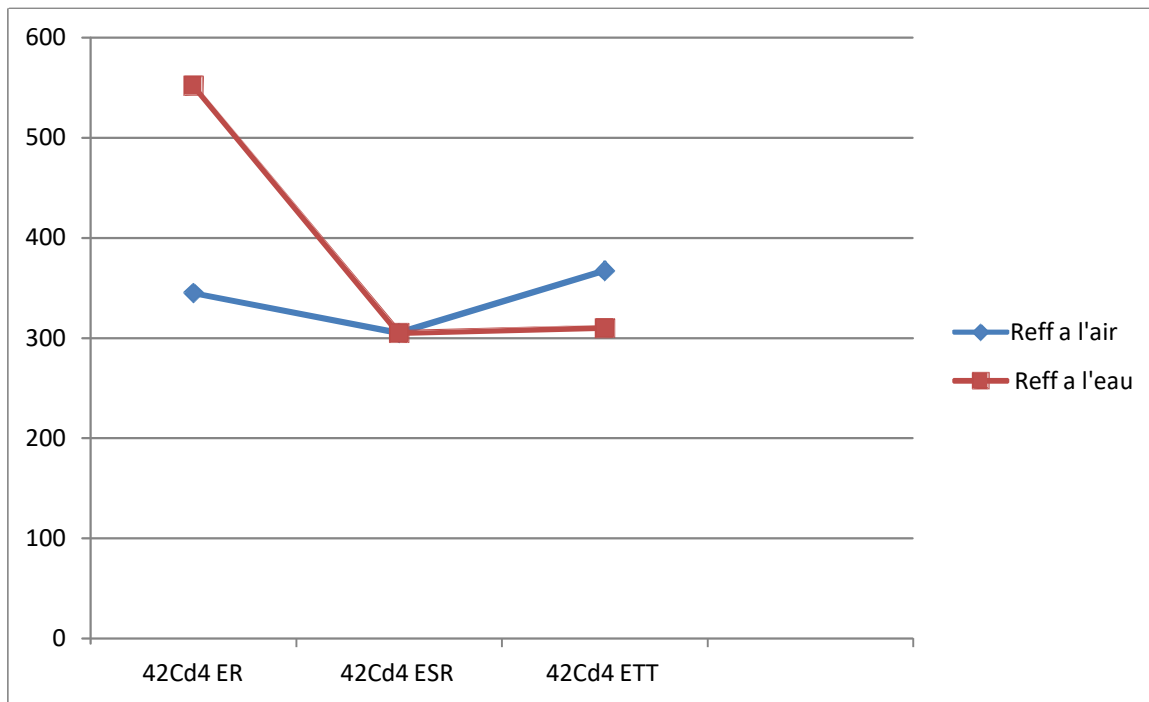


Figure 4.6. Les courbes de la variation de dureté des revêtements d'acier 42CD4.

A partir de la courbe de figure 4.6 pour l'acier 42CD4 il est clair de dire :

Dans le cas du substrat 42CD4 qui est un acier allié, la reprise aux différents traitements thermiques est différente de celui de l'acier au carbone XC38.

En effet, lorsque le revêtement déposé sur au substrat 42CD4 puis refusionner à la torche Eutalloy et enfin refroidit à l'air ou à l'eau, la microstructure est :

- a) Perlito-ferritique ou bainitique lorsque l'échantillon est refroidit.
- b) Martensitique lorsque l'échantillon est refroidit à l'eau comme le montre la figure 4.6 ERE.

Si l'échantillon ne subit pas de refusion avec le dépôt du revêtement, la microstructure reste perlito-ferritique.

Lorsque l'échantillon reçoit un dépôt sans toutefois le refusionner à la torche Eutalloy mais placé un four à 750 °c pendant 30 min, la dureté ne s'élève guère, ceci est du à la faible température de traitement thermique qui ne provoque la décomposition des carbures et donc la libération du carbone.



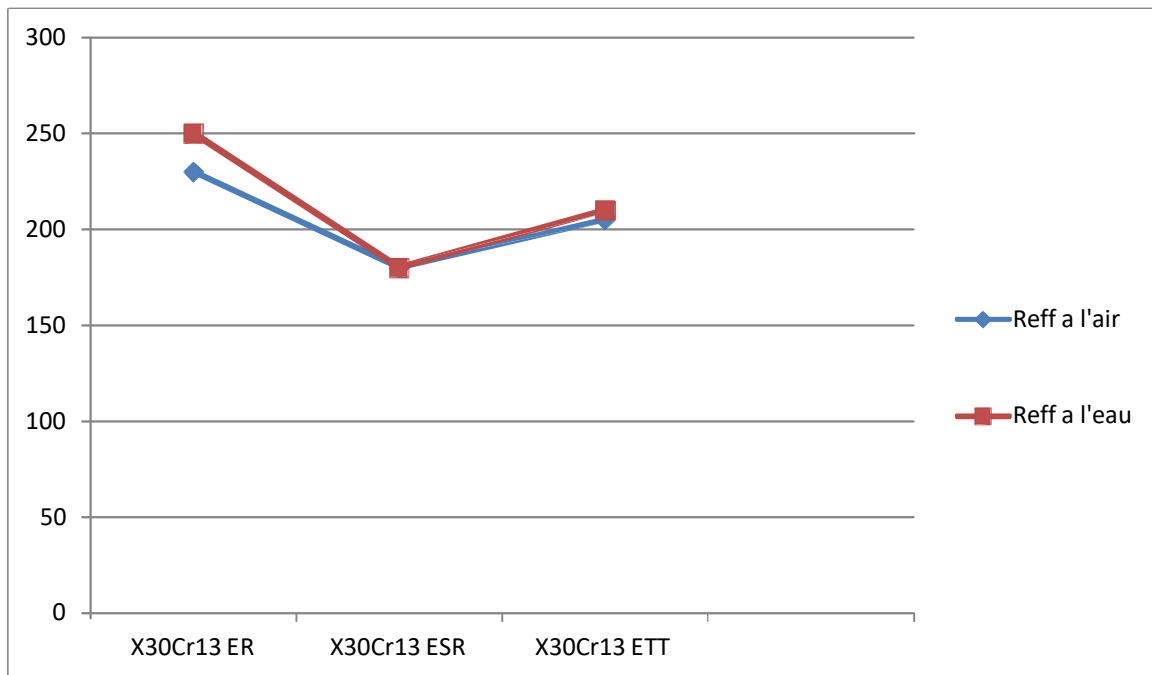


Figure 4.7. Les courbes de la variation de dureté des revêtements d'acier X30Cr13.

A partir de la courbe de figure 4.7 d'acier X30Cr13 il est clair de dire :

Pour l'acier à haute stabilité dimensionnelle le X30Cr13, la déposition du revêtement suivi d'une refusion à la torche Eutalloy a un effet demi-traitement de martensite revenu. En effet, nous pensons que le premier chauffage du substrat provoque juste un revenu qui a pour conséquence une baisse de dureté. Ceci est mis en évidence sur les points ESR des duretés de la figure 4.7. Lorsqu'il y a une refusion du revêtement, la température du substrat augmente et provoque l'apparition d'une structure martensitique mais certainement avec une présence d'austénite résiduelle importante qui abaisse le nombre de dureté comme on le voit les points ERA de la figure 4.7.

Par contre, lorsque le dépôt est déposé à la torche Etalloy mais mus au four à 750 °c durant 30 min, les duretés n'augmentent pas par rapport au traitement ESR. La raison principale est que la température du traitement thermique n'est pas suffisante pour faire une mise en solution et donc le carbure reste piégé avec les éléments carbonifères.

## Introduction générale

Les impératifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs imposent la réduction des coûts et l'amélioration des performances pour faire face à ces exigences, de nombreux différents traitements de surface ont été mis au point et sont aujourd'hui utilisés industriellement. Parmi ceux-ci figurent le rechargement par projection thermique dont l'influence de la déposition des rechargements durs par torche à flamme sur la microstructure des substrats fait l'objet de ce travail.

Généralement économique et de mise en œuvre simple, le rechargement permet d'adapter les surfaces de pièces aux diverses sollicitations auxquelles elles sont exposées en cours d'exploitation.

Sur pièce usagée, le rechargement est utilisé pour reconstituer la forme initiale de cette pièce. L'utilisateur peut, à cette occasion, en profiter pour réaliser un dépôt avec des matériaux qui vont augmenter les caractéristiques de résistance en service des surfaces considérées (matériau plus dur pour surfaces frottantes, matériau plus noble pour surfaces corrodées), donc le rechargement redonne une nouvelle vie technique à la pièce. Sur pièce neuve, le rechargement peut être source d'économie, en ne mettant qu'aux seuls endroits nécessaires, le matériau adapté.

Après avoir rechargé les différents échantillons, des observations microstructurales (Optiques) ont été appliquées des tests mécaniques (avant et après la projection) à savoir (dureté HV), afin d'indiquer et de choisir un meilleur résultat de rechargements utilisés et voir l'influence de la procédé utilisé sur le comportement mécanique des échantillons en acier dans notre cas.

Dans notre mémoire, les études de rechargement d'une poudre chrome tec 10680 est déposée sur trois types de substrat, l'un à base d'un acier au carbone XC38 et 42CD4 et l'autre à base d'un X30CR13 par projection thermique est présenté en deux parties.

La première partie met à la disposition du lecteur les éléments bibliographiques qui comprend deux chapitres.

Un premier chapitre on a décrit le principe de projection thermique et montre ses différents procédés. Le deuxième chapitre est une synthèse des données existantes sur les

# Introduction générale

---

caractéristiques et les propriétés des aciers en générale et la métallurgie du traitement thermique.

La deuxième partie concerne l'approche expérimentale de notre étude, comprend deux chapitres.

Le troisième chapitre pour lequel nous présenterons les matériaux utilisés ainsi que les deux techniques expérimentales ayant servies au rechargement de nos échantillons, (projection thermique, traitement thermique). Nous présenterons aussi toutes les techniques d'observations métallographiques, et d'essais mécaniques (dureté). Le quatrième chapitre englobe les résultats obtenus avec les interprétations correspondants.

On termine ce travail par une conclusion générale où nous reprenons les points essentiels de notre étude.

# **Références Bibliographiques**

## *Références bibliographiques*

- [1] A. PRONER, <<Revêtement par projection thermique>>, Technique de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, M1645.
- [2] S. NOUROUZI, <<Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation des dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive>>, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université de LIMOGES, Thèse N° 49, Année 2004.
- [3] L. PAWLOWSKI, <<Dépôts physiques –Techniques, microstructures et propriétés>>, édition PPUR 2003.
- [4] M. Fadhel BEN ETTUOUIL [Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc]. Université de Limoges, thèse de doctorat 2008.
- [5] : <http://tss.asminternational.org/pertal/site/TS>.
- [6] G. ENGLAND, <<Nature of thermal spray coatings>>, Journée Scientifique, ONERA, 2003.
- [7] Sophie. BARRADAS, <<étude, à l'aide du choc laser, des mécanismes d'adhérence aux interfaces cuivre/aluminium et cuivre/cuivre obtenues par projection thermique>>, thèse de Doctorat, Ecole Des Mines de Paris, 2004.
- [8] MAICHI MAAMAR [fabrication d'outils de coup par projection thermique et la boruration] Université Saad Dahleb Blida, Mémoire de Master 2012.
- [9] Yule, ANDREW, J. DUNKLEY <<Atomization of Melts for Powder Production and Spray deposition>>, Volume 36 A, Avril 2004-1007.
- [10] BOURABIA MOHAMED [Etude de l'usure des revêtements élaborés par projection thermique HVOF] Saad Dahleb Blida, Mémoire de Master 2013.
- [11] Dossier technique. «La projection thermique», MAG'MAT, N°22, Avril-Juin 2007.
- [12] R.LE GOUIC, <<Précis de soudage brassage et technique connexes>>, éditions Eyrolles, Paris 1978.
- [13] : <http://www.wear-management.ch>
- [14] M. VARDELLE, S.BANSARD, P .FAUCHAIS, <<La projection thermique : Formation du dépôt et contrôle en ligne du procédé>>, Journée Scientifique-Barrières thermiques-ONERA, 23 mai 2002.

- [15] Youcef SMAÏLI [contribution a la caractérisation mécanique et thermique des revêtements d'alumine et de carbure de tungstène obtenus par projection plasma]. Mémoire de Magister, Boumerdès 2006.
- [16] Mme DJEZIRI Djamila [comportement électrochimique d'un dépôt en aciers inoxydable réalisé par projection thermique] école nationale polytechnique, Mémoire de Magister 2007.
- [17] G. Beranger, G. Henry, G. Sanz. « Livre de l'acier », Ed. SOLLAC, 1996.
- [18] Lycée Vauban, Brest – classe de PTSI –
- [19] Hanifa Marouf [caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique E36/ NAXTRA70 dans l'assemblage de la pelle ] Mémoire de Magister, Tizi-Ouzou 2012.
- [20] J. paul bailon, J. Marie dorlot. « Des matériaux », 3<sup>eme</sup> édition 2000-2001.
- [21] S. Krakowiak, K. Darowicki, P. Slepiski, Electrochimica Acta 50 (2005) 2699–2704.
- [22] C. Pierre-Jean, Acier inoxydable, Critère de choix et structure, In : Techniques de l'Ingénieur, traité matériaux métalliques, Vol, MB4, dossier M4540, Paris (2000).
- [23] N. Lebozec, Thèse Docteur de l'université de Bretagne Occidentale (2000).
- [24] S. Maker, Thèse doctorat, Lyon (2006).
- [25] M. Guy, transformation dans les aciers, In : Techniques de l'Ingénieur, traité matériaux métalliques, Vol M, dossier M1115 (1998).
- [26] Cédric COURBON Vers une modélisation physique de la coupe des aciers spéciaux: intégration du comportement métallurgique et des phénomènes tribologiques et thermique saux interfaces.
- [27] Ludovic Avril Elaboration de revêtements sur acier inoxydable: simulation de la fusion par irradiation laser, caractérisation structurale, mécanique et tribologique.