

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

Ministère de l'Enseignement  
Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

*Ecole Nationale Polytechnique*



وزارة التعليم  
والبحث العلمي  
P0004/05A  
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

*Département métallurgie*

**PROJET DE FIN D'ETUDE**

**SUJET**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

**RECHARGEMENT EN CARBURE DE TUNGSTENE D'UN  
ACIER DE TYPE 42CD4 PAR SOUDAGE À FLAMME**

Dirigé par :

**Mr N. MESRATI**

Réalisé par :

**OUALI NABIL**

PROMOTION  
Juin 2005

E.N.P 10. avenue Hassen Badi -- EL-HARRACHE - ALGER

# DEDICACE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

**Je remercie DIEU** pour m'avoir aidé à achever ce travail que je dédie

A mes chers parent  
A mes sœurs et mes frères  
A mon petit neveu B. Yacine

A mes meilleurs amis  
A tous mes amis de l'université A. Zinasni, Mehdi, A. boulfefel,  
Amar, Salim, Okil, Omar, Nabil, Amine, Hmida, Rafik ...  
A tous mes amis de ENP

A toute personne ayant contribué à la réalisation de ce mémoire et que je  
ne pourrais jamais remercier .

**OUALI NABIL**

# REMERCIEMENTS



J'adresse mes sincères remerciements à monsieur N. MESRATI pour l'aide précieuse qu'il m'a apporté et pour son suivi tout au long de ce travail

Ma sincère reconnaissance est adressée à monsieur DJEGHLAL pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de ma soutenance, ainsi que Messieurs KESSER et BOUABDALLAH pour avoir accepté de participer à la critique et au jugement de mon travail.

A monsieur S. NAOURI le directeur de l'unité équipement tubulaire de l'ENTP ainsi que tous les travailleurs de cette unité pour l'aide apporté durant la période de mon stage.

A monsieur K. NECIB, directeur du laboratoire Génie des Matériaux ainsi que les étudiants de l'EMP qui m'ont permis de réaliser une partie des analyses de ma thèse.

A toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé : merci du fond du cœur.

# SOMMAIRE



Introduction générale.....	7
----------------------------	---

## *Partie I : Etude théorique*

### *Chapitre I : les traitements de surface*

I. Généralité.....	10
I.1. Introduction.....	10
I.2. les traitements conduisant à des couches minces.....	11
I.3. les traitements conduisant à des couches épaisses.....	11
II. La projection thermique.....	12
II.1. Historique.....	12
II.2. Principe de la projection thermique.....	12
II.3. Techniques de projection thermique.....	12
II.3.1. Flamme.....	13
II.3.2. Arc électrique.....	13
III. Rechargement par soudage.....	15
III.1. Introduction.....	15
III.2. Soudage plasma.....	15
III.3. Soudage à l'arc.....	15
III.4. Soudage à la flamme.....	16
III.4.1. Propriétés des flammes de chalumeaux.....	16
III.4.2. Chalumeaux .....	19
III.4.2.1. Principes de conception.....	19
III.5. Propriétés des principaux types de rechargement.....	20
III.5.1. Caractéristiques générales des dépôts.....	20
III.5.1.1. Formation et structure des dépôts.....	20
III.5.1.2. Structure métallurgique.....	21

III.5.1.3. Adhérence.....	22
III.5.1.4. La densité.....	23
III.5.1.5. la dureté.....	23
III.2. Substrat.....	23
III.2.1. Préparation de substrat.....	23
III.2.2. Température des pièces à souder.....	23
III.2.3. Préchauffage.....	24
III.3. Phénomènes métallurgiques et leurs conséquences.....	24

## *Chapitre II : phénomène de diffusion*

I. Introduction.....	25
II. Rappel sur la diffusion.....	25
II.1. Coefficient de diffusion et lois de Fick.....	26
II.2. Sauts atomiques et coefficient de diffusion.....	26
II.3. Calcul du coefficient de diffusion.....	27
II.3.1. Structure cubique centrée.....	27
II.3.2. structure cubique à faces centrées.....	28
III. Mécanismes élémentaires de diffusion.....	28
IV. Relation couples de diffusion binaire - diagramme d'équilibre.....	29
IV.1. Les deux éléments A et B sont totalement solubles à l'état solide.....	29
IV.2. Les deux éléments sont partiellement solubles, appartenant à un diagramme donnant un ou plusieurs domaines biphasés.....	29
IV.3. Stabilité et instabilité des interfaces formées par diffusion.....	30

## *Partie II : Etude pratique*

### *Chapitre I : approches expérimentales*

I. Introduction.....	32
II. Dépôt réaliser.....	33
III. Matériaux utilisés.....	33
IV. Equipement utilisé.....	34
V. Mode d'exécution.....	35

V.1. Préparation de substrat.....	35
V.2. Procédures de rechargement.....	36
V.2.1. Flamme-Fil.....	36
V.2.1.1. Condition du Rechargement.....	36
V.2.2. Flamme- Baguette.....	37
V.2.2.1. Condition du Rechargement .....	37
V.2.3.: Flamme-Poudre-Plaquette.....	38
V.2.3.1. Condition du Rechargement.....	38
VI. Caractérisation des différents rechargements.....	39
VI.1. Essais de micrographie.....	39
VI.2 Essai de microdureté.....	39

## *Chapitre II : Résultats et interprétations*

I. Analyse micrographique.....	42
I.1. Substrat.....	42
I.2. Procédure Flamme-Fil.....	43
I.3. Procédure Flamme-Baguette.....	44
I.5. Procédure Flamme-Poudre-Plaquette.....	45
I.5. Observations et interprétations.....	46
II. Analyses de la Microdureté.....	47
II.1. Procédure Flamme-Fil.....	49
II.2. Procédure Flamme-Baguette .....	50
II.3. Procédure Flamme-Poudre-Plaquette.....	51
II.4. Interprétation.....	52
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>54</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>55</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>57</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>58</b>

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# *Introduction générale*

## INTRODUCTION GENERALE



En raison de leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques ainsi que de leur facilité de mise en forme, les aciers faiblement alliés occupent une place bien privilégiée dans l'industrie et particulièrement dans la métallurgie du fer. Cependant, leur utilisation pour la fabrication des pièces travaillant dans des conditions sévères et très dures (hautes températures ....) reste très limitée. L'effet des divers phénomènes agressifs tels que: la *corrosion*, la *fatigue thermique* et *mécanique* ainsi que *l'usure* peut provoquer l'endommagement de la pièce qui apparaît souvent à la surface ou se propager à l'intérieur de celle-ci.

La technique de rechargement par soudage qui connaît actuellement un intérêt particulier, permet de résoudre ce genre de problèmes souvent complexes et difficiles.

Le rechargement par soudage est un terme générique qui regroupe un ensemble de procédés utilisés pour déposer des matériaux métalliques sur une pièce à revêtir. Ces revêtements sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels : nucléaire (modérateurs), aéronautique (ailettes de turbines fixes, chambre de combustion, pièces d'usure et d'abrasion,...), automobile (têtes de soupape, pales de turbocompresseur, pistons,...), industrie papetière, minière, chimique, *pièces de forage*,... Ils permettent de modifier les propriétés de volume de la pièce et de lui conférer des propriétés spécifiques en surface comme une bonne résistance à la corrosion et à l'usure ou des propriétés fonctionnelles (chimique, électrique, magnétique).

La résistance à l'usure mécanique est un des principaux domaines d'application des revêtements réalisés par rechargement.

Les caractéristiques qui jouent sur les performances de tenue d'un matériau à l'usure sont :

- ✚ Sa *dureté* : d'après la loi d'Achard, l'usure volumique du matériau est inversement proportionnelle à sa dureté ;
- ✚ Sa *capacité d'érouissage* : elle se traduit par une élévation de la dureté au cours du processus d'abrasion, mais la résistance à l'usure n'est cependant que faiblement améliorée ;
- ✚ Sa *microstructure* ;

- ⬇ *Sa ténacité.* Cette propriété joue un rôle déterminant pour les matériaux de faible ductilité ;

L'objectif de cette thèse est d'étudier et de comparer la dureté des différents dépôts métalliques réalisés via des rechargements par soudage.

Cette étude comporte deux parties principales, la première concerne l'étude bibliographique contenant deux chapitres :

Le premier chapitre présente d'abord une brève étude sur les traitements de surface qui comporte deux chapitres :

- ❖ *Généralités sur Les traitements de surface ;*
- ❖ *La projection thermique ;*
- ❖ *Rechargement par soudage ;*

Le deuxième chapitre présente aussi une étude bibliographique sur:

- ❖ *Les effets de la diffusion dans les matériaux solide ;*

La deuxième partie concerne l'étude pratique contenant deux chapitres :

- ❖ *les techniques expérimentales utilisées ;*
- ❖ *l'analyse métallurgique et mécanique du multimatériau élaboré ;*

Finalement, on termine ce mémoire par une conclusion générale comportant des suggestions.

# *Partie I :* *Etude théorique*

✚ **Chapitre I :** *les traitements de surfaces ;*

✚ **Chapitre II :** *phénomène de diffusion ;*

# *CHAPITRE I*

*Les traitements de Surfaces*



## LES TRAITEMENTS DE SURFACE

### I. Généralités

#### 1.1. Introduction

Les traitements de surface des aciers ont pour but l'obtention d'une dureté élevée en surface, jointe à une ténacité et à une ductilité importante au cœur. Ainsi une pièce peut être ramenée à présenter globalement une bonne ténacité, une bonne résistance quelle soit statique, dynamique ou en température, tout en offrant des propriétés superficielles spécifiques: *résistance à l'usure, aux frottements, à la corrosion*, ainsi qu'une constitution d'une barrière thermique ou électrique...etc. Devant une large gamme de traitements de surface, On peut considérer cinq grands groupes de traitements :

- ✚ Les traitements superficiels avec une transformation structurale (sans apport de matière) ;
- ✚ Les traitements thermochimiques avec diffusion ;
- ✚ Les traitements par conversion;
- ✚ les revêtements (ou dépôts);
- ✚ les revêtements organiques [1, 2].

### 1.2. Les traitements conduisant à des couches minces

Selon les applications, la zone traitée est en couche mince (moins de quelques dizaines de micromètres), et l'ensemble de ses applications est :

- ✚ Les traitements thermochimiques ;
- ✚ Les traitements thermoïoniques ;
- ✚ Les dépôts chimiques à partir d'une phase vapeur (*CVD*) ;
- ✚ Les dépôts physiques en phase vapeur (*PVD*) ;
- ✚ L'implantation d'ions [2, 3].

### 1.3. Les traitements conduisant à des couches épaisses

C'est l'ensemble des traitements qui permettent d'avoir la zone traitée en couche épaisse (quelques millimètres ou quelques centaines de micromètres) et qui sont :

- ✚ Projection thermique (plasma, flamme ou arc) ;
- ✚ Rechargement par soudage [2, 3, 4].

## II. La projection thermique

### II.1 Historique

En 1909, le docteur **SHOOP** observe une incrustation de plomb consécutive au tir d'une balle contre un mur en ciment. Il essaie alors de reproduire le phénomène en projetant du plomb fondu avec un vaporisateur, puis en projetant du plomb en poudre à travers une flamme. En 1914, il se tourne vers la projection de métal en fil. C'est depuis, qu'elle lui vienne l'idée de produire des revêtements par la projection thermique. Cette technique a été développée et continue d'être développée de nos jours [5, 6].

### II.2. Principe de la projection thermique

La projection thermique regroupe un ensemble de procédés dont le principe repose sur la projection de particules fondues ou semi fondues sur un substrat préalablement préparé. Les particules sont chauffées et accélérées à l'aide d'une source chaude qui peut être de différents types : *flamme, plasma ou arc* [6]

Le dépôt se forme par empilement successif des particules sur le substrat où elles viennent se solidifier et se refroidir très rapidement (par exemple 10  $\mu$ s pour la solidification en projection plasma).

Les différents procédés existant sont définis en fonction des sources de chaleur, des vitesses de particules, de l'état des particules (fondues ou semi fondues).

Parmi les nombreux traitements de surface, la projection thermique est certainement la technique qui présente le plus d'applications s'agissant:

- ✓ Du couple substrat-dépôt.
- ✓ Des dimensions des pièces à revêtir.
- ✓ De la vitesse de déposition élevée.

Cette technique présente néanmoins des barrières quant à sa pratique du point de vue adhérence (accrochage purement mécanique).

Signalons toutefois que des dépôts projetés thermiquement présentent des contraintes et des porosités résiduelles même au niveau de l'interface [6].

### II.3. Techniques de projection thermique

Les procédés de projections thermique commercialisés peuvent être divisés en deux catégories suivant la source d'énergie utilisée : **flamme ou arc électrique**

### II.3.1. Flamme

Le procédé de projection par flamme est basé sur la combustion d'un carburant sous forme gazeuse avec l'oxygène de l'air. Il existe plusieurs méthodes de projection par flamme :

✚ **Flamme-poudre** : Le matériau est introduit sous forme de poudre dans la flamme diffusante qui le véhicule jusqu'au substrat (figure I.1).

Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000°C, et donc les températures atteintes par les particules à projeter ne dépassent pas environ 2000°C.

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 2 à 3kg/h, sans échauffement important du substrat ( $T < 400^{\circ}\text{C}$ ) [6, 7].

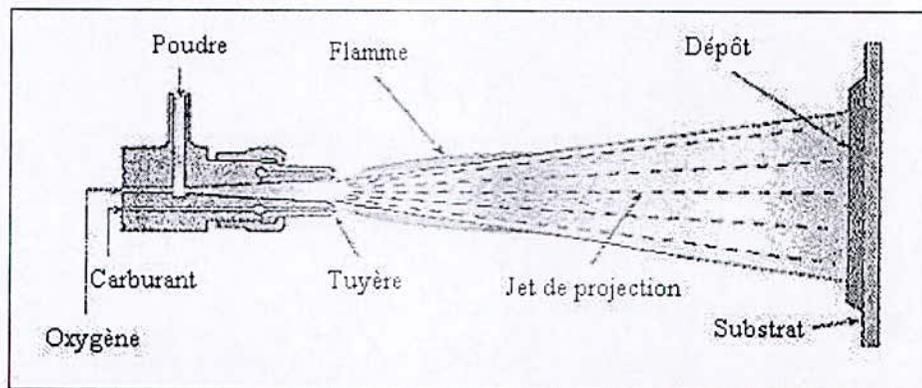


Figure I.1 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre [7]

✚ **Flamme-fil** : Où 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.

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 [7].

### II.3.2. Arc électrique

✚ **Plasma d'arc** : La source de chaleur utilisée est un plasma thermique créé par l'ionisation partielle d'un gaz plasmagène. Le jet de plasma est caractérisé par des

températures comprises entre 10000 et 14000 K. Celles-ci dépendent essentiellement de la composition du gaz plasmagène et de son enthalpie spécifique.

Les particules de poudre sont introduites dans le jet de plasma à l'aide d'un gaz porteur, généralement de l'argon en raison de sa masse molaire élevée (figure 1.2) [7].

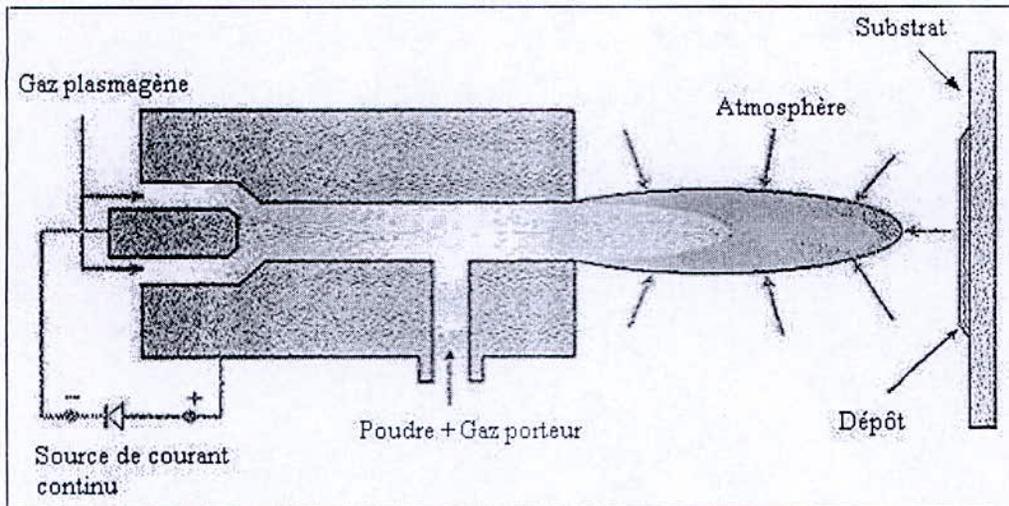


Figure 1.2: Schéma de principe d'une torche à plasma d'arc [7]

⚡ **Arc - fil** : La projection arc-fil est une technique de revêtement de surface relativement économique qui compte de nombreuses applications industrielles. Le principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables et à atomiser le matériau aussi fondu par un jet de gaz comprimé (généralement de l'air) qui le projette sur le substrat (figure 1.3) [6], [7].

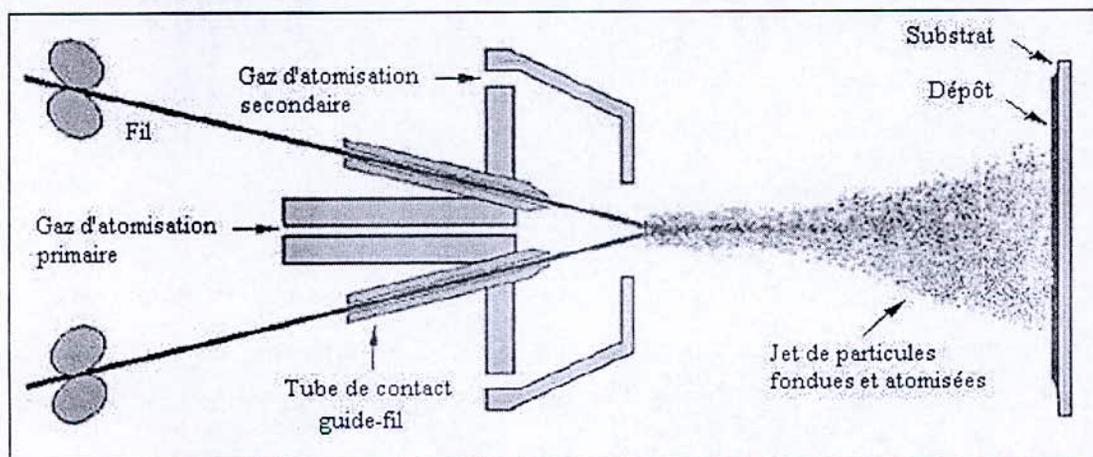


Figure 1.3 : Schéma de principe d'un dispositif de projection à l'arc électrique [7]

### III. Rechargement par soudage

#### III.1. Introduction

Le rechargement par soudage est une opération dans laquelle le dépôt à assembler participe par fusion sur le substrat qui permet d'obtenir une dureté élevée à la surface.

Différents techniques de rechargements durs par soudure sont disponibles. Le choix se fait en fonction des critères de sollicitation d'abrasion, de sollicitation de choc et de sollicitation thermique. Parmi ces techniques, on peut citer :

- ✦ *Le soudage plasma ;*
- ✦ *Le soudage à l'arc ;*
- ✦ *Le soudage à flamme [10], [11] ;*

#### III.2. Soudage plasma

Le procédé de soudage Plasma est une évolution du procédé TIG. La fusion est réalisée par chauffage à l'aide d'un jet de plasma qui engendre une très forte élévation de température (laquelle peut dépasser 10 000°C).

Le procédé de soudage plasma nécessite deux flux de gaz : le gaz central (pour la constriction de l'arc) et un gaz de protection du métal liquide (généralement un mélange d'argon et d'hydrogène) distribué à la périphérie de la buse [11].

#### III.3. Soudage à l'arc

L'apport de la chaleur utilisée pour former le bain de métal fondu est assuré ici par un arc électrique. Il est nécessaire de faciliter son amorçage et indispensable de le stabiliser. Pour ce faire on a recours :

- soit à des gaz ou des mélanges de gaz facilement ionisables ;
- soit à des composés fusibles et volatils (flux) placés, solides, au voisinage du plasma de l'arc ;

Le choix de ces produits (gaz ou composés fusibles) est réalisé de telle sorte qu'ils puissent assurer aussi la protection du métal fondu ; c'est ainsi que les composés fusibles devront former un laitier surnageant au-dessus de celui-ci (et éventuellement susceptible de réagir chimiquement avec lui pour l'affiner) tandis que les gaz seront souvent des gaz inertes (argon, hélium ou des mélanges additionnés parfois d'hydrogène) et parfois du dioxyde de

carbone (dont la décomposition dans l'arc donnera du monoxyde de carbone protecteur et de l'oxygène qui sera fixé par des éléments introduits par les produits d'apport) [10, 11].

### III.4. Soudage à la flamme

Le soudage à la flamme est un assemblage définitif exécuté sur des pièces métalliques qui s'impose pour diverses raisons : dimensionnelles (un pont), structurelles (un réservoir), constructives (une carrosserie), de poids (un panneau), économiques (un plancher) ou autres.

Il peut entrer en compétition avec d'autres modes d'assemblage tels le vissage, le rivetage, le collage, l'agrafage.

L'emploi d'une flamme pour le rechargement proprement dit, à l'aide d'un chalumeau, ne remonte en fait qu'au début du 20<sup>e</sup> siècle.

En effet, les températures élevées nécessaires au soudage des métaux (aciers notamment) n'ont pu être atteintes que lorsque l'on a pu disposer industriellement d'**Oxygène** comme comburant et d'**Acétylène** comme combustible.

L'essor de ce procédé d'assemblage, ainsi que des autres techniques associées à l'emploi de flammes, est donc relativement récent (*figure 1.4*) [9].

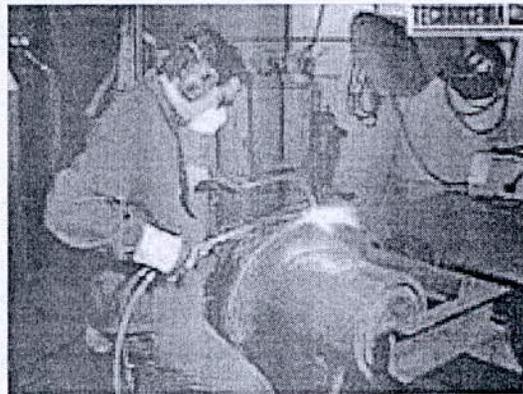


Fig.1.4 : Rechargement par soudage à flamme

#### III.4.1. Propriétés des flammes de chalumeaux

Pour pouvoir réaliser des rechargements dans de bonnes conditions un chalumeau doit délivrer, en le dirigeant sur la pièce, un flux gazeux à température la plus élevée possible, et dont les calories aura une concentration maximale sur la surface la plus réduite possible.

En outre, la composition chimique de ce flux gazeux est loin d'être indifférente, car des réactions sont possibles (et souhaitables) entre les gaz de combustion produits et le métal liquide.

#### a) Combustion et chauffage

La chaleur est produite par une réaction de combustion entre un comburant, l'oxygène, et un combustible, gazeux lui aussi.

L'oxygène intervient soit pur, soit en mélange avec l'azote (air), mais, dans ce dernier cas, les températures atteintes sont insuffisantes pour rechargé l'acier et la plupart des métaux usuels.

Une flamme oxy-gaz se compose d'un *dard* et d'un *panache* (figure 1.5), l'un et l'autre étant le siège de réactions différentes.

La température la plus élevée se situe à 1 ou 2mm de la pointe du dard et, selon la nature du gaz combustible choisi, elle varie de 2 700 à 3 200°C.

Rappelons que l'acier fond vers 1 560°C et que le laiton de soudo-brasage fond vers 870 à 900°C.

La chaleur produite par la combustion se retrouve pour partie dans le dard et pour partie dans le panache. Seule la partie dissipée dans le dard est vraiment utile. C'est pourquoi la chaleur totale de réaction n'est pas un critère de choix du gaz [10].

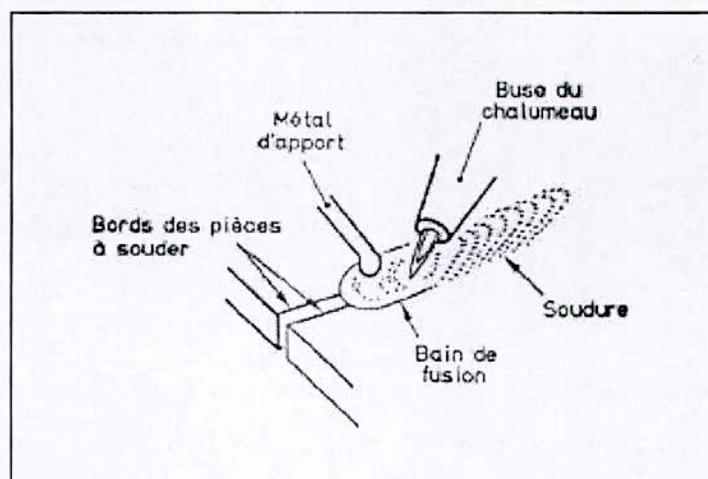
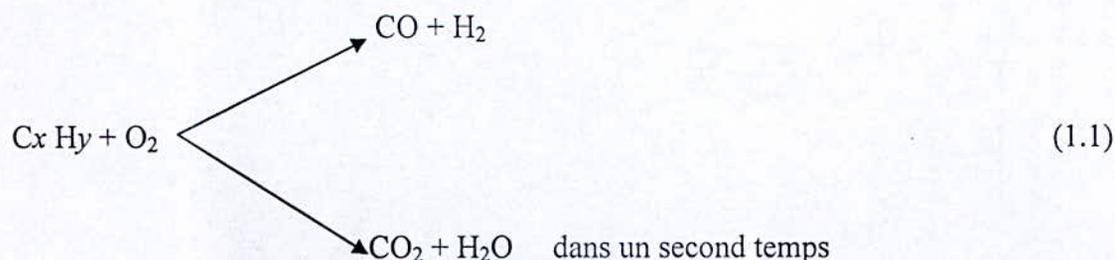


Fig. 1.5 : Exécution d'une soudure [9]

## b) Propriétés chimiques des flammes

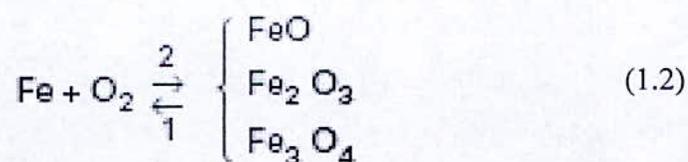
Les réactions (1.1) de combustion sont du type :



Pour les GPL, ces deux temps sont, au moins partiellement, confondus au niveau du dard, le second temps se terminant dans le panache (*figure 1.6*).

Pour l'acétylène, au contraire, les deux temps sont parfaitement séparés, le premier, générateur de  $\text{CO} + \text{H}_2$ , se produisant au niveau du dard, le second, générateur de  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  vapeur, se produisant dans le panache. Or  $\text{CO}$  et  $\text{H}_2$  sont des gaz réducteurs, alors que  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  ne le sont pas, la vapeur d'eau favorisant même l'oxydation.

La réaction (1.2) d'équilibre fer-oxydes de fer se formule comme suit [10] :



Il s'agit d'un équilibre entre phases liquide (fer et oxyde) et gazeuse (l'oxygène), puisque nous nous plaçons dans le cadre d'une opération de soudage et que le fer et l'oxyde sont liquides. Le sens de réaction 1 est *une réduction*, alors que le sens 2 est *une oxydation*.

La présence dans la phase gazeuse d'oxyde de carbone et d'hydrogène naissants va faire basculer l'équilibre dans le sens 1 et provoquer une réduction des oxydes pouvant surnager ou être dissous dans le bain de fer liquide. Ils seront générateurs d'une plus grande facilité opératoire associée à une soudure métallurgiquement plus saine.

L'acétylène est donc le combustible qui s'impose pour toutes les opérations de soudage des aciers [9].

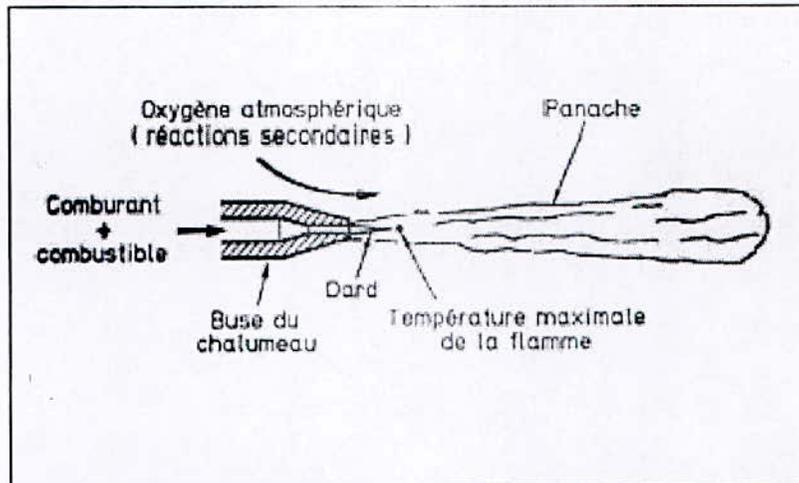


Fig. 1.6 : Flamme de chalumeau [9]

### III.4.2. Chalumeaux

#### III.4.2.1. Principes de conception

Un chalumeau de rechargement doit être en mesure de stabiliser une flamme à l'extrémité de sa buse, en interdisant les rentrées ou retours de flamme internes. En outre, l'opérateur doit pouvoir faire varier la puissance calorifique délivrée pour s'adapter aux divers travaux à exécuter.

Combustible et carburant étant mis en présence, la combustion a tendance à se propager, y compris à l'intérieur du chalumeau, d'où l'importance du terme précédent : « stabiliser la flamme ».

Il est certes possible de ne mélanger carburant et combustible qu'à l'extérieur du chalumeau, grâce à deux orifices de sortie séparés et convergents. Cela a été réalisé pour de gros chalumeaux chauffeurs (formage de tôles). Ces derniers sont remarquablement sûrs, mais leur rendement thermique reste médiocre. Il faut donc, pour le soudage, prémélanger avant l'orifice de sortie (la buse).

Un chalumeau comportera essentiellement (figure 1.7) :

- ✚ deux robinets assurant la fonction fermé/ouvert et la fonction réglage de débit ;
- ✚ un manche ;
- ✚ un organe de mélange carburant - combustible qui peut être un injecteur ou un simple mélangeur ;
- ✚ une lance et une buse de soudage.

Une flamme bien stabilisée suppose :

- ✚ une vitesse de sortie du mélange correcte : les valeurs usuelles se situent entre 40 et 90 m/s environ ; en deçà la rentrée de flamme survient presque toujours, et au-delà un phénomène de soufflage-extinction intervient ;
- ✚ un écoulement du mélange dans la lance aussi laminaire que possible ; or les robinets, placés en amont, sont générateurs de tourbillons ne pouvant que faciliter d'éventuelles rentrées de flamme [9].

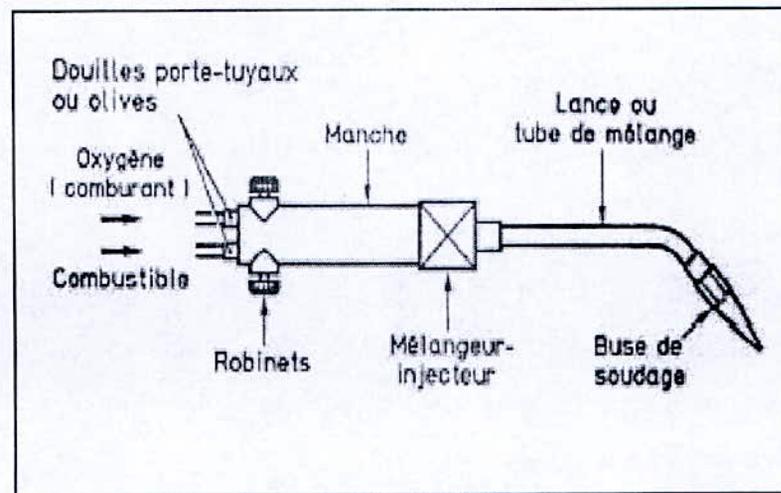


Fig.1.7 : Parties constitutives d'un chalumeau [9]

### III.5. Propriétés des principaux types de rechargement

#### III.5.1. Caractéristiques générales des dépôts

##### III.5.1.1. Formation et structure des dépôts

Les dépôts formés par rechargement par soudage sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu. La structure ainsi formée est du type lamellaire.

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.

Deux types de structures existent après impact (*figure I.8*).

- ✚ 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 ;
- ✚ 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 [6].

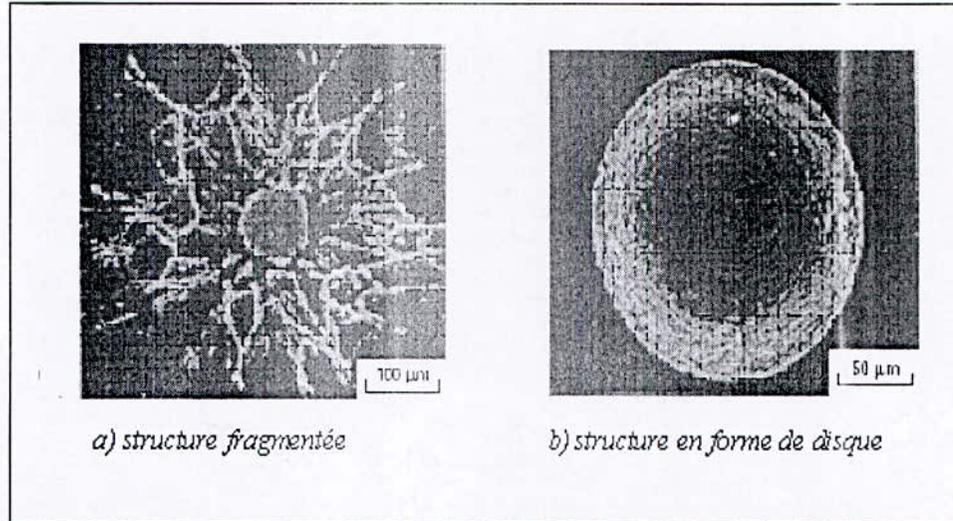


Fig.1.8 : Mécanismes d'écrasement des particules [6]

### III.5.1.2. Structure métallurgique

La formation du revêtement 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 (figure 1.9).

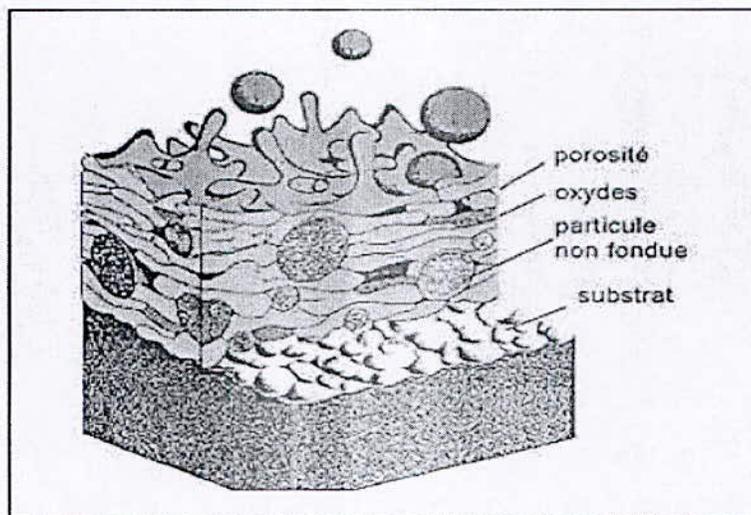


Fig.1.9 : Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par Rechargement par soudage [7]

Les dépôts sont généralement stratifiés, s'ils ne sont pas traités a posteriori. 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 (figure I.10).

Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux mêmes, des particules non fondues 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.

Enfin, lors des rechargements réalisés dans l'air, les particules et le substrat sont soumis au phénomène d'oxydation. Il n'est ainsi pas rare de constater une augmentation du taux d'oxygène pendant rechargement [7, 6].

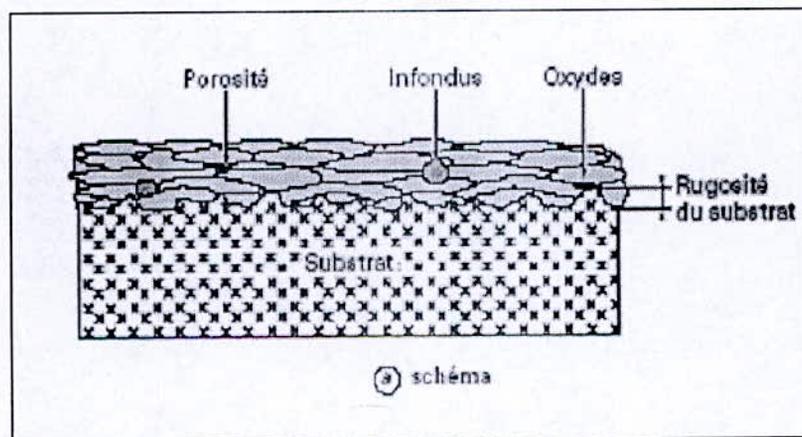


Fig.I.10 : coupe d'un dépôt obtenu par rechargement par soudage [6]

### III.5.1.3. Adhérence

Les dépôts 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,

#### III.5.1.4. La densité

Sa porosité est plus ou moins importante selon le mode de rechargement, la forme et la vitesse des matériaux utilisés pour les dépôts métalliques.

La densité est fonction du taux d'oxydes formés pendant le rechargement.

#### III.5.1.5. la dureté

La dureté du dépôt dépend des paramètres de rechargement.

### III.2. Substrat

Dans le cas du rechargement par soudage, 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 à son substrat [7].

#### III.2.1. Préparation de substrat

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 le rechargement impose de réaliser une série d'opérations indispensables dans un ordre bien établi [8] :

- ⬇ un dégraissage qui consiste à débarrasser la surface des films passivant et des graisses.
- ⬇ un traitement mécanique appelé « sablage » ou projetage qui permet la création d'un état de surface) [7].

#### III.2.2. Température des pièces à souder

Lors du rechargement des aciers de construction et de aciers résistant à l'abrasion, il est important de réduire le risque de fissuration a' froid (également appelée fragilisation due a' l'hydrogène ou fissuration retardée). La présence d'hydrogène associée aux contraintes dans un assemblage soudé est la raison principale de ce type de fissuration.

Le risque de fissuration peut être réduit en :

- ⬇ Préchauffant le métal de base avant le rechargement ;
- ⬇ S'assurant que les surfaces du joint sont parfaitement propres et sèches ;
- ⬇ choisissant un métal d'apport a' faible teneur en hydrogène ;

### III.2.3. Préchauffage

Le préchauffage est spécialement nécessaire pour le pointage et pour les passes de fond. Plus la température est élevée pendant et après le rechargement, plus l'hydrogène pourra s'échapper facilement de l'acier.

Le besoin en préchauffage augmente avec l'épaisseur de tôle d'une part pour compenser le refroidissement plus rapide et d'autre part.

Lors de la réalisation d'un rechargement à partir de différentes nuances d'acier ou lors du soudage avec des métaux d'apport ayant un carbone équivalent supérieur à celui du métal de base, le besoin en préchauffage se détermine en fonction de l'acier (ou de métal d'apport) [12].

### III.3. Phénomènes métallurgiques et leurs conséquences

Le bref rappel des principes des différents procédés de rechargement montre qu'un certain nombre de phénomènes métallurgiques pourront être mis en jeu ; leur liste, tous procédés confondus, s'établit comme suit :

✚ *phénomènes dus aux variations de température :*

- Fusion et élaboration du bain liquide,
- Solidification,
- Transformations allotropiques,
- Dilatation ;

✚ *phénomènes dus à l'environnement :*

- Action de l'atmosphère,
- Actions des polluants ;

✚ *phénomènes dus aux inclusions :*

✚ *Transformations à l'état solide :*

- Au chauffage : la zone affectée par la chaleur (ZAT) dans le métal de base ;
- Au refroidissement : à nouveau la zone affectée par la chaleur dans le métal de base mais aussi le métal fondu et solidifié [6].

# *CHAPITRE II*

*Phénomènes de Diffusion*



## PHENOMENE DE DIFFUSION

### 1. Introduction

Les phénomènes de diffusion à l'état solide correspondent à des sauts effectués par les atomes dans les défauts de cristal, sous l'effet de l'agitation thermique. Les traitements superficiels : dépôt suivi d'un traitement thermique, font tous intervenir volontairement les mécanismes de diffusion. Les couches formées seront représentatives du couple **métal/dépôt** et de son diagramme d'équilibre. La qualité de ces couches dépend de la complexité des cinétiques de réaction aux interfaces, de l'effet KIRKANDALL (porosité), des affinités chimiques multiples et des interactions solide/solide et solide/liquide.

La diffusion est un phénomène important, qui est à la base de tous les traitements de surface, surtout les traitements thermiques industriels conditionnant les propriétés structurales des matériaux en service [13].

### II. Rappel sur la diffusion

Le transport thermiquement activé des atomes à travers la matière s'appelle la diffusion. Le flux de plusieurs modes de diffusion d'atomes dans un volume granulaire de métal ou d'alliage peut faire que :

- a) Les atomes peuvent se déplacer à travers le réseau : c'est *la diffusion en volume* ;
- b) Ils peuvent se propager à la surface de l'échantillon ;
- c) Ils peuvent aussi diffuser le long des joints des grains : c'est *la diffusion intergranulaire* ;
- d) Ils peuvent enfin longer les dislocations ou tout autre défaut linéaire ou plan.

Chaque processus a son énergie d'activation caractéristique [14].

### II.1. Coefficient de diffusion et lois de Fick

La diffusion est, au premier abord, semblable à la conduction de la chaleur. Fick proposa l'hypothèse suivante : le flux d'une sorte d'atomes donnée serait proportionnel au gradient de composition de la même manière que le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température. Pour un flux unidirectionnel dans la direction des  $x$ , l'équation correspondante pour chaque espèce d'atomes s'écrit :

$$J_A = -D_x \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.1)$$

C'est *la première loi de Fick*. Cette loi ne peut être appliquée expérimentalement que s'il existe un état stationnaire pour lequel, la concentration en chaque point est invariante. L'équation pour un flux non stationnaire est obtenue à partir de l'équation (2.1) en considérant la vitesse de croissance du nombre d'atomes  $\frac{\partial c}{\partial t}$  dans un volume unitaire de l'échantillon. Elle est égale à la différence entre le flux entrant et le flux sortant de ce volume. Le flux entrant étant  $J_x$  et le flux sortant étant  $J_x + \frac{\partial J_x}{\partial x}$ . La différence serait :  $-\frac{\partial J_x}{\partial x}$ .

Donc :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial J_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2.2)$$

C'est *la deuxième loi de Fick*. Si  $D$  est indépendant de la concentration, cette équation devient : [14]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

### II.2. Sauts atomiques et coefficient de diffusion

Au cours du phénomène de diffusion, les atomes sautent de site en site du réseau par des mécanismes que nous aborderons plus loin.

La trajectoire d'un atome diffusant est formée d'une succession aléatoire de vecteurs sauts  $\delta l$ , tous de même longueur mais orientés de manière aléatoire l'un par rapport à l'autre. Ce mouvement est souvent qualifié de marche au hasard (random walk).

### II.3. Calcul du coefficient de diffusion

Connaissant la relation entre la projection sur un axe du parcours quadratique moyen  $\langle x^2 \rangle$  et la fréquence de saut d'un atome donné  $\Gamma_i$  :

$$\frac{\langle x^2 \rangle}{t} = \sum_{i=1}^{\zeta} \Gamma_i \delta x_i^2 \quad (2.4)$$

Considérons un cylindre de section unité parallèle à l'axe des  $x$ . tous calculs faits et après simplifications, Einstein aboutit en 1908 à l'équation suivante :

$$J = - \frac{\langle x^2 \rangle}{2t} \frac{dn}{dx} \quad (2.5)$$

Le flux est proportionnel au gradient de concentration. On retrouve la forme de l'expression proposée par A.Fick en 1855. Le facteur de proportionnalité entre le flux et le gradient est le coefficient  $D$ . Il est donné par l'équation d'Einstein :

$$D = \frac{\langle x^2 \rangle}{2t} \quad (2.6)$$

Le coefficient de diffusion a pour dimensions  $L^2 T^{-1}$ .

Appliquons l'équation (2.4) aux structures cubiques :

Par raison de symétrie, toutes les fréquences de sauts sont égales. Soit leur valeur commune :  $\Gamma = \Gamma_x$ . Donc :

$$D = \frac{\langle x^2 \rangle}{2t} = \frac{1}{2} \Gamma_x \sum_{i=1}^{\zeta} \delta x_i^2 \quad (2.7)$$

#### II.3.1. Structure cubique centrée

$\delta = 8$  ET nous avons quatre sauts ayant pour projection,  $\frac{\alpha}{2}$  et quatre autres  $(-\frac{\alpha}{2})$  :

$$D = \Gamma_s \alpha^2 = \frac{1}{12} \Gamma \alpha^2 \quad (4.8)$$

### II.3.2. Structure cubique à faces centrées

$\delta = 12$  ET on compte quatre sauts de projection  $\alpha/2$  et quatre  $(-\alpha/2)$

$$D = \frac{1}{8} \Gamma_s \alpha^2 = \frac{1}{12} \Gamma \alpha^2 \quad (2.9)$$

### III. Mécanismes élémentaires de diffusion

Les principaux mécanismes possibles dans un corps simple sont groupés dans le schéma de la (figure II.1) :

1. Echange direct.
2. Echange cyclique.
3. Mécanisme lacunaire
4. Mécanisme interstitiel.
5. Mécanisme interstitiel indirect.

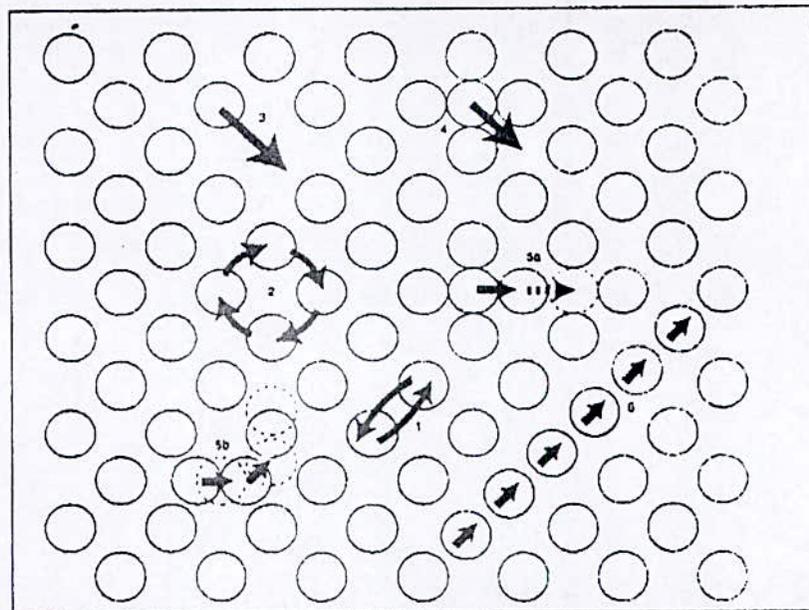


Fig. II.1 : Principaux mécanismes de la diffusion atomique [14]

#### IV. Relation couples de diffusion binaire-diagramme d'équilibre

##### IV.1 Les deux éléments A et B sont totalement solubles à l'état solide (figure II.2.)

Tout traitement thermique en condition isotherme du couple AB conduit à deux gradients de concentration complémentaires de 0 à 100% ayant une allure monotone. Toutefois, les métaux de base n'ayant pas forcément des coefficients de diffusion identiques, malgré leur parenté proche (au niveau du rayon atomique, structure cristalline, ...etc.), il s'ensuit que l'un des deux envahisse plus rapidement la partie opposée du couple: ainsi les deux gradients ne sont pas centrés sur l'interface initiale  $x = 0$ , mais déporté vers l'élément qui diffuse le moins vite.

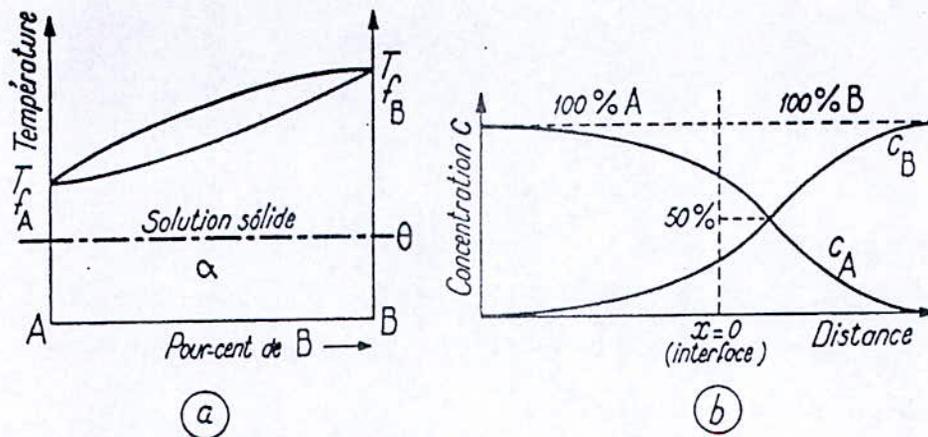


Fig. 2.2 : Gradients de diffusion entre deux métaux totalement solubles à l'état solide [13]

##### IV.2. Les deux éléments sont partiellement solubles, appartenant à un diagramme donnant un ou plusieurs domaines biphasés

Tout traitement de diffusion effectué en condition isotherme à l'état solide donne comme précédemment un gradient de concentration correspondant à la phase a du côté de A et un gradient de concentration correspondant à la phase du côté de B

(figure II.3). Toutefois, lorsque la diffusion a été suffisante pour atteindre les limites de solubilité  $C_\alpha$  et  $C_\beta$ , elle ne peut se poursuivre qu'en formant les deux phases  $\alpha$  et  $\beta$ .

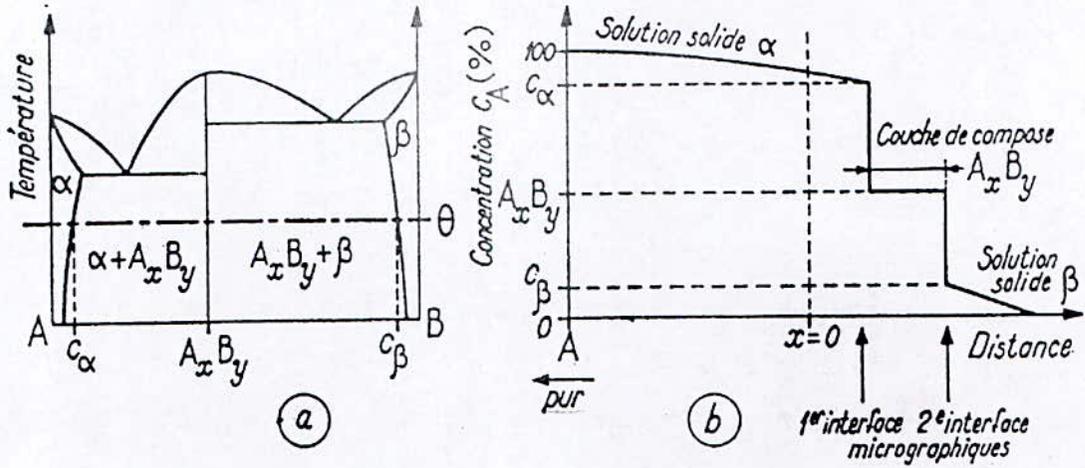


Fig. II.3 : Gradients de diffusion entre deux métaux A et B non totalement solubles et conduisant à la formation d'un composé défini  $A_xB_y$ .

#### IV.3. Stabilité et instabilité des interfaces formées par diffusion

La formation micrographique d'une interface par diffusion limitant deux phase est rarement dans un état d'équilibre stable puisqu'elle est le siège continu d'un transfert d'atomes, dans un système qui est lui même hors d'équilibre. Il est en outre, difficile de contrôler si les compositions chimiques dans une interface sont bien celles de l'équilibre thermodynamique [13].

# *Partie II :* *Etude pratique*

✚ **Chapitre III :** *Approche expérimentales ;*

✚ **Chapitre IV :** *Résultats et interprétations ;*

# *CHAPITRE III*

*Approche Expérimentale*



## APPROCHES EXPERIMENTALES

### I. Introduction

Cette étude permettra la maîtrise des principales techniques du rechargement par soudage pour réaliser un multimatériau très dur.

Différentes analyse ont été réalisés dans ce but, c'est-à-dire démontré les effets métallurgiques et mécaniques que les différentes techniques de rechargement peuvent produire sur le multimatériau réalisé.

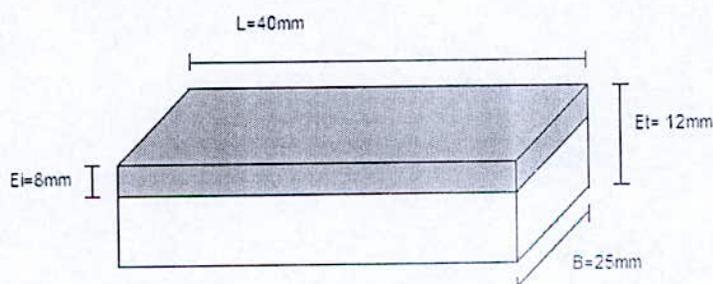
Les travaux expérimentaux inhérents à la technique de rechargement par soudage ont été réalisé à l'Entreprise Nationale de Travaux au Puit (ENTP).

Les analyses de micrographie et microdureté, ont été réalisé à l'Ecole Militaire Polytechnique (EMP).

Notre étude expérimentale est comparative de trois méthodes de rechargement :

- ⚡ Rechargement avec le procédé : *Flamme-poudre-plaquette*;
- ⚡ Rechargement avec le procédé : *Flamme-Fil* ;
- ⚡ Rechargement avec le procédé : *Flamme-Baguette* ;

Les échantillons que nous avons réalisés puis étudiés ont une forme rectiligne avec les dimensions suivantes (*figure III.1*) :



- ⚡ Epaisseur totale  $E_T = 12\text{mm}$  ;
- ⚡ Epaisseur initiale  $E_I = 8\text{mm}$  ;
- ⚡ Largeur  $B = 25\text{mm}$  ;
- ⚡ Longueur  $L = 40\text{mm}$  ;

Fig.III.1 : Forme des échantillons

## II. Dépôt réaliser

On a mis au point trois types de dépôt comme l'indique le tableau qui suit :

Procédure	Flamme-Fil	Flamme-Baguette	Flamme-Poudre-Plaquette
Dépôt	▪ ~100% carbure de tungstène (wc)	▪ ~80% carbure de tungstène (wc)	▪ ~70% carbure de tungstène (wc)

Tableau III.1 : Pourcentage (% massique) de carbure de tungstène dans le dépôt

## III. Matériaux utilisés

### ✓ SUBSTRAT

- Le substrat est un acier en carbone faiblement allié de type **42CD4** de forme rectiligne (*figure III.2*), qui est très utilisé en industrie mécanique, sa composition chimique est illustrée dans le tableau qui suit :

Eléments	C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Cr %	Mo %
Composition chimique (%massique)	0.39	0.73	0.25	0.002	0.013	0.05	0.95	0.15

Tableau III.2: Composition chimique du substrat

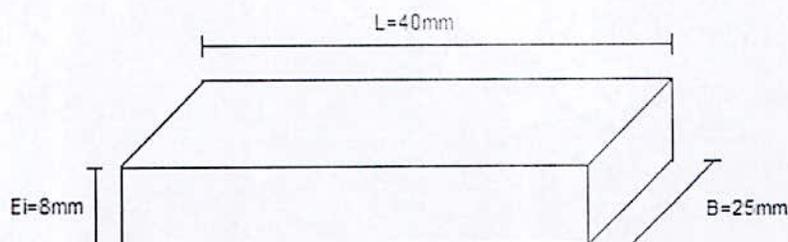


Fig.III.2 : Forme et dimension de substrat

- ✓ **BAGUETTE D'ETAMAGE**
  - Baguettes enrobées d'étamage en Cuivre de diamètre  $\Phi=5\text{mm}$ .
- ✓ **BAGUETTE DE RECHARGEMENT**
  - Baguette de carbure de tungstène  $\Phi=10\text{mm}$ .
- ✓ **FIL D'APPORT**
  - Fil enrobé de carbure de tungstène de diamètre  $\Phi=8\text{ mm}$ .
- ✓ **POUDRE DE METALLISATION**
  - Poudre en molybdène Mo.
- ✓ **PLAQUETTES CARBURE**
  - Plaque rectiligne en alliage Co-WC ( $h \times b \times l = 4 \times 5 \times 25\text{ mm}^3$ ), la composition chimique de la plaque est comme suit:

Elément	WC	Co
Composition chimique (%massique)	89 %	11 %

Tableau III.3 composition chimique de la plaque

#### IV. Equipement utilisé

- ✓ **CHALUMEAU**
  - Type techno 2000.
- ✓ **GAZ**
  - Bouteille d'oxygène et acétylène avec détendeur de pression.
- ✓ **FOUR A GAZ**
  - Adaptable au diamètre du substrat à recharger (four mobile).
- ✓ **SERVANTE**
  - Permettant la rotation du substrat sur lui-même et servant de support.
- ✓ **THERMOMÈTRE**
  - Thermomètre digital type Testo 900 pour prise de température de substrat au cours de chauffage.

✓ **DISQUES ABRASIFS**

- Disque diamètre *180mm* Type Norton *F826* grain *29*

✓ **MEULEUSE ELECTRIQUE**

- Meuleuse Black et Decker Type KG2023, 2000W, 220V, 9.6A ; 6300tr/mn Diam 230mm.

**V. Mode d'exécution****V.1. Préparation de substrat**

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 multimatériau par le rechargement par soudage impose avant, au cours et après de celui-ci de réaliser une série d'opérations indispensables dans un ordre bien établi, sous cités ici :

**Avant :**

- ⚡ Placer le substrat à recharger sur servante à porter de main du soudeur ;
- ⚡ Observer l'état de surface de substrat. Si celle-ci est prête pour le rechargement ;
- ⚡ Nettoyer la surface à recharger après l'opération d'ébauche de rectification de tournage à l'aide d'un disque à meuler abrasif ;
- ⚡ un traitement mécanique appelé « sablage » ou projetage qui permet 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 rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique.
- ⚡ Préchauffer le substrat à la température de 300°C à 400°C en utilisant le four qui convient ;
- ⚡ Vérifier la température à l'aide du thermomètre ;
- ⚡ Nettoyer de nouveau à l'aide de disque à meuler pour enlever la calamine de chauffe ;
- ⚡ On dépose sur la surface à recharger une sous-couche d'accrochage (poudre de Mo) à l'aide d'un chalumeau spéciale (Type techno 2000), l'épaisseur de cette couche est d'environ 0.1mm ;

**Au cours :**

- ↓ Le maintien à une température constante: se fait à l'aide du four à gaz en respectant toujours le temps de chauffe afin d'éviter les chocs thermique ;

**Après :**

- ↓ le refroidissement : après le rechargement, on plonge la pièce à recharger dans un bac de sable pour éviter un refroidissement rapide (risque de fissuration de dépôt), le temps de refroidissement est de 24 heures à l'abri des courants d'air.

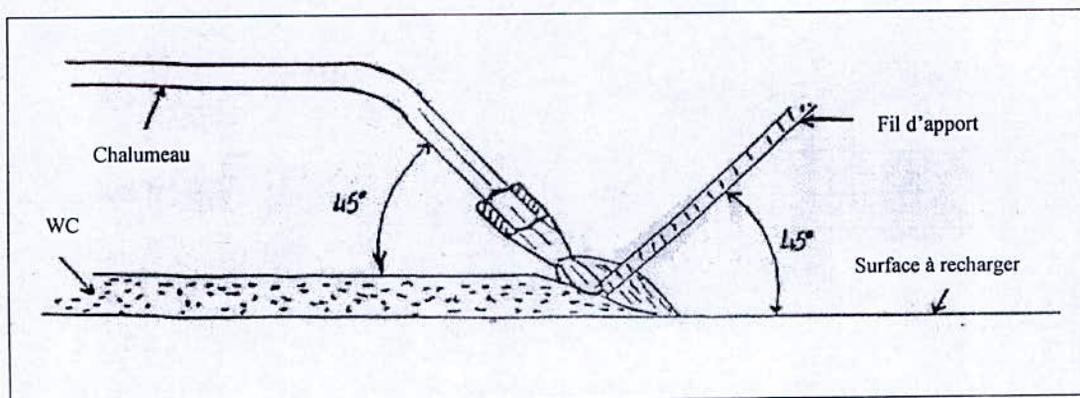
**V.2. Procédures de rechargement****V.2.1. Flamme-Fil**

Elle consiste à recharger un substrat par un fil d'apport (fil de carbure de tungstène de diamètre  $\Phi = 8\text{mm}$ ), en utilisant un chalumeau (Type techno 2000).

Température de chalumeau entre  $(2700-3200)^\circ\text{C}$

**V.2.1.1. Condition du Rechargement****1. Réglage de chalumeau :**

- ↓ pression d'oxygène : 3 à 4 bars.
- ↓ pression d'acétylène : 0.8 bars.

**2. Position du chalumeau et le fil d'apport (figure III.3) :**

**Fig.III.3 : Position du chalumeau et le fil d'apport**

### Remarques importantes

- Le fil d'apport n'est jamais en contact avec la pièce ;
- On assure le balayage constant du chalumeau afin d'éviter les surchauffes locales ;
- Bien chasser les oxydes avec le chalumeau ;

### V.2.2. Flamme- baguette

Elle consiste à recharger un substrat par :

- Une baguette de rechargement en carbure de tungstène de diamètre  $\Phi = 10\text{mm}$ ,
- Une baguette d'étamage en cuivre de diamètre  $\Phi = 5\text{mm}$ , en utilisant un chalumeau (Type techno 2000).

#### V.2.2.1. Condition du Rechargement

##### 1. Réglage de chalumeau :

- ⬇ pression d'oxygène : 3 à 4 bars.
- ⬇ pression d'acétylène : 0.8 bars.

##### 2. Position du chalumeau et la baguette (figure III.4) :

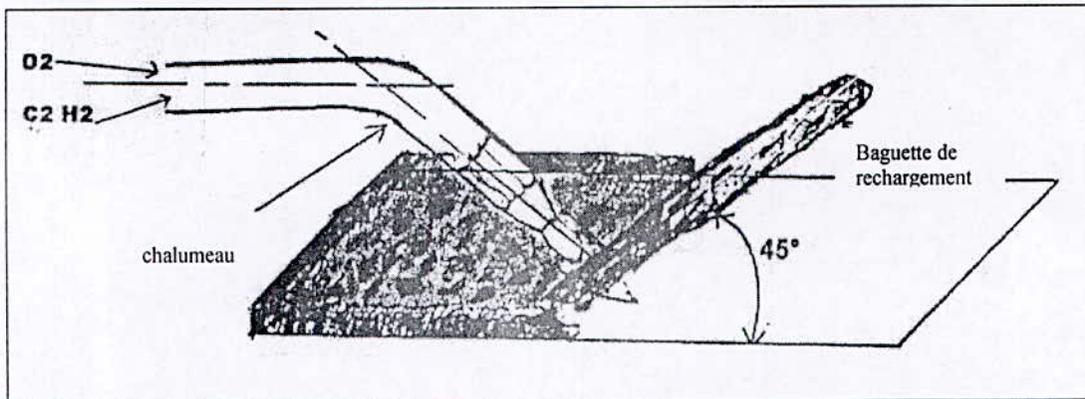


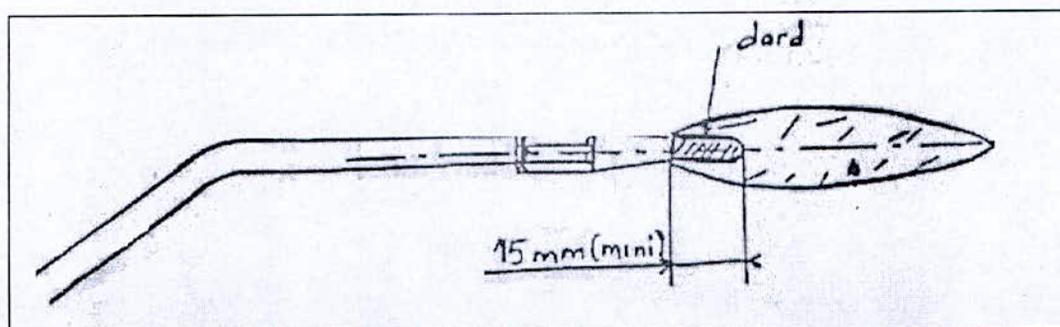
Fig.III.4: Position du chalumeau et la baguette

##### 3. Utilisations des baguettes :

- ⬇ On procède à l'opération d'étamage en utilisant la baguette enrobée de cuivre de diamètre 5mm. Faire fondre celles-ci en utilisant la flamme neutre du chalumeau Techno

2000, régler la longueur du dard entre 13 et 15mm. La vitesse de déplacement de la torche reste à l'appréciation du soudeur,

↓ On procède ensuite au rechargement à la baguette en carbure de tungstène sur la surface à recharger et cela en faisant fondre cette dernière uniformément par la flamme du chalumeau Techno 2000 en réglant la longueur du dard entre 13 et 15mm (figure III.5) et la vitesse de déplacement proportionnellement au degré de fusion de la baguette. Au fur et à mesure que la baguette fond on peut utiliser un rond de carbone ou une baguette de même nature pour étaler la fusion avant solidification.



**Fig.III.5: Longueur de dard au cour de rechargement**

### V.2.3. Flamme-Ppoudre-Plaquette

Elle consiste à accrocher des plaquettes en carbure de tungstène par fusion sur un substrat puis en remplissant les intervalles par une poudre de Mo à l'aide d'un chalumeau spéciale (techno 2000).

#### V.2.3.1. Condition du Rechargement

##### 1. Réglage de chalumeau :

- ↓ Pression d'oxygène : 4 à 5 bars.
- ↓ Pression d'acétylène : 1.2 à 1.5 bars.

##### 2. Disposition des plaquette et brasage sur la surface à recharger :

- ↓ Disposer par tiers les plaquettes sur la surface à recharger à l'aide d'une pince brucelles et d'un petit pic ;

- ✚ Tapoter un coup sur chaque plaquette venant d'être posée afin de la faire adhérer sur le substrat ;
- ✚ Projeter la poudre sur les plaquettes en place ;
- ✚ Accrocher les plaquettes par fusion sur la surface du substrat et puis remplir les intervalles ;

### 3. Position du chalumeau (figure III.6)

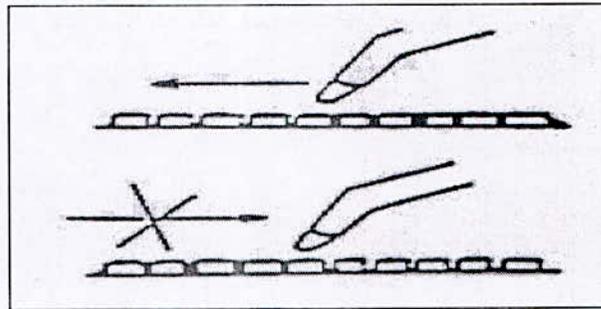


Fig.III.6: Position du chalumeau

## VI. Caractérisation des différents rechargements

### VI.1. Essais de micrographie

Pour contrôler la qualité de nos dépôts et pour mettre en évidence les contrastes interfaciaux, la majorité de nos photos ont été prise au niveau de l'interface **substrat / dépôt**. Cette analyse nous permet de visualiser la nature des phases en présence et de mettre en évidence la grandeur et la forme des grains, les divers constituants du multimatériau, ainsi que la structure obtenue après post-traitement.

Avant de procéder à l'observation micrographique, nous avons préparé les surfaces aux polissages mécaniques sur du papier abrasifs à grains de plus en plus fin (120, 360, 600, 1000 et 1200). La finition a été faite sur papier feutre à l'aide d'une suspension d'aluminium à  $0.03 \mu\text{m}$  pour obtenir une surface miroir.

### VI.2 Essai de microdureté

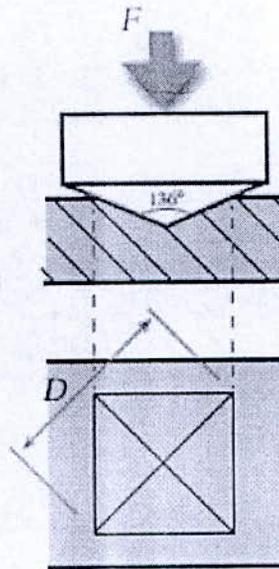
L'essai effectué est caractérisé par l'empreinte faite par un Indenteur sous une charge donnée durant 15 secondes (figure III.7). L'Indenteur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de  $136^\circ$ . La charge appliquée est de 700g. La mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope.

La dureté Vickers (HV) est calculée e à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{1,854 F}{D^2}$$

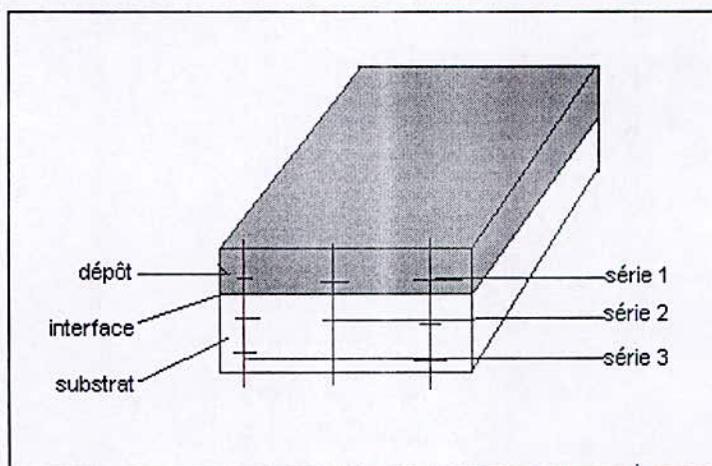
Où F est la charge appliquée en kgf et D, la diagonale de l'empreinte en  $\mu\text{m}$ .

Cet essai est appliqué principalement aux métaux, mais peut l'être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges.



**Fig.III.7 : Principe de l'essais Vickers**

Les mesures de microdureté <<Vickers>> ont été réalisées sur la surface d'un échantillon préalablement poli, en faisant succéder des pointées de microdureté, alignées dans une même direction, en allant du substrat vers le dépôt, comme illustré dans le schéma ci-dessous (*figureIII.8*). On a effectué pour chaque zone du multimatériau (substrat, voisinage de l'interface et dépôt) trois séries de mesures pour avoir des résultats plus représentatifs.



**Fig.III.8 : Schéma représentant les différentes séries de mesure de microdureté**

*CHAPITRE IV*  
*Résultats et Interprétations*

# IV

## RESULTATS ET INTERPRITATIONS

### I. Analyse micrographique

#### I.1. Substrat

L'observation du substrat après le rechargement par soudage montre une structure martensitique.

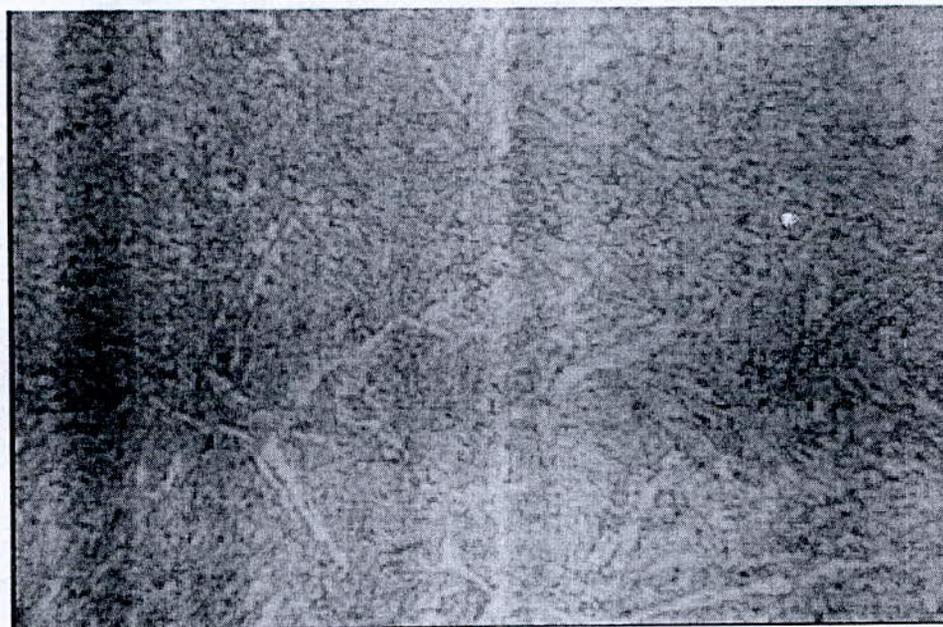


Fig.IV.1: Micrographie optique du substrat avec attaque chimique (XG1500)

I.2. Procédure Flamme-Fil

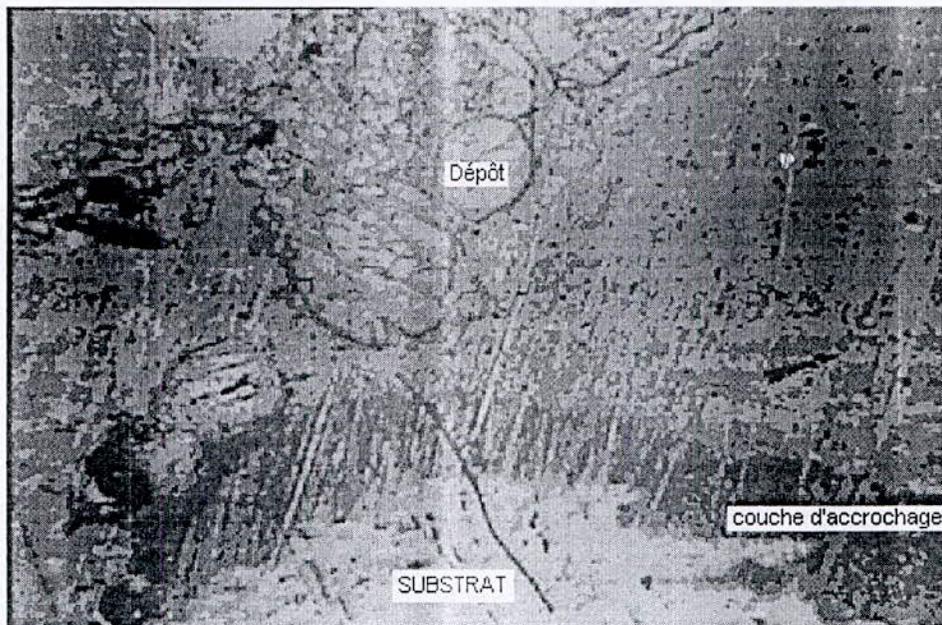


Fig.IV.2 : Micrographie Optique du multimatériau dépôt/couche d'accrochage/ substrat (XG48)

I.3. Procédure Flamme-Baguette



Fig.IV.3 : Micrographie Optique du multimatériau dépôt/couche d'accrochage/ substrat (XG48)

I.4. Procédure Flamme-Poudre-Plaquette

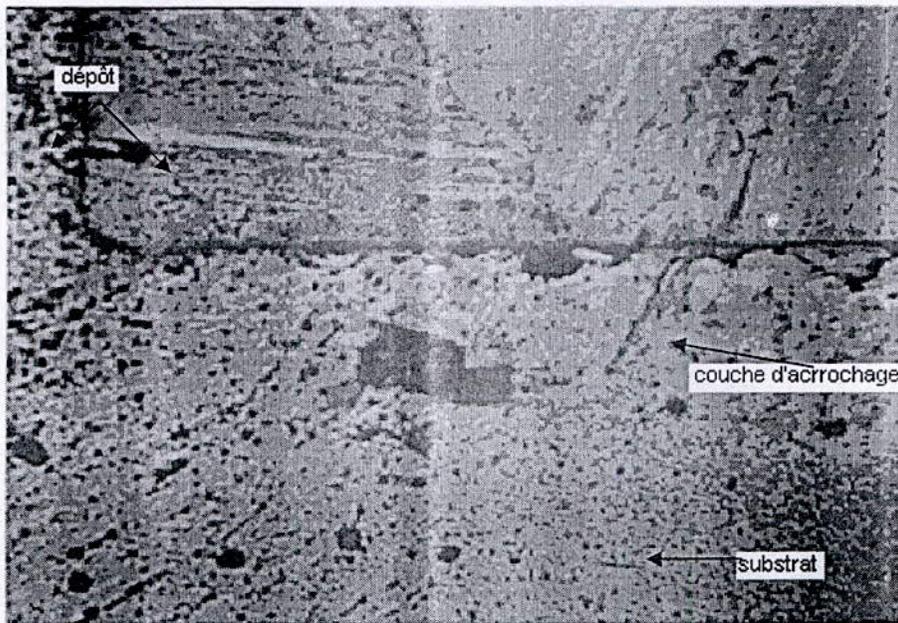


Fig.IV.4: Micrographie Optique du multimatériau dépôt/couche d'accrochage/ substrat (XG75)

### I. 5. Observations et interprétations

On remarque que :

✚ *figure (IV.3)* : Le substrat comporte des micros fissures, de la porosité et des particules non fondues en wc. Les particules fondues s'écrasent et s'étalent sur le substrat et forment des lamelles fines qui s'adaptent aux irrégularités de la surface ;

✚ *figure (IV.4)* : Le deuxième cas présente beaucoup des particules en wc non fondues, présentes aussi dans le dépôt. On note aussi la présence des traces d'oxydes, révélant que le cuivre s'oxyde très facilement lors du rechargement à cause de l'environnement non contrôlé.

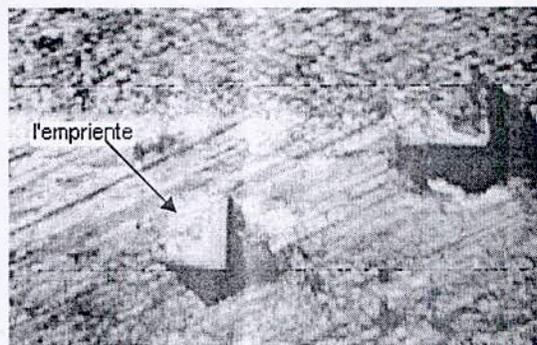
La surface du substrat révèle des micros fissures et des pores, dues à la déférence de la nature des métaux qui se trouvent dans le dépôt.

✚ *figure (IV.5)* : Le substrat, plaquette (carbure de tungstène) et la poudre de molybdène sont clairs et bien définis mais la couche d'accrochage n'est pas bien claire car elle est de même nature que la poudre du Mo.

L'échantillon possède des macro fissures et des pores dues généralement à la mauvaise préparation du substrat, ainsi qu'aux impuretés présentes lors du rechargement.

On constate que pour tout le système l'interface substrat/dépôt et la couche d'accrochage dans les trois procédés sont bien définis avec la présence de quelques porosités à ce niveau, tandis que l'interface substrat/dépôt et la couche d'accrochage n'est pas visible, ce la montre bien la bonne adhérence de la couche d'accrochage avec le dépôt du rechargement.

## II. Analyses de la Microdureté



**Fig.IV.5 : Observation des empreintes après l'essai de microdureté sur le multimatériau dépôt/couche d'accrochage/ substrat**

Les résultats de microdureté pour les différents systèmes sont donnés dans les tableaux suivants :

N° Série	Microdureté (HV)			
	Série 1	Série 2	Série 3	Moyenne
Dépôts	2943.49	2915.65	2971.72	2943.62
Voisinage de l'interface	372.90	372.90	366.66	370.82
Substrats	519.23	509.00	529.77	519.33

**Tableau IV.1: Valeurs de la Microdureté en fonction de la profondeur du la méthode Flamme-Fil**

	Microdureté (HV)			
N° Série	Série 1	Série 2	Série 3	Moyenne
Dépôts	2782.23	2731.41	2756.65	2757.43
Voisinage de l'interface	308.93	308.81	308.56	308.76
Substrats	499.06	489.42	501.03	496.50

**Tableau IV.2: Valeurs de la Microdureté en fonction de la profondeur du la méthode Flamme-Baguette**

	Microdureté (HV)			
N° Série	Série 1	Série 2	Série 3	Moyenne
Dépôts	2453.83	2453.83	2451.70	2453.12
Voisinage de l'interface	289.70	295.52	290.85	292.02
Substrats	509.00	501.03	501.03	503.68

**Tableau IV.3: Valeurs de la microdureté en fonction de la profondeur du la méthode Flamme-Poudre-Plaquette**

## II.1. Procédure Flamme-Fil

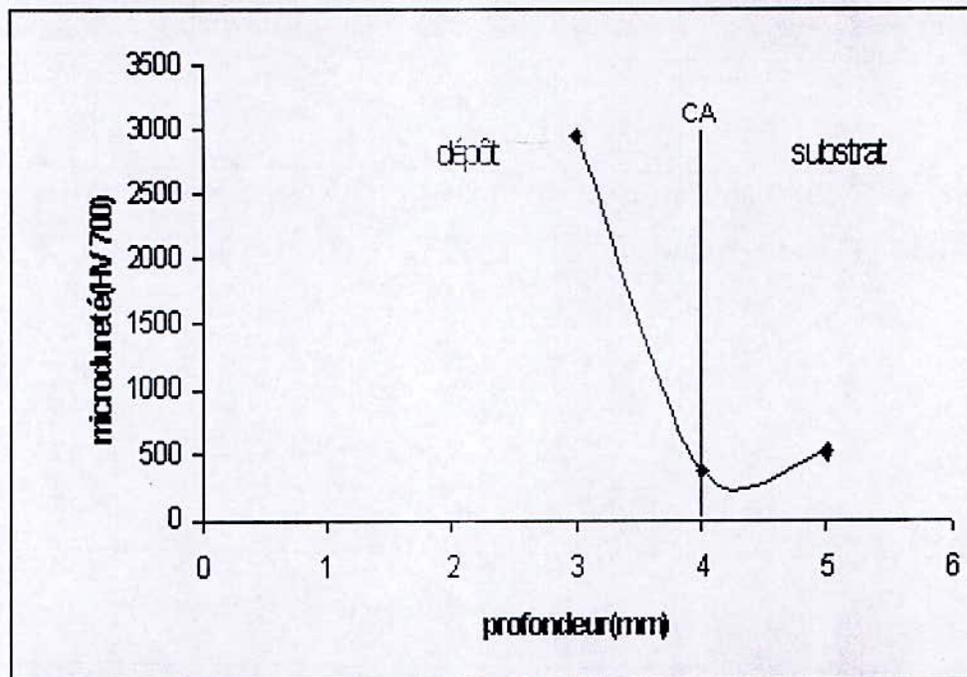


Fig. IV.6 : Evolution de la Microdureté en fonction de la profondeur

II.2.Procédure Flamme-Baguette

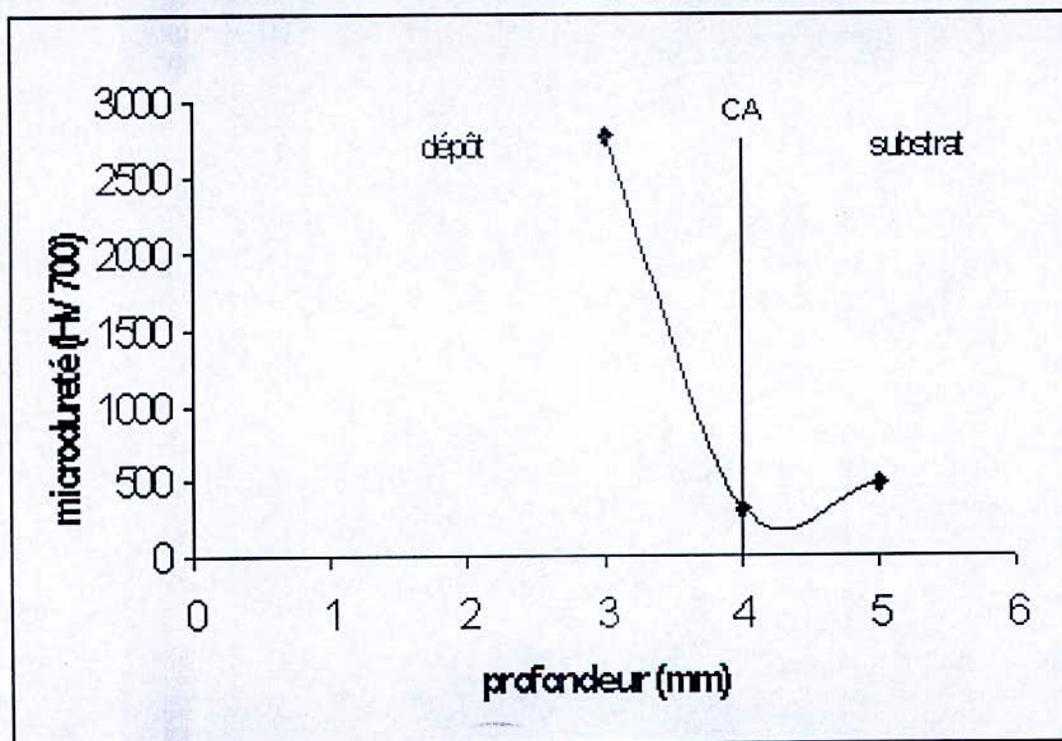


Fig. IV.7 : Evolution de la Microdureté en fonction de la profondeur

II.3 Procédure Flamme-Poudre-Plaquette

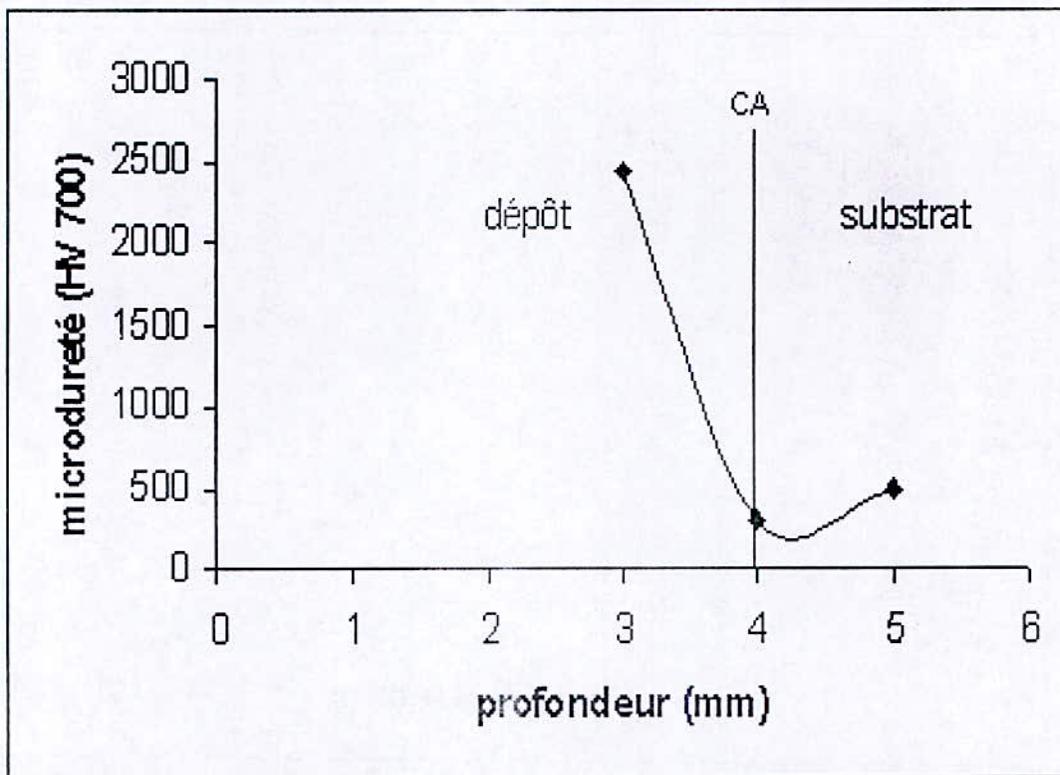


Fig. IV.8: Evolution de la Microdureté en fonction de la profondeur

**II.4 Interprétation**

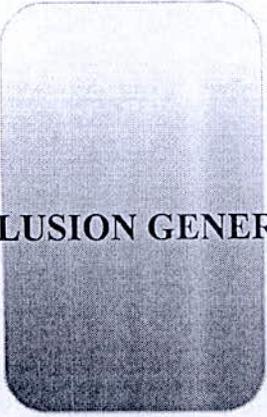
on constate que la dureté des dépôts est beaucoup plus importante que celle des substrats, de plus, en note que la dureté du premier dépôt est supérieure que celle des deux autres.

L'allure de tous les diagrammes est telle que pour chaque système, les duretés des dépôts sont supérieures à celle des substrats. Aussi, cette propriété est plus grande que celle obtenue au voisinage de l'interface.

On peut expliquer la chute de la dureté de l'interface par l'existence de défauts créés au moment du rechargement.

La dureté du substrat trempé est relativement élevée ceci est dû au phénomène de durcissement structural qui serait apparu dans l'acier faiblement allié.

# *Conclusion générale*



## CONCLUSION GENERALE

Notre étude comparative entre trois dépôts différents réalisés par rechargement par soudage à flamme, sur les aciers faiblement alliés, a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ✚ Le rôle très important de la couche accrochage qui donne une très bonne adhérence entre dépôt et substrat :
- ✚ L'amélioration de la dureté de la surface des pièces à recharger grâce aux dépôts dont la dureté est beaucoup plus supérieure que celle du substrat :
- ✚ L'influence de la densité en carbure tungstène sur le dépôt et les modifications de dureté qui en découle :

Finalement, pour un très bon rechargement, il faut que le dépôt soit très riche en carbure tungstène (la densité la plus élevée possible) et utilisé une couche d'accrochage après avoir bien préparé la surface du substrat.

# LISTE DES FIGURES

- Figure (I.1) :** Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre
- Figure (I.2) :** Schéma de principe d'une torche à plasma d'arc
- Figure (I.3) :** Schéma de principe d'un dispositif de projection à l'arc électrique
- Figure (I.4) :** Rechargement par soudage à flamme
- Figure (I.5) :** Exécution d'une soudure
- Figure (I.6) :** Flamme de chalumeau
- Figure (I.7) :** Parties constitutives d'un chalumeau
- Figure (I.8) :** Mécanismes d'écrasement des particules
- Figure (I.9) :** Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par Rechargement par soudage
- Figure (I.10) :** coupe d'un dépôt obtenu par rechargement par soudage
- Figure (II.1) :** Principaux mécanismes de la diffusion atomique
- Figure (II.2) :** Gradients de diffusion entre deux métaux totalement solubles à l'état solide
- Figure (II.3) :** Gradients de diffusion entre deux métaux A et B non totalement solubles et conduisant à la formation d'un composé défini  $A_x B_y$ .
- Figure (III.1) :** Forme des échantillons
- Figure (III.2) :** Forme et dimension de substrat
- Figure (III.3) :** Position du chalumeau et le fil d'apport
- Figure (III.4) :** position du chalumeau et la baguette
- Figure (III.5) :** longueur de dard au cour de rechargement
- Figure (III.6) :** Position du chalumeau
- Figure (III.7) :** Principe de l'essai Vickers
- Figure (III.8) :** Schéma représentant les différentes séries de mesure de microdureté
- Figure (IV.1) :** Micrographie Optique du substrat avec attaque chimique (G1500X)
- Figure (IV.2) :** Micrographie Optique du multimatériau dépôt/couche d'accrochage/ substrat (G48X) (Flamme-Fil)
- Figure (IV.3) :** Micrographie Optique du multimatériau dépôt/couche d'accrochage/ substrat (G75X) (Flamme-Baguette)

**Figure (IV.4) :** Micrographie Optique du multimatériau dépôt/couche d'accrochage/ substrat (G48X) (Flamme-Poudre-Plaquette)

**Figure (IV.5) :** Observation des empreintes après l'essai de microdureté sur le multimatériau dépôt/couche d'accrochage/ substrat

**Figure (IV.6) :** Evolution de la Microdureté en fonction de la profondeur

**Figure (IV.7) :** Evolution de la Microdureté en fonction de la profondeur

**Figure (IV.8) :** Evolution de la Microdureté en fonction de la profondeur

# LISTE DES TABLEAUX

**Tableau (III.1) :** pourcentage (% massique) de carbure de tungstène dans le dépôt

**Tableau (III.2) :** composition chimique du substrat

**Tableau (III.3) :** composition chimique du plaquette

**Tableau (IV.1) :** Valeurs de la microdureté en fonction de la profondeur du la méthode  
Flamme-fil

**Tableau (IV.2) :** Valeurs de la microdureté en fonction de la profondeur du la méthode  
Flamme-baguette

**Tableau (IV.3) :** Valeurs de la microdureté en fonction de la profondeur du la méthode  
Flamme-poudre-plaquette

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : **J.BARRALIS**

« Précis de métallurgie » 6<sup>ème</sup> édition, NATHAN, 2002, pp 169-172.

[2] : **D.TREHEUX-A.B. VANNES**

« Traitement de surface et revêtement » Ecole Centrale de Lyon, 1996, pp 31-38.

[3] : **Mme S.MATIEU (Sollac)**

« Traitement de surface de revêtement » la revue de métallurgie CIT, janvier 1989, pp 22-24.

[4] : **L.LACONCELLE**

« Information à l'usage du concepteur » Mai 1996. PP 76-79.

[5] : **LETM**

« Guide de la projection thermique » 1989, pp 56-59.

[6] : **A.PRONERR**

« Revêtement par projection thermique » Technique de l'ingénieur, M1645, Avril 2002, pp 1-20.

[7] : **S. NOUROUZI**

« Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive » Thèse de doctorat d'état, UNIVERSITE DE LIMOGES, 2004. pp 21-28.

[8] : **M. Mellali**

« Influence de la rugosité et de la température de surface du substrat sur l'adhérence et les contraintes résiduelles au sein de dépôts d'alumine projetés par plasma » thèse de l'Université de limoges, 1994, pp 41-48.

[9] : **Lucien VIGNARDET**

« Soudage à flamme » Technique de l'ingénieur, B7710, Avril 2002, pp 2-6.

[10] : **JAMES A. PENDER**

« Le soudage » Mc GRAW- HILL, EDITEURS, 1999, pp 3-9, 97-129.

[11] : **R. VARISELLAZ**

« Elément de conception et de réalisation » dunod, Mai 1982, pp 3-11, 29-35, 46-48.

**[12] : Guy MURRY**

« Soudage et soudabilité métallurgique des métaux » Technique de l'ingénieur B715,  
Avril 2002, pp 6-15.

**[13] : PIERRE GUIRALDENQ**

« Diffusion dans les matériaux » Ecole Centrale de Lyon, 1991, pp 5-8.

**[14] : J. BENARD**

« Métallurgie générale » Masson et c<sup>ie</sup> Editeur, 1969, pp 96-113.

## ملخص

هذه الدراسة تتمثل في إعداد متعددة المواد بواسطة تقنيات التلحيم بالشعلة الحرارية. نحيط علما أن ثلاثة طرق مختلفة التلحيم قد استعملت: شعلة-خيوط, شعلة-قضيب, شعلة-مسحوق-مسطح. لإعداد هذا المتعددة المواد استعملنا فولاذ قليل الترابط و موضع غني بكار بور التنغستان. بالإضافة إلى طبقة الالتصاق المتكونة من الموليدان, لهذا اهتمامنا خاصة بدراسة سلوك الصلابة لكل طبقة من متعددة المواد (موضع, طبقة الالتصاق, الطبقة الأساسية) بواسطة تقنيات التحليل فيزيو-كيميائية و الميكانيكية استطعنا أن نتابع تغيرات البنية المهجرية و صلابة الطبقات المختلفة بدلالة المواضع الثلاث المختلفة. كلمات مفتاحيه: متعددة المواد, التلحيم بالشعلة الحرارية, موضع, الطبقة الأساسية, طبقة الالتصاق

## Résumé

Cette étude consiste à élaborer un multimatériau par la technique du rechargement par soudage à flamme. Notons que trois procédures différentes de rechargement ont été réalisées, flamme-fil, flamme baguette, flamme-poudre-plaquette.

Ce multimatériau a été réalisé à partir d'un acier faiblement allié (42CD4) et d'un dépôt enrichi en carbure de Tungstène, en plus d'une couche d'accrochage composée essentiellement de Molybdène.

Ainsi, nous nous sommes intéressés, en particulier au comportement de la dureté pour chaque couche du multimatériau à recharger (dépôt, couche d'accrochage, substrat).

A l'aide des techniques d'analyses physico-chimiques et mécaniques, nous avons pu suivre la variation de la microstructure et la dureté des couches en fonction des trois dépôts différents.

**Mot clé :** multimatériau, rechargement par soudage à flamme, dépôt, substrat, couche d'accrochage.

## Abstract

This study consists of elaborating a multimaterial by the technique of flame welding reloading (or reloading by flame welding). Let us note that three procedures different of reloading were carried out, flame-file, flame rod, flame-powder-plate.

This multimaterial has been carried out realized starting from a Low Alloy Steels (42CD4) and from a deposit enriched with tungsten carbides, in addition to a coat tack made up primarily of Molybdenum.

Thus, we were interested, in particular, to the behavior of hardness of each layer of the multimaterial to reload (deposit, coat tack, substrate).

Using physicochemical and mechanical analyses techniques, we could follow the variation of the microstructure and the hardness of the layers according to the three different deposits.

**Key words:** multimaterial, recharging by flame welding, deposit, substrate, coat tack.