

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

1/97

وزارة الجامعات و البحث العلمي

Ministère des Universités et de la Recherche scientifique.

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

METALLURGIE

المركز الوطني للتكنولوجيا  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

REALISATION ET CARACTERISATION  
DE REVETEMENT AU MOLYBDENE  
SUR UN ACIER DE CONSTRUCTION

Proposé par :

Mr M. LARIBI

Etudié par :

Mlle Z. MERZOUGUI

Dirigé par :

Mr M. LARIBI

PROMOTION

Juillet 1997

E. N. P 10, Avenue Hassen Badi - EL-HARRACH - ALGER

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة الجامعات و البحث العلمي

Ministère des Universités et de la Recherche scientifique.

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT METALLURGIE

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

**REALISATION ET CARACTERISATION  
DE REVETEMENT AU MOLYBDENE  
SUR UN ACIER DE CONSTRUCTION**

Proposé par :  
Mr M. LARIBI

Etudié par :  
Mlle Z. MERZOUGUI

Dirigé par :  
Mr M. LARIBI

PROMOTION

**Juillet 1997**

E. N. P 10, Avenue Hassen Badi - EL-HARRACH - ALGER

# Dédicaces

A

Mon Père

Ma Mère

Mes Frères

Ma Soeur

Ma Grand-mère

Toute ma famille

Fadia, Lynda & Sana

Zahir, Krimo, Mabrouk, Mehdi

Tous mes Ami(e)s

Je dédie ce modeste Travail...

# SOMMAIRE

|  |    |
|--|----|
| Introduction générale  | 1  |
| Partie bibliographiquethéorique  | 3  |
| Chapitre I. – Projection thermique   | 4  |
| I.1. Projection thermique  | 5  |
| I.2. Définition d'un poste de projection thermique et<br>matériels de projection | 5  |
| I.3. Matériaux utilisés et caractéristiques des<br>matériaux projetés            | 13 |
| I.4. Mise en œuvre de la projection thermique                                    | 19 |
| I.5. Contrôle des dépôts obtenus par projection<br>thermique                     | 24 |
| I.6. Domaines d'emploi des dépôts obtenus par<br>projection thermique            | 27 |
| I.7. Automatisation de la projection thermique                                   | 28 |
| <br>   |    |
| Chapitre II. – Le molybdène  | 29 |
| II.1. – Généralités  | 30 |
| II.2. – Propriétés physiques   | 31 |
| II.3. – Propriétés mécaniques  | 32 |
| II.4. – Propriétés métallurgiques  | 33 |
| II.5. – Principaux débouchés   | 33 |
| II.6. – Le molybdène et le revêtement par projection<br>thermique                | 34 |
| <br>   |    |
| Partie expérimentale   | 36 |
| <br>   |    |
| Chapitre III. – Elaboration du multimatériau                                     | 37 |
| III.1. – Critères de choix des matériaux   | 38 |
| III.2. – Post-traitement   | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Chapitre IV. – Caractérisation, résultats et interprétation | 48 |
| IV.1. – Introduction  | 49 |
| IV.2. – Analyses métallographiques                          | 49 |
| IV.3. – Essais de microdureté                               | 54 |
| IV.4. – Tests d'arrachements                                | 58 |
| IV.5. – Interprétation générale                             | 62 |
| <br>  |    |
| CONCLUSION GENERALE   | 63 |

## **Introduction Générale**

Dans le vaste domaine de la science des matériaux, l'étude des métaux et alliages métalliques occupe une place prépondérante et privilégiée. D'origine relativement ancienne, la métallurgie n'a cessé d'affermir ses connaissances de base à la lumière des théories physiques les plus récentes.

Science appliquée par excellence, elle a su intégrer les possibilités des technologies de pointe afin d'élaborer des matériaux sans cesse plus performants et adaptés à des domaines d'emploi de plus en plus spécifiques [1].

Le choix d'une nuance d'acier, en construction mécanique, procède presque toujours de l'adoption d'un compromis entre des exigences souvent contradictoire, d'ordre technique ou économique. Les traitements thermiques permettent de faire varier les caractéristiques dans de très larges domaines [1].

Les multimatériaux, ou produits formés par l'association de matériaux différents, constituent une troisième voie d'évolution des aciers spéciaux au même titre d'ailleurs que tous les métaux [5].

Ils permettent en effet, deux types d'améliorations : le premier est d'ordre technique, permettant d'associer deux ou plusieurs éléments conduisant à un produit nouveau réunissant les propriétés et avantages de chacun ; le deuxième type d'amélioration est d'ordre économique permettant de limiter l'utilisation du produit performant et coûteux uniquement là où il est indispensable.

A la lumière des idées contenues dans cette introduction, puisées dans les documents de métallurgie de référence, notre travail consiste à élaborer un matériau « idéal » réunissant à la fois les propriétés connues d'un acier 35CD4 et celles très recherchées du molybdène en surface, afin de profiter des unes et des autres pour des applications industrielles bien définies.

On mettra en évidence l'influence d'une sous-couche d'accrochage du type Nickel-Aluminium permettant de rapprocher les propriétés de l'un et de l'autre matériaux utilisés.

On étudiera l'effet d'un post-traitement thermique à 500°C sous argon, sur l'amélioration des propriétés intercalaires en matière de structure, adhérence et propriété plastique en faisant varier le temps de maintien.

Pour ce faire, notre travail est constitué de deux parties :

Une partie théorique qui consiste en une étude bibliographique composée de deux chapitres ; dans le premier, on passera en revue les notions de projection thermique, dans le second, les propriétés du molybdène et son application en projection thermique.

Une partie expérimentale subdivisée également en deux chapitres ; dans le premier, nous exposerons l'élaboration de notre multimatériau et, dans le second, une caractérisation sera faite pour laquelle seront regroupés et interprétés les résultats.

Notre étude sera clôturée par une conclusion générale.

**PARTIE**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

**CHAPITRE I**

**PROJECTION THERMIQUE**

*Le revêtement par projection thermique est une technique consistant à projeter en fines particules, sur une surface préalablement préparée, un produit d'apport solide, fondu ou ramolli au moyen d'une source de chaleur et projeté sur la pièce par l'intermédiaire d'un matériel utilisant l'énergie de combustion d'un mélange oxy-gaz, d'un arc électrique ou d'un jet de plasma.*

### **I.1. - Projection thermique**

La technique de revêtement métallique, par projection thermique, fut réalisée par le Docteur SCHOOP, ingénieur Suisse, en 1909, en examinant les traces laissées sur un mur par des balles de plomb d'une carabine.

Grâce à son bas point de fusion (327°C), le plomb pouvait fondre localement lors de l'impact, d'où l'idée de projeter des métaux liquides.

Le premier appareil à métalliser fut, en effet, basé sur ce principe.

Depuis les années 80, les problèmes d'économie de matière et d'énergie, qui se sont posés un peu partout dans le monde, ont donné aux revêtements une place prépondérante et les progrès enregistrés depuis, dans les appareils et matériaux utilisés, sont très importants.

De nouveaux appareils ont été lancés sur le marché de la projection thermique.

En 1983, de nombreux Laboratoires dans le monde, en particulier au Japon, ont étudié la possibilité d'intégrer, dans les techniques de projection thermique, les lasers de puissance (CO<sub>2</sub>)[2].

### **I.2. - Définition d'un poste de projection thermique et matériels de projection.**

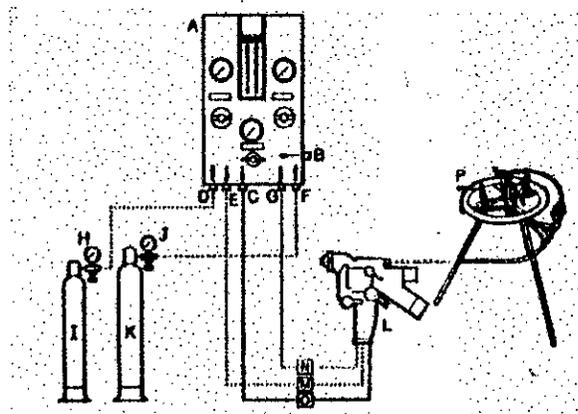
Les procédés de projection thermique commercialisés peuvent être divisés en deux catégories suivant la source d'énergie utilisée : flamme ou arc électrique.

### I.2.1. - Projection flamme [2] [5]

La projection thermique utilisant l'énergie thermique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de projection flamme.

Les matériaux qui ne subliment pas et qui fondent à des températures de 2800°C peuvent être projetés à la flamme. Les matériaux utilisés sont des métaux et des alliages métalliques qui se présentent sous la forme de fils, de cordons, de baguettes ou de poudres.

#### I.2.1.1 - Matériels flamme pour fils, cordons ou baguettes



- A tableau de réglage
- B arrivée d'air
- C sortie d'air
- D arrivée d'oxygène
- E sortie oxygène
- F arrivée gaz combustible
- G sortie gaz combustible
- H mano-détendeur oxygène première détente
- I alimentation oxygène
- J mano-détendeur gaz combustible première détente
- K alimentation gaz combustible
- L pistolet métalliseur
- M raccord rapide d'oxygène au pistolet
- N raccord rapide de gaz combustible au pistolet
- O raccord rapide d'air au pistolet
- P dévideur redresseur de fil

**FIGURE 1 – Installation pour projection flamme**

Ce matériel peut être utilisé pour traiter des pièces exposées à diverses agressions (anticorrosion), ainsi que dans un atelier pour la réalisation de rechargement (réparation ou pièces neuves).

Ce matériel peut être soit manuel, soit automatisé, ou même, très élaboré.

Une telle installation nécessite certains fluides avec des débits respectifs de :

- Gaz combustibles (Acétylène, Propane, Hydrogène, Gaz Naturel)

Débit : 500 et 1.500 l/h

Pour (0,5 ÷ 1,2) bar --- Acétylène

(0,5 ÷ 3) bar --- Propane

- Gaz comburant : oxygène

Débit : (1.500 ÷ 3.800) l/h

Pour : (1,2 ÷ 3,6) bar.

- Air comprimé : doit être filtré pour éviter la présence d'eau, d'huile et de saletés

Il est fourni une pression  $P = (3,8 \div 5)$  bars pour des débits de  $(15 \div 35)$  l/h.

Dans certains cas, l'air comprimé est remplacé par un gaz neutre (Ar, N<sub>2</sub>).

Les pistolets utilisés dans cette installation se composent de deux parties : une partie gaz et une partie entraînement de fil (Figure 2).

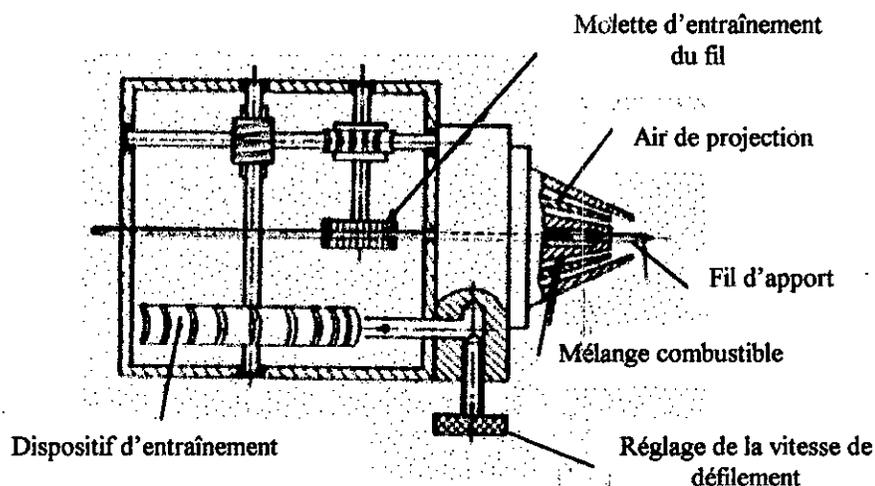


Figure 2 – schéma simplifié d'un pistolet à fil à entraînement par turbine à air

- Partie gaz : constituée d'un mélangeur, d'une buse à gaz annulaire et d'une buse à air. Le matériau à projeter passe à travers ces trois pièces.

Après avoir été fondu par les flammes sortant des trous de la buse à gaz, le matériau est pris en charge par l'air comprimé qui le propulse sur le substrat en le dispersant en fines particules.

- Partie entraînement du fil [2]

Le matériau est entraîné dans le chalumeau par deux molettes exerçant une pression suffisante pour le pousser. Ces molettes sont mises en rotation par un ensemble mécanique simple entraîné par des turbines, des moteurs à air ou électriques.

### 1.2.1.2 - Matériels flamme – poudre

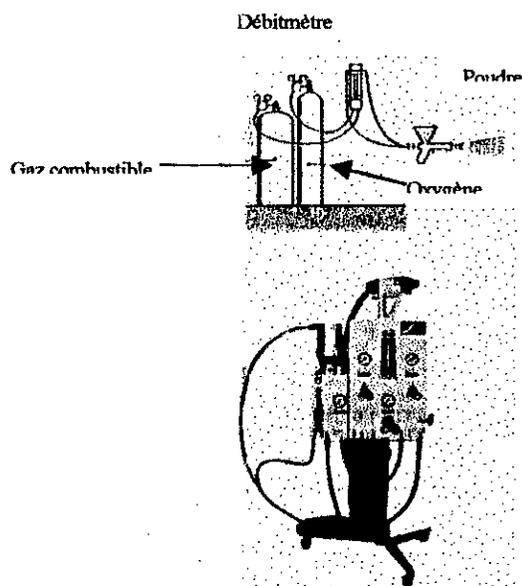
On trouve trois types de matériel :

- torche à gaz
- pistolet à poudre subsonique
- pistolet à poudre hypersonique.

Les installations pour ce matériel sont peu différentes de celles décrites précédemment.

Elles sont simples mais peuvent nécessiter un automatisme poussé (applications aéronautiques, d'abradables).

#### 1.2.1.2.1 - Torche à gaz (Figure. 3)



**Figure 3. Installation d'un pistolet oxygène - gaz à poudre.**

C'est le chalumeau oxy-acétylénique. C'est un appareil équipé d'un récipient contenant la poudre à projeter.

La poudre tombe par gravité, est amenée jusqu'à la flamme et est projetée à faible vitesse car l'air comprimé n'est pas utilisé.

La poudre arrive ainsi sur le substrat chaud mais non fondu et une liaison du type brasure est assurée entre le métal d'apport et le métal de base.

Pour arriver à ces résultats, les matériaux d'apport sont uniquement des alliages dits auto-fusibles à base de nickel, cobalt et éléments d'addition tels que chrome, tungstène, silicium, etc...

Il est également possible d'introduire des carbures de Tungstène pour répondre à des applications exigeant un matériau résistant à l'usure.

#### 1.2.1.2.2 - Pistolets à poudre subsonique [2] [5]

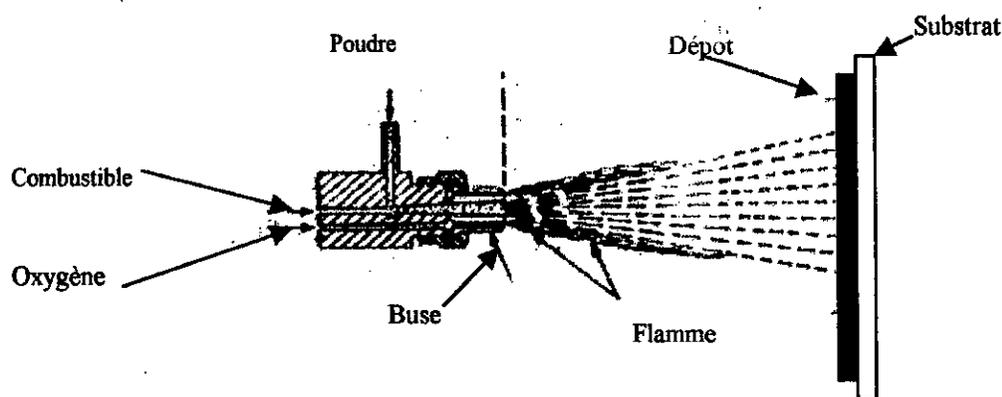


Figure 4 . Schéma d'un pistolet à poudre subsonique

Les pistolets utilisent un mélange oxy-acétylénique.

Les pistolets flamme poudre commercialisés sont légers et compacts.

La poudre est stockée dans un réservoir et est entraînée jusque dans la flamme par sa mise en suspension dans l'un des gaz.

Dépôts obtenus :

- adhérence moyenne
- porosité élevée
- faible cohésion des particules entre elles.

Vitesse des particules : 30 m/s.

Ce matériel est très apprécié pour ses faibles nuisances. On le trouve dans les industries pour résoudre des problèmes de réparation et, quelquefois, traiter des pièces neuves, sollicitées en abrasion, corrosion, usure, isolation thermique ou électrique.

### 1.2.1.2.3. - Pistolets à poudre hypersonique

Ce matériel est divisé en deux catégories :

- pistolet à tir discontinu
- pistolet à tir continu.

#### a) - Pistolet à tir discontinu ou canons à détonation

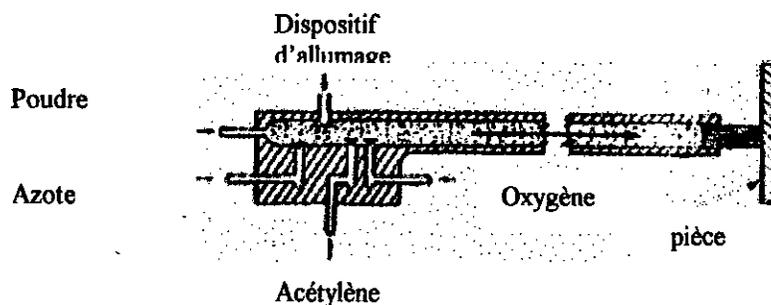


Figure 5. Schéma d'un pistolet canon à détonation

Ce principe a été mis au point par Faillé et Barber et exploité jusqu'en 1980.

La poudre est introduite dans une chambre avec les gaz (oxygène, acétylène)

Le mélange explose au moyen d'une étincelle. La poudre est éjectée à grande vitesse dans un tube de 25 mm de diamètre et 1m de long. L'onde de choc produite accélère et chauffe les particules qui sont éjectées à l'extérieur du tube. La vitesse des particules est d'environ 800 m/s.

Les tirs sont effectués automatiquement.

Les revêtements obtenus sont denses, durs et très adhérents.

Les matériaux les plus souvent projetés avec ce canon à détonation sont des carbures de tungstène incorporés à un liant métallique ( 80 Ni - 20 Cr ou Co).

b) - Pistolet à tir continu [A] [G]

- A- Oxygène et gaz combustible
- B- Chambre de combustion
- C- Buse d'alimentation en gaz
- D- Poudre
- E- Injecteur de poudre
- F- Buse
- G- Flamme
- H- Circuit de refroidissement

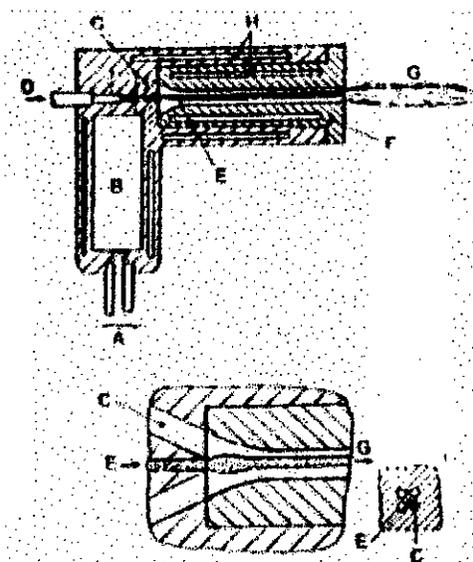


Figure 6. Schéma d'un pistolet à tir continu

Ce procédé a été mis au point par une société américaine, le principe de base est l'utilisation d'un jet à combustion interne. La poudre introduite dans le gaz d'échappement est concentrée pour être conduite à l'intérieur de la buse.

Gaz de combustion : mélange d'hydrocarbure (méthylène - acétylène - propane)

La vitesse des particules atteint plusieurs fois la vitesse du son et, comme le canon utilise l'énergie d'ondes de choc, les dépôts exécutés avec ce pistolet sont très adhérents et très denses.

**I.2.2. - Arc électrique [2]**

C'est une source d'énergie qui permet l'augmentation de la projection thermique. Il y a deux sortes de matériel pour la projection à l'arc électrique.

**I.2.2.1. - Pistolet à arc électrique entre 2 fils**

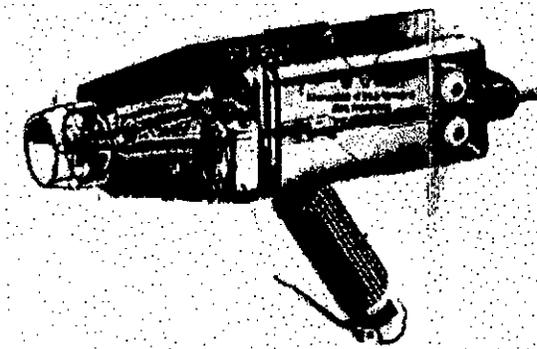


Figure 7. Schéma d'un pistolet à arc électrique entre deux fils

C'est un procédé qui consiste à faire jaillir, entre deux fils consommables, un arc électrique. Le métal fondu dans l'arc est projeté par un jet d'air comprimé.

**I.2.2.2 - Pistolet plasma**

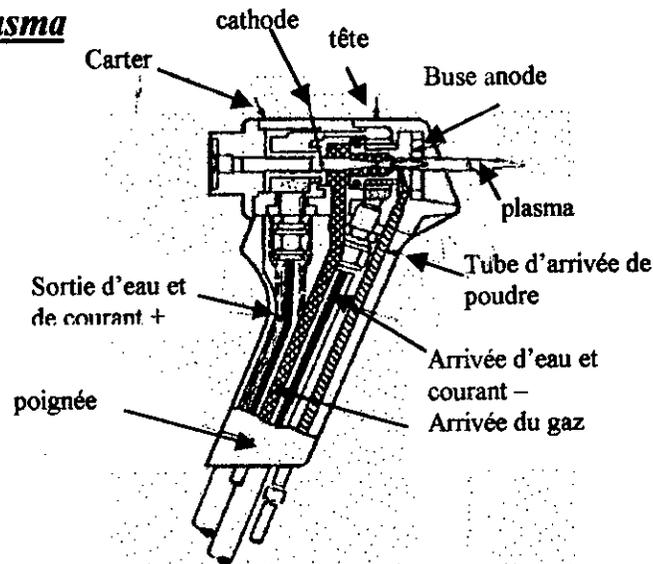


Figure 8. Schéma d'un pistolet plasma

Le plasma est un gaz ionisé à haute température.

Le pistolet à plasma est un appareil dans lequel on injecte un gaz inerte (Ar) à travers un arc électrique étranglé par des parois froides. Il comporte une anode en cuivre et une cathode en tungstène, généralement.

Pour effectuer la projection, le matériau, sous forme de poudre, est injecté dans la colonne plasma où il atteint une vitesse importante afin d'y être fondu.

La projection est généralement réalisée dans l'air, mais peut être faite, soit en basse pression, soit en atmosphère et température contrôlées.

Ces pistolets plasma permettent de projeter pratiquement tous les matériaux, même ceux qui sont très réfractaires ou très oxydables.

Seuls les matériaux qui ont une température de fusion trop proche de la température d'ébullition sont difficiles à projeter, ainsi que ceux qui se décomposent à haute température.

### **I.3 Matériaux utilisés et caractéristiques des matériaux projetés** [2]

[5] [16]

#### **I.3.1. - Matériaux utilisés**

Le nombre de matériaux utilisés augmente en fonction d'applications nouvelles.

Nous classons ces matériaux comme suit (AFNOR A 81 - 381) :

- Aciers alliés et non alliés
- Alliages base cobalt
- Aciers base Nickel
- Aciers base Cuivre
- Alliages de Zinc
- Métaux purs
- Carbures
- Oxydes

- Auto - adhérents (alliages basse Ni - Al)
- Nitrures
- Siliciures
- Matériaux abrasifs (type Ni - graphite)
- Matériaux antifriction
- Alliages MCrAlY (M : Ni, Co, Fe ou combinaison de 2 ou 3 d'entre eux - Cr = Chrome - Al = Aluminium - Y = Yttrium)
- Matières plastiques.

Ces matériaux peuvent se présenter sous forme de :

- \* fils nus massifs : réservés aux matériels flamme et arc, diffusés dans les catégories métaux purs et aciers, définis par leur diamètre et composition ;
- \* fils fourrés : peu employés, réservés aux matériaux auto-adhérents, définis par leur diamètre et composition
- \* poudres :

Elles sont définies par leurs :

- \* composition
- \* dimension des particules et leur répartition granulométrique
- \* forme des particules
- \* type d'élaboration
- \* coulabilité
- \* densité.

Les poudres sont employées pour les techniques flamme et plasma.

- cordons : permettent de conditionner des matériaux non tréfilables et d'obtenir un produit continu qui peut alimenter des pistolets à fils. Ils sont composés du matériau à projeter et d'un liant organique. Ils sont définis par leurs composition et diamètre ;
- baguettes : permettent de conditionner des matériaux non tréfilables pour alimenter des pistolets à fils de façon discontinu

### I.3.2. - Caractéristiques des matériaux projetés [9] [5] [10]

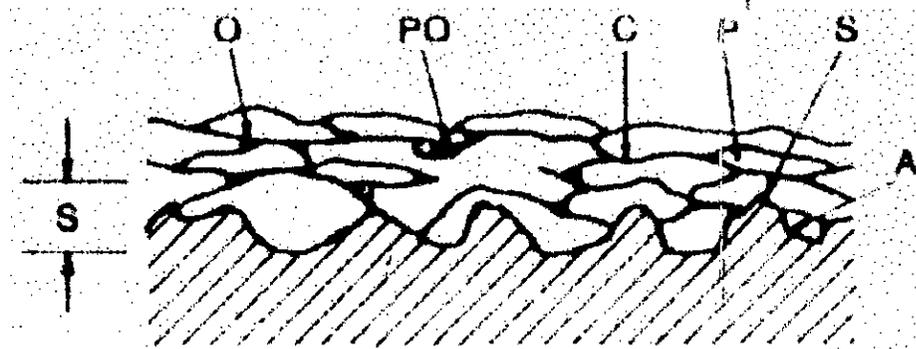
Les revêtements sont caractérisés par certains facteurs, parmi lesquels nous citerons :

- Structure
- Adhérence
- Densité (porosité)
- Dureté.

Pour certaines applications, il est intéressant de connaître des facteurs tels que :

- résistance à l'usure
- coefficient de frottement
- caractéristiques électriques
- caractéristiques thermiques.

#### I.3.2.1. - Formation et structure d'un revêtement



A - Adhésion au substrat.

P - Particules

C - Cohésion entre particules.

PO - Porosité

O - Inclusions d'oxydes.

S - Substrat rugueux

 Substrat.

Figure 9. Coupe d'un dépôt obtenu par projection thermique.

[9]

Les particules projetées viennent s'écraser sur le substrat pour réaliser une superposition de couches. Le tout donne l'allure d'un dépôt obtenu par projection thermique.

On peut évaluer le diamètre  $D$  de la surface occupée par les particules, par rapport au diamètre initial  $d$  de la particule à l'aide de la relation simplifiée de Madesjski [3] [5] :

$$D/d = 1,29 \cdot v \cdot d \cdot \rho \cdot 0,2 / \mu$$

$\rho$  : densité du liquide

$\mu$  : viscosité du liquide

$v$  : vitesse d'impact de la particule.

Pour réaliser la fusion des particules dans le jet de gaz chaud, il faut prendre en compte des variables telles que le coefficient de transfert thermique, la conductivité thermique, la température de fusion, d'où la relation suivante [4] [5] :

$$\frac{S (K \Delta T)^2}{V \mu} > \frac{L^2 D^2}{16\rho}$$

↑ jet                      ↑ particule

$S$  : distance de projection

$K$  : conductivité thermique de la couche

$V$  : vitesse du jet du gaz

$\Delta T$  : gradient de température de la couche

$L$  : capacité thermique de la particule par unité de volume à la température de fusion

$D$  : diamètre moyen de la particule

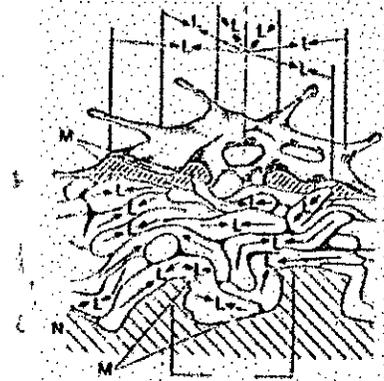
$\rho$  : densité de la particule.

Par ces essais de modélisation, nous constatons que suivant les paramètres de projection et la nature du matériau, les caractéristiques des dépôts peuvent changer.

Un test simple permet de vérifier la bonne fusion de la particule : il s'agit de passer rapidement une lame de verre devant le jet et ensuite d'examiner la façon dont la particule s'est écrasée (Figure. 10).



- A- coupe de la couche d'oxyde d'une gouttelette métallique.
- B- Intérieur d'une gouttelette métallique.
- C- Impact de la gouttelette métallique, éclatement partiel.
- D- Eclatement de la couche d'oxyde lors de l'impact entre deux particules superposées.
- E- Accrochage des particules entre elles.
- F- Soudage partiel des particules.
- G- Particules métalliques non fondues avant l'impact.
- H- Microcavité due à un remplissage partiel.
- I- Micropore dû à des gaz enfermés.
- J- Surface du matériau de base rugosifiée.
- K- Matériau de base



- L - Contrainte de retrait.
- M - Liaison partiellement incrustée entre la couche projetée et le matériau de base avec liaison des particules métalliques entre elles.
- N - Matériau de base n'ayant pas subi de contrainte car non soumis à une température élevée.

Figure 10. Aspect d'une gouttelette lors de l'impact.

### 1.3.2.2. - Struc. géométrique des dépôts

Les dépôts sont généralement stratifiés ; s'ils ne sont pas traités à posteriori suivant la technique employée, ils changent de structure et de composition..

### **I.3.2.3. - Adhérence**

Les dépôts projetés adhèrent aux substrats par un phénomène mécanique qui demande une préparation soignée de la surface à revêtir. La particule en fusion épouse plus ou moins bien les rugosités du substrat.

Pour les matériaux comme les oxydes métalliques, dont l'adhérence est faible et, dans le cas où les coefficients de dilatation sont très différents entre le matériau projeté et le substrat, on utilise des sous-couches d'accrochage connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence, telles que l'aluminiure de Ni, le Mo ou l'alliage 80 Ni - 20 Cr.

### **I.3.2.4. - Densité**

Les dépôts projetés à chaud dans l'air et non traités à posteriori sont poreux. Cette porosité varie suivant le mode de projection.

La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Pour les dépôts métalliques, la densité est aussi fonction du taux d'oxydes formés pendant la projection.

### **I.3.2.5. - Dureté**

Les valeurs de dureté des dépôts projetés à chaud sont déterminées habituellement par macro-dureté. Les valeurs sont, en général, données en HRC.

## **I.4. - Mise en œuvre de la projection thermique**

### **I.4.1. - Préparation des substrats**

La préparation de surface est un facteur primordial et indispensable à une bonne adhérence des dépôts.

### **I.4.2. - Nettoyage et manipulation**

Les pièces destinées à être revêtues doivent être propres, sans contamination de graisses, huiles et peintures. Si les pièces sont poreuses, il est nécessaire de diluer les matières contaminantes présentes dans des porosités avec des diluants appropriés, pour éviter que l'échauffement du substrat, dû à la projection, ne fasse remonter les matières contaminantes à la surface et nuisent à l'adhérence du dépôt. Les pièces ainsi traitées doivent être rincées et séchées.

### **I.4.3. - Rugosification.**

Après avoir nettoyé les pièces, il faut créer une rugosité en surface, afin de permettre aux particules en fusion de bien épouser les irrégularités de la surface pour avoir un bon accrochage mécanique.

### **I.4.4. - Matériels utilisés**

Deux types de matériels sont utilisés :

- matériel de décapage au jet d'abrasif par air comprimé,
- matériel de décapage au jet d'abrasif propulsé par turbine.

Le matériel est choisi en fonction des revêtements à réaliser.

#### **I.4.5. - Sous-couches d'accrochage** [2] [5] [16]

Pour améliorer l'adhérence et la tenue de certaines couches d'oxydes de carbures, ou réaliser des rechargements épais, il est préconisé l'emploi de certains matériaux qui sont déposés entre le substrat et la couche principale.

Ces matériaux, appelés sous-couches, sont projetés en fines épaisseurs de l'ordre de 0,05 et 0,2 mm suivant l'utilisation. Les sous-couches les plus utilisées sont : Molybdène, Nickel - Aluminium (80 - 20), Nickel-Aluminium (95-5), Nickel-Chrome (80-20).

#### **I.4.6. - Dépôt au matériel flamme (fils et poudre)** [2] [5] [16]

La préparation de surface employée est un décapage au jet abrasif suivi, dans un temps très court, par le dépôt d'une sous-couche et de la couche principale.

#### **I.4.7. - Dépôt au matériel à arc électrique**

Pour les matériels à arc électrique entre deux fils et plasma, le procédé de préparation est le même que pour le matériel à flamme.

#### **I.4.8.- Choix des matériaux** [2] [5]

Le choix des matériaux à appliquer sur les pièces à revêtir est primordial ; il est fonction des sollicitations auxquelles sont soumises les pièces à traiter. Il n'est pas possible d'établir une règle générale pour déterminer le matériau le mieux adapté mais, en fonction du milieu dans lequel doit travailler la pièce, nous pouvons faire un choix en fonction de leurs qualités, vis-à-vis d'agressions physiques ou chimiques.

Les tableaux 1, 2 et 3 sont des exemples permettant de choisir un matériau en fonction du problème à résoudre.

| Matériaux             | Code            | Système de projection                           | Applications   |
|-----------------------|-----------------|---|--|
| Alliage Ni - Cr 80-20 | 7/510           | Flamme poudre<br>Flamme fil<br>Plasma poudre    | Sous - couche réservée aux pièces soumis à des températures supérieures à 1260° C.   |
| Aluminiure de nickel  | 18/111<br>10/21 | Flamme poudre<br>Flamme cordon<br>Plasma poudre | Sous - couche la plus efficace, tenue en température jusqu'à 1010° C.  |
| Molybdène             | 10/21           | Flamme fil<br>Plasma poudre                     | Bonne adhérence - coefficient de dilatation faible, tenue en température jusqu'à 315° C                                    |
| MCLARY                | 19/220-320      | Plasma poudre                                   | Sous - couche efficace pour des tenues en température jusqu'à 1200° C<br>Bonne tenue à la corrosion des moteurs thermiques |

**TABLEAU 1. Sous - couches d'accrochage**

| Matériaux           | Code  | Système de projection       | Applications   |
|---------------------|-------|-----------------------------|--|
| Molybdène           | 10/21 | Flamme fil                  | Pièces de boîte de vitesses, fourchettes, bagues de synchronisation.<br>Segments de pistons de moteurs thermiques. |
| Bronze              | 8/310 | Flamme poudre<br>Flamme fil | Pièces de boîte de vitesses, (bagues)<br>Coussinets - portées d'arbres   |
| Fluorure de calcium |       | Plasma poudre               | Pièces qui travaillent à haute température.  |

**TABLEAU 2. Amélioration du coefficient de frottement.**

| Matériaux         | Code                                     | Système de projection          | Applications et commentaires  |
|-------------------|--|--------------------------------|---|
| Antifriction      | 18/110-120<br>210/310-510                | Flamme fil                     | Coussinets divers comme ceux de gros moteurs Diesel marins et terrestres  |
| Abradables        | 17/11-12-21                              | Flamme poudre<br>Plasma poudre | Produits permettant de contrôler l'usure de pièces fixes par rapport à des pièces en mouvement.<br>Exemple : stator de turbines à gaz aéronautiques, léchettes de labyrinthes d'huile.  |
| Auto - adhérents  | 13/21                                    | Flamme poudre<br>Plasma poudre | Plusieurs matériaux de ce type utilisés surtout au pistolet flamme poudre pour des réparations de portées de roulements, d'arbres divers.<br>Ces matériaux rassemblent les qualités d'une bonne sous-couche et des qualités particulières suivant l'additif du composant Al et Ni (ex. : Cr-Mo) |
| Aciers non alliés | 1/120                                    | Flamme fil                     | Revêtement de portées de vilebrequins   |
| Aciers alliés     | 3/320<br>3/230-235<br>310-320<br>410-420 | Flamme fil                     | Revêtement de pièces mécaniques.<br>Tiges de vérins, portées d'arbres, bancs de machines-outils. Ces alliages sont adaptés en fonction de leur dureté, des teneurs en éléments d'alliages   |

**TABLEAU 3. Revêtement et réparation de pièces mécaniques.**

#### **I.4.9. - Post - traitements des dépôts projetés** [2] [5] [16]

Plusieurs traitements sont effectués sur les dépôts pour leurs conférer des qualités supérieures à leur état brut. Ces traitements sont de quatre ordres :

- colmatage,
- imprégnation de la porosité du dépôt,
- traitements mécaniques,
- traitements thermiques.

#### **I.4.9.1. - Colmatage** [5] [16]

C'est une opération qui, par absorption, réaction chimique ou tout autre mécanisme, permet de boucher les porosités ouvertes et d'apporter d'autres propriétés désirées à un revêtement.

On distingue :

- le colmatage naturel : les porosités se compactent au vieillissement ;
- le colmatage artificiel : les porosités sont bouchées par application d'un vernis ou d'une peinture réactive, de peintures non réactives fluides et d'un produit d'imprégnation.

#### **I.4.9.2.. - Imprégnation** [5] [16]

Elle consiste à introduire différents produits colmatants pour éviter les inconvénients de la porosité des dépôts. En général, ce sont des résines ayant un bon pouvoir pénétrant. Elles polymérisent à l'intérieur du dépôt pour l'étancher et lui permettre de résister à certains agents corrosifs.

Ces imprégnations sont effectuées à la brosse, au pistolet de peinture ou sous vide.

#### **I.4.9.3. - Traitements mécaniques** [5] [16]

On peut éliminer les porosités, du moins les boucher, à l'aide de traitements mécaniques. Les techniques d'usinage (tournage, fraisage) sont employées, mais la technique la plus appropriée est le compactage des dépôts par projection sous pression de billes de verre.

#### **I.4.9.4. - Traitements thermiques** [5] [16]

Ils tendent à fermer les porosités, améliorer l'adhérence et même de transformer la structure des couches déposées. Ces traitements permettent aussi de rendre les couches déposées plus ductiles, moins contraintes, et d'augmenter la résistance au choc.

## **I.5. - Contrôle des dépôts obtenus par projection thermique** [2] [5]

La projection thermique s'applique de plus en plus à des pièces mécaniques de précision où il faut assurer une qualité et une fiabilité équivalentes à celles de pièces homogènes. Dans de nombreuses applications, les revêtements de projection thermique sont même soumis à des exigences d'assurance qualité, à des niveaux très élevés.

Les différents contrôles des dépôts : épaisseur, adhérence, porosité, dureté, densité, homogénéité, s'ils sont aisés à réaliser en contrôles destructifs, le sont moins en contrôles non destructifs. Pour pallier cet inconvénient, les industriels ont fait porter leurs efforts sur les contrôles des matériaux à projeter et sur la fiabilité des séquences de projection.

### **I.5.1. - Mesure de l'épaisseur** [2] [5] [16]

Elle est réalisée par plusieurs méthodes ; la plus simple serait d'utiliser des moyens conventionnels de métrologie : pieds à coulisses, palmers, jauges diverses. D'autres méthodes sont également utilisées, telles que :

- Mesure de l'épaisseur par :
  - \* résistance ( $\Omega$ )
  - \* rétrodiffusion de rayons
  - \* ultrasons
  - \* induction magnétique

### **I.5.2. - Mesure de l'adhérence** [2] [5] [16]

L'adhérence est l'une des propriétés les plus importantes de la projection thermique. Elle détermine sa qualité et son application.

C'est un contrôle destructif, les essais sont réalisés sur un échantillon témoin.

La méthode la plus courante est celle qui consiste à coller deux éprouvettes cylindriques. Une des éprouvettes, revêtue sur la face perpendiculaire à la direction de traction, est usinée pour avoir une face propre et plate, l'autre reste sans revêtement. Ces deux éprouvettes sont collées ensemble à l'aide d'une colle à forte adhérence. L'ensemble de ces deux éprouvettes collées subit alors un essai de traction qui permet de connaître la force d'arrachement du dépôt.

En aéronautique, les contrôles d'adhérence sont réalisés sur des échantillons témoins, par des méthodes de pliage ou de poinçonnage.

### **I.5.3. - Mesure de la porosité** [2] [5]

La porosité est toujours présente dans les revêtements obtenus par projection thermique. Le post-traitement diminue cette porosité. La méthode la plus courante pour l'évaluation de la porosité est la micrographie.

Elle peut être effectuée sur une coupe transversale examinée au microscope grossissement x100, par comptage des porosités par unité de surface.

### **I.5.4. - Mesure de la dureté**

Il est difficile d'avoir une valeur exacte de la dureté dans un matériau hétérogène si l'on effectue une macrodureté, c'est-à-dire une microdureté sous une charge importante (= 1000 g) ; on obtient une indication précise de la cohésion des particules entre elles, ce qui donne une idée précise de la qualité du dépôt qui craque si la cohésion n'est pas bonne.

### **I.5.5. - Mesure de la densité**

La façon la plus exacte de réaliser cette mesure est de calculer le volume de l'échantillon, peser et appliquer la formule suivante :

$$d = m / v$$

d : densité apparente

m : masse de l'échantillon

v : volume de l'échantillon

La densité apparente peut être comparée avec la densité théorique du dépôt. La différence des deux valeurs donne une idée sur la porosité du dépôt.

### **I.5.6. - Autres mesures**

Il existe d'autres tests destinés à connaître les paramètres suivants :

- Mesure du coefficient de frottement
- Mesure de l'usure
- Tests de corrosion et d'oxydation
- Test de fatigue
- Résistivité électrique
- Conductivité thermique,
- etc...

## **I.6. - Domaines d'emploi des dépôts obtenus par projection thermique**

### **I.6.1. - Protection contre la corrosion**

La projection thermique joue un rôle primordial quant il s'agit de protéger des métaux contre la corrosion.

### **I.6.2. - Protection contre l'usure** [2] [5]

Le problème de l'usure est présent dans tous les montages mécaniques et la projection thermique permet souvent de trouver des solutions à ce problème.

Les revêtements sont choisis après avoir étudié la cause de l'usure.

#### **I.6.2.1. - Usure par frottement** [5]

Elle existe lorsque 2 pièces sont en contact, en mouvement l'une par rapport à l'autre ; ce mouvement peut se faire dans une ambiance lubrifiée ou non.

On la combat en choisissant :

- des métaux ayant de faibles coefficients de frottement (exemple : le Molybdène)
- des matériaux durs (exemple : carbure de Tungstène)
- des matériaux alliant les deux qualités déjà citées (exemple : oxyde de Chrome).

#### **I.6.2.2. - Usure par abrasion**

Elle existe lorsque le frottement se fait en présence de particules abrasives ; on la combat en utilisant des matériaux durs comme les céramiques.

### **I.6.2.3. - Usure par corrosion**

Elle se manifeste lorsqu'un jet de particules est entraîné à grande vitesse par un fluide liquide ou gazeux.

Des matériaux très durs ou très tendres (Plomb) peuvent apporter une solution.

### **I.6.2.4. - Usure par fretting**

Elle est provoquée à l'interface de 2 pièces en contact par des vibrations de faible amplitude. La notion de fatigue de surface intervient. Les revêtements convenables doivent présenter une bonne cohésion intergranulaire.

## **I.7 - Automatisation de la projection thermique** [2]

Deux aspects de la projection thermique tendent à promouvoir l'automatisation de celle-ci :

- les nuisances inhérentes au procédé (bruit, pollution, matériaux dangereux) ;
- le manque de contrôle non destructif.

Auparavant, les applications de la projection thermique se situaient surtout dans la réparation de pièces détériorées ou dans les travaux sur chantiers(anticorrosion).

Actuellement, le traitement de pièces neuves a fait évoluer la projection vers l'intégration de cette technique dans des chaînes de production.

**CHAPITRE II.**  
**LE MOLYBDENE**

## **II.1. - Généralités**

### **II.1.1. - Introduction**

C'est un chimiste suédois, Karl WILHELM SCHEELE, qui, en 1778, identifia la nature de la Molybdénite ( $\text{Mo S}_2$ ). Le Molybdène métal, fut isolé quatre ans plus tard. Plus d'un siècle s'est ensuite écoulé avant que le chimiste Henri MOISSAN réussit à obtenir du molybdène pur à 99,98 % par réduction au four électrique et à déterminer les propriétés physiques et chimiques de ce métal.

La première utilisation industrielle du molybdène est l'ajout de cet élément dans des aciers pour blindage, en 1894.

La production industrielle du molybdène pur, sous une forme massive, est devenue possible, à partir de 1909.

Le fil de molybdène, utilisé dans la fabrication des lampes à incandescence, a été la première application industrielle importante. L'utilisation du fil s'est développée en métallisation et, avec le ruban, dans la fabrication des lampes radio et des contacts électriques. Ces applications ont constitué l'essentiel de la consommation de molybdène massif jusqu'au début de la seconde guerre mondiale.

### **II.1. 2. - Minerai de molybdène**

Le molybdène est un métal relativement peu répandu sur la terre. Il constitue environ 0,00015 % de la masse de l'écorce terrestre [8]. La plupart des gisements de molybdène semblent groupés dans une bande nord sud du Canada au Chili [8].

Les Etats Unis possèdent plus de la moitié de l'ensemble des réserves mondiales [7].

## II.2 Propriétés physiques [8]

Le molybdène est un métal blanc argenté, de masse volumique 10,22 g/cm<sup>3</sup>.

### II.2.1. - Caractéristiques atomiques et cristallines

Le molybdène appartient au sixième groupe du tableau périodique. Il cristallise dans le système cubique centré avec un paramètre de maille  $a = 0,31472$  nm à 25°C.

- Numéro atomique : 42
- Masse atomique : 95,94
- Valence : 0, + 2, + 3, + 4, + 5, + 6.

### II.2.2. - Propriétés thermiques et thermodynamiques

Température de fusion :  $(2623 \pm 8)^\circ\text{C}$

Enthalpie de fusion :  $28 \text{ KJ. mol}^{-1}$

Température d'ébullition :  $(4627 \pm 20)^\circ\text{C}$

Enthalpie de vaporisation :  $589 \text{ KJ. mol}^{-1}$

Coefficient de dilatation linéique ( $\text{K}^{-1}$ )

$5,1 \cdot 10^{-6}$  à  $27^\circ\text{C}$

$5,5 \cdot 10^{-6}$  à  $1000^\circ\text{C}$

$7,2 \cdot 10^{-6}$  à  $2000^\circ\text{C}$

Conductivité thermique ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

122 à  $500^\circ\text{C}$

101 à  $1000^\circ\text{C}$

82 à  $1500^\circ\text{C}$

La combinaison d'un coefficient de dilatation très bas (le plus bas des métaux purs), d'une bonne conductivité thermique contribue à conférer au molybdène une remarquable résistance aux chocs thermiques.

### **II.2.3. - Propriétés électriques et magnétiques**

Le molybdène présente une bonne conductivité électrique.

Résistivité électrique ( $n \Omega m$ ),  $\rho$

$$\rho = 50 \text{ à } 9^\circ\text{C}$$

$$\rho = 320 \text{ à } 1000^\circ\text{C}$$

$$\rho = 610 \text{ à } 2000^\circ\text{C}$$

Le molybdène est paramagnétique.

## **II.3. - Propriétés mécaniques**

### **II.3.1. - Données numériques**

- . Module d'élasticité (à 20°C) :  $320.10^3$  MPa
- . Module de rigidité (à 20°C) :  $120.10^3$  MPa
- . Coefficient de Poisson (à 20°C) : 0,32
- . Coefficient de frottement sur acier de dureté 44 RC
  - à sec → statique : 0,271
  - dynamique : 0,370
  - humide → statique : 0,405
  - dynamique : 0,465

Module d'Young (à 20°C) : 324,8 GPa

Les caractéristiques mécaniques du molybdène varient en fonction de la température et sont également affectées par les effets d'une irradiation neutronique qui se traduisent surtout par une fragilisation.

#### **II.4. - Propriétés métallurgiques**

Le molybdène est un élément alphagène et carburigène. Lorsque la teneur en éléments carburigènes est faible (Mn ; Cr, W, Mo), ils se dissolvent dans la cémentite en remplaçant dans cette dernière les atomes de fer. Le molybdène remplace jusqu'à 3 % les atomes de fer [15].

Le molybdène s'oppose au grossissement du grain austénitique, accroît fortement la trempabilité, accroît la dureté et la résistance au rouge, augmente la résistance à l'abrasion et à la corrosion, supprime la sensibilité des aciers Ni - Cr au chauffage prolongé vers 700°C ou au refroidissement lent entre 600 et 400°C, supprime la corrosion intergranulaire sous tension de l'acier austénitique 18 - 8 [14].

#### **II.5. - Principaux débouchés** [7]

##### **II.5.1. - Aciers spéciaux**

La sidérurgie est le principal consommateur de molybdène - et ceci en aciérie -, car il augmente la solidité, même à haute température. Il améliore la résistance à la corrosion.

##### **II.5.2 - Fontes alliées**

Le molybdène est également utilisé dans les fontes pour améliorer les caractéristiques mécaniques et particulièrement leur résistance à la corrosion, au frottement et à l'abrasion.

### **II.5.3 - Alliages non ferreux (super- alliages) [7]**

Le molybdène est introduit sous forme de métal et confère au matériau une grande résistance à la chaleur, à la rupture ou à la corrosion. Ces super - alliages sont destinés à l'industrie aéronautique et aérospatiale.

### **II.5.4 - Métal pur [7]**

Le molybdène pur est utilisé comme tel dans des applications où il est soumis à des températures élevées, en raison de son haut point de fusion, de sa résistance mécanique aux hautes températures et sa tendance à conserver une forme.

Le molybdène est employé sous forme de fils (projetés par chalumeau) ou de poudre pour la métallisation de pièces soumises à un frottement sévère (exemple : boîtes de vitesses dans l'industrie automobile). Il est utilisé aussi dans la fabrication d'électrodes de chauffage des Fours , de lampes électriques et tubes électroniques ainsi que dans les industries nucléaire et chimique.

## **II.6. - Le molybdène et le revêtement par projection thermique**

Le molybdène est le matériau idéal lorsqu'il s'agit d'obtenir une très bonne adhérence, un faible coefficient de frottement et une bonne tenue à l'usure [2]. C'est un matériau très dur, très abrasif, très adhérent sur l'acier [11].

Le molybdène est facilement passivable. Il présente une bonne résistance à la corrosion par les acides non oxydants, contrairement aux oxydants par lesquels il est fortement attaqué. La passivation du molybdène est due à la formation superficielle d'un film de sel insoluble. Le molybdène s'oxyde très rapidement à l'air [8].

L'industrie automobile utilise le molybdène en grande quantité pour des rechargements de :

- fourchettes d'embrayage de boîtes de vitesses
- bagues de synchronisation
- segments de piston [2]
- portées de roulements, poinçons, matrices, filières, pièces résistant à l'érosion et à l'abrasion [11]

Les dépôts sont appliqués par projection thermique flamme - fil.

Les épaisseurs des dépôts sont de l'ordre de 1 mm et la dureté du revêtement est d'environ 500 à 900 HV.

La variation de la dureté est liée au taux d'oxydation du molybdène, déterminé par le réglage du pistolet.

**PARTIE**

**EXPERIMENTALE**

**CHAPITRE III.**  
**ELABORATION DU MULTIMATERIAU**

## **Introduction :**

La projection thermique permet de récupérer des pièces usées, d'augmenter leur durée de vie ; c'est donc un moyen de rénovation, de rechargement ou d'élaboration de pièces mécaniques.

Avant d'entamer la présentation des différents travaux, moyens et méthodes utilisés, il serait judicieux d'expliquer la démarche prise tout au long du projet : elle consiste, en fait, en l'élaboration de deux multimatériaux, l'un composé d'un substrat et d'un dépôt, l'autre composé d'un substrat, d'un dépôt et d'une sous-couche d'accrochage en sandwich, entre les deux ;

Après l'élaboration, certains échantillons subiront un post-traitement qui confère au multimatériau des propriétés optimales. A partir de là, certaines techniques de caractérisation seront effectuées, telles que : l'analyse micrographique, la dureté, la microdureté, test d'arrachement, etc...

## **III Elaboration du multimatériau**

### **III . 1 Critères de choix des matériaux**

#### **III .1.1 – Substrat**

Le substrat est un acier de construction, 35CD4, acier faiblement allié. Traitée thermiquement, cette nuance est utilisée en construction mécanique notamment pour les pièces frottantes.

Sa densité est de 7,8.

Après recuit à 850°C et refroidissement lent, sa dureté Brinell est de HB= 217[22].

Trempé à l'huile à 850°C et revenu à 600°C, il aura une résistance à la traction

$R^t = 1000 \text{ MPa}$ , un allongement de 18%. [ 2 2 ] .

La composition chimique de l'acier 35CD4 utilisé et sa structure métallographique sont illustrées ci-après :

| Eléments    | C    | Mn   | Si   | Cr   | Mo   | PetS  |
|-------------|------|------|------|------|------|-------|
| Composition | 0,34 | 0,65 | 0,25 | 1,05 | 0,22 | 0,035 |

Tableau 4 - Composition chimique de l'acier 35CD4 -

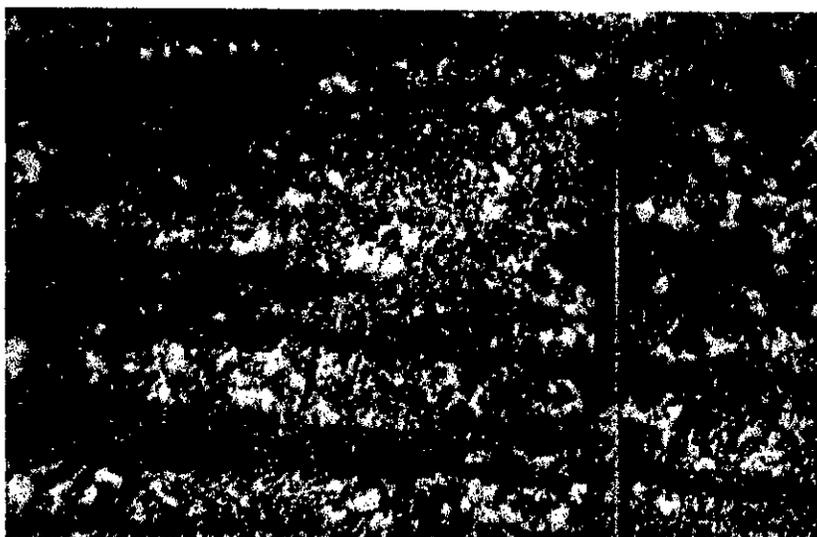


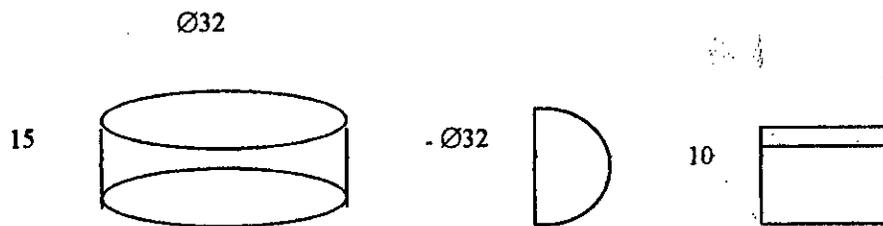
Figure 11 – Micrographie de l'acier 35CD4. Grossissement x 200.

Cette micrographie représente une structure ferritoperlitique. La ferrite apparaît sous forme de plages claires.

Cette micrographie représente une structure ferritoperlitique ; la ferrite apparaît en plages claires.

L'acier 35CD4 utilisé se présente sous forme d'une barre cylindrique. Cette dernière est découpée en petits échantillons, les uns , de 32 mm de diamètre et de 10 à 15 mm d'épaisseur, destinés au test d'arrachement, et les autres de forme parallépipédique destinés aux analyses métallographiques et essais de microdureté ; les essais s'effectuent sur la face indiquée par une flèche.

(Figure 12).



**Figure 12. Dimensions des échantillons de l'acier 35CD4**

Les échantillons obtenus sont rectifiés au tour pour avoir une bonne planéité de surface.

Les surfaces des échantillons, destinées à être revêtues, sont décapées avec du trichloroéthylène ( $\text{HCl-C}=\text{C-Cl}_2$ ). Par la suite, pour augmenter l'aire de contact et améliorer ainsi l'adhérence, les échantillons subissent une rugosification en utilisant le grenailage (pression du jet de la grenaille  $P=7$  bars) à l'entreprise « Algérie Métallisation » et le sablage à S.N.V.I. – Rouiba (Figure 13)

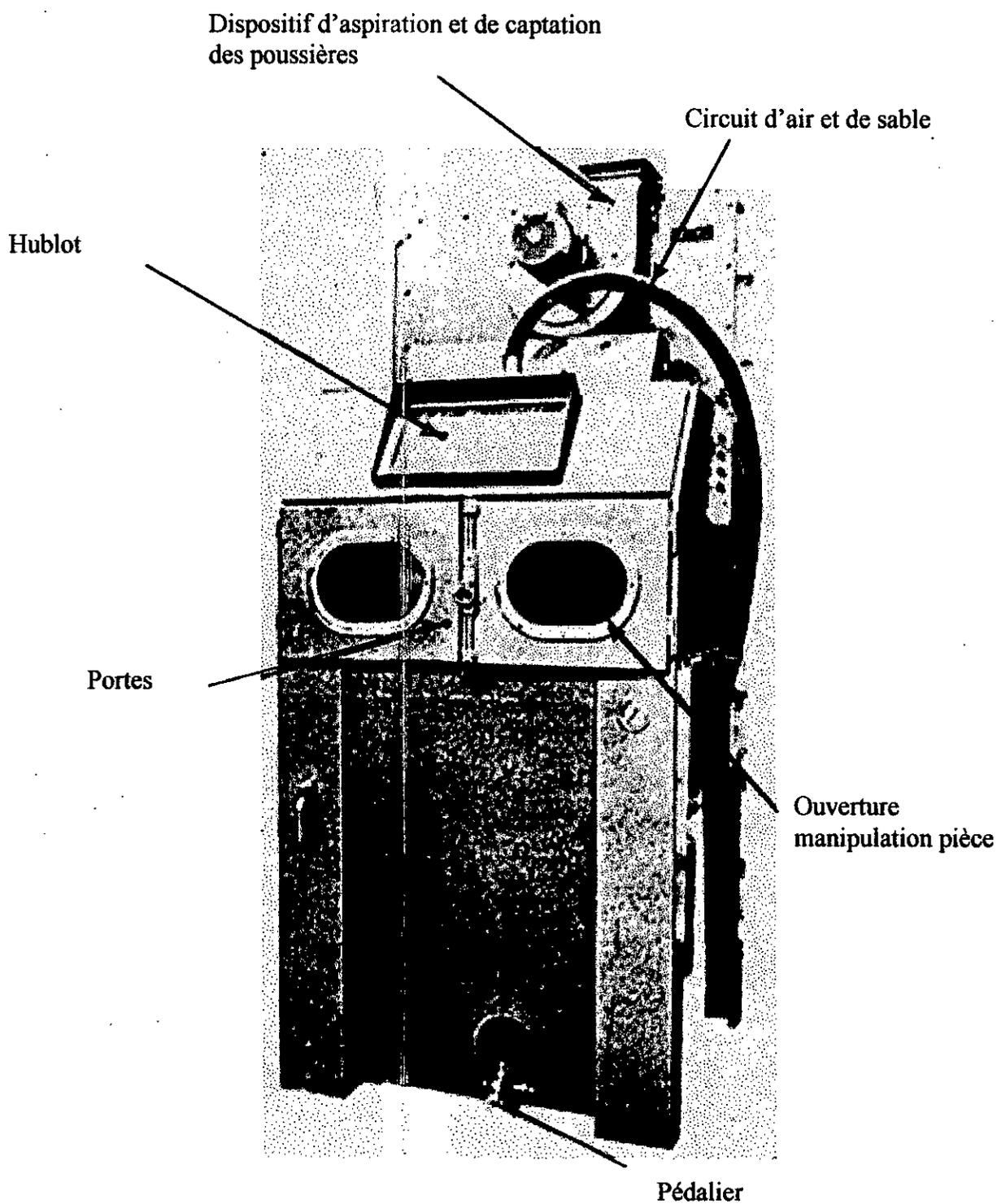


Figure13. Cabine de sablage

### III.1.2. - Elaboration de la sous-couche d'accrochage

Dans certains cas, il est difficile de pouvoir faire adhérer un dépôt sur un substrat, sans prétraiter ce dernier par une sous-couche intermédiaire, dite couche d'accrochage. Elle assure un bon accrochage mécanique par sa rugosité et, dans certains cas, un accrochage physico-chimique par les éléments qu'elle contient, en augmentant l'énergie d'adhérence.

La sous-couche utilisée est composée d'un alliage Ni-Al, désigné par la nuance 75 E. Elle est déposée sur le substrat à l'aide d'un pistolet oxy-acétylénique. L'alliage Ni-Al est sous forme de fil se déroulant au fur et à mesure et projeté sur une épaisseur de 0,2 mm.

La composition chimique de la sous-couche est la suivante :

| Eléments      | Ni | Al | Mn    | Si   | Mg   |
|---------------|----|----|-------|------|------|
| Composition % | 78 | 18 | 1,143 | 0,95 | 0,82 |

**Tableau 5. Composition chimique de la sous-couche d'accrochage.**

### III.1.3. - Dépôt

Afin de réaliser un multimatériau résistant à l'usure, un revêtement par projection thermique au molybdène a été déposé sur une épaisseur d'environ 0,8 mm.

Le molybdène est présenté sous forme de fil de diamètre égal à 2 mm, dont la composition est la suivante :

| Eléments      | Mo    | Hg   | Si   | K     | Ca   | Mg   | Fe    | Cr   | Nb    | Ti    | Au, Ge, La |
|---------------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|------------|
| Composition % | 98,84 | 0,21 | 0,19 | 0,124 | 0,35 | 0,10 | 0,051 | 0,35 | 0,036 | 0,014 | 0,023      |

**TABLEAU 6. Composition chimique du molybdène avant projection**

La figure suivante est une illustration du molybdène déposé.

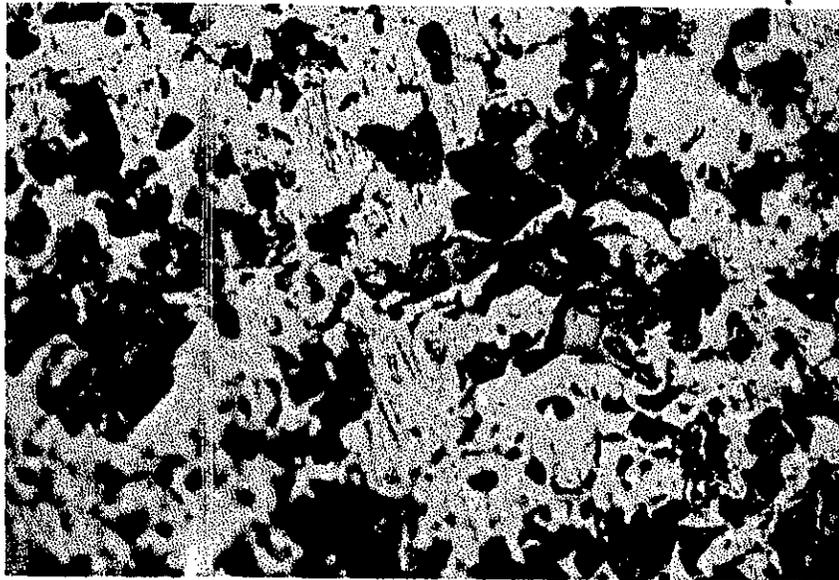


Figure 14. Micrographie du molybdène déposé.

Avant projection, le substrat doit être préparé. Cette étape est déterminante, quant à la qualité du multimatériau. Elle doit donc être menée avec beaucoup de soin [19]. La couche métallisée doit être exempte de bavure, écaillage ou fissure. Son aspect doit être fin, régulier, sans gros grains apparents, ni particules détachables [20].

La projection de la sous-couche et du dépôt a été réalisée par un pistolet de type TOP JET 2 sous les conditions suivantes :

|  |           |
|--|-----------|
| Pression d'oxygène                     | 1,6 bars  |
| Pression d'acétylène                   | 1 bar     |
| Pression d'air comprimé                | 4 bars    |
| Distance entre le pistolet et la pièce | 150 mm    |
| Vitesse d'avance                       | 0,064 m/s |

TABLEAU 7. Paramètres de projection

Le pistolet est illustré sur la figure 15.

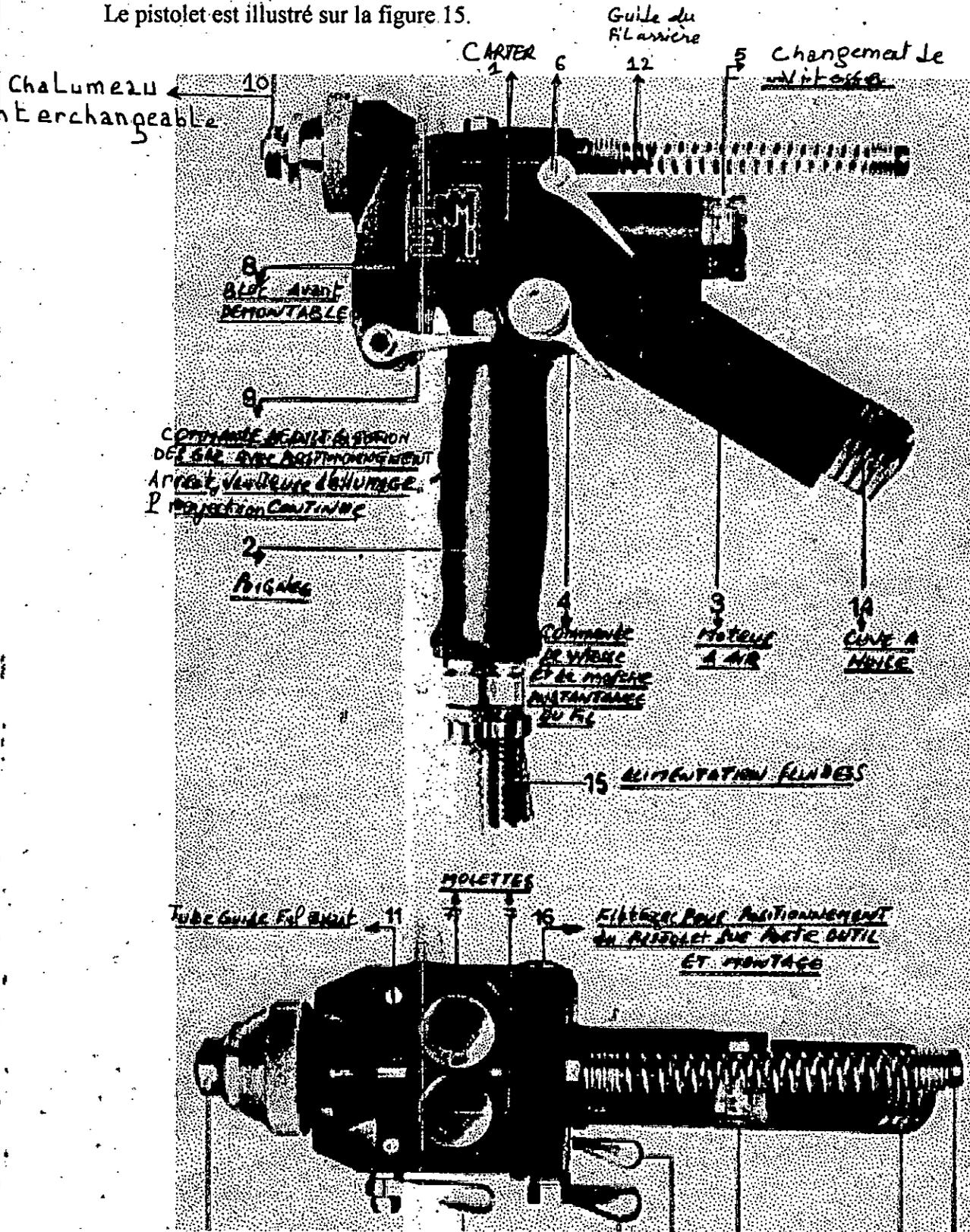
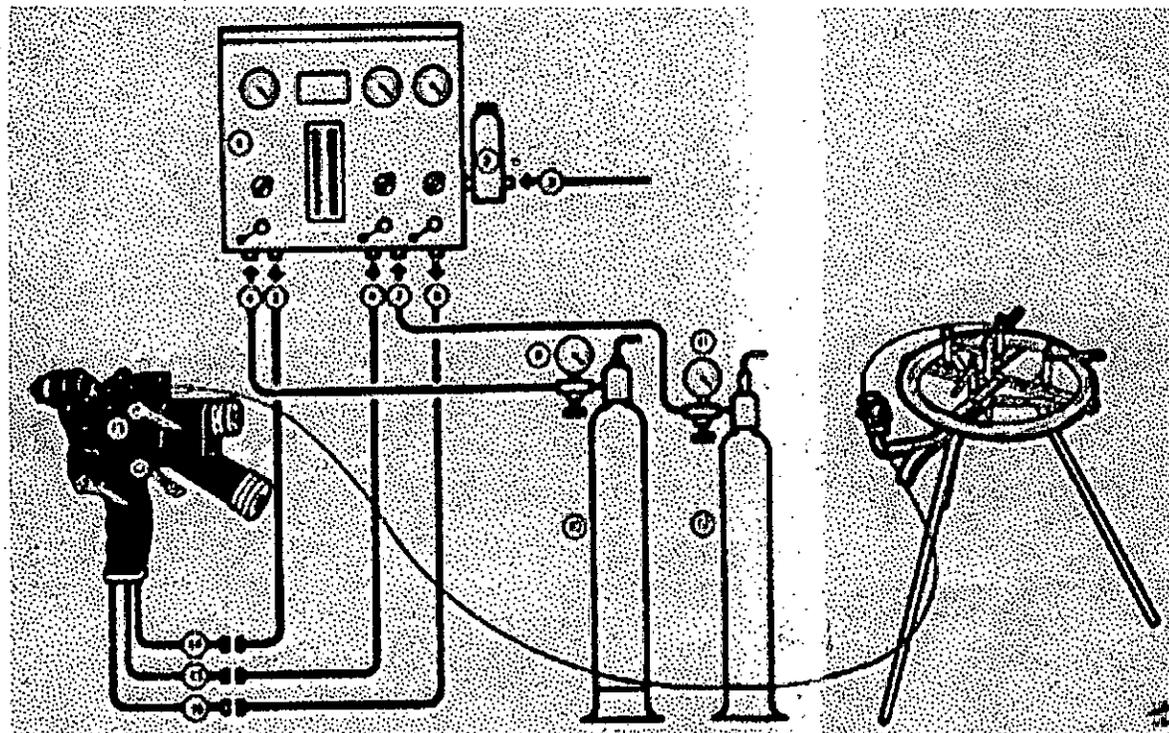


Figure 15. Schéma du pistolet métalliseur.

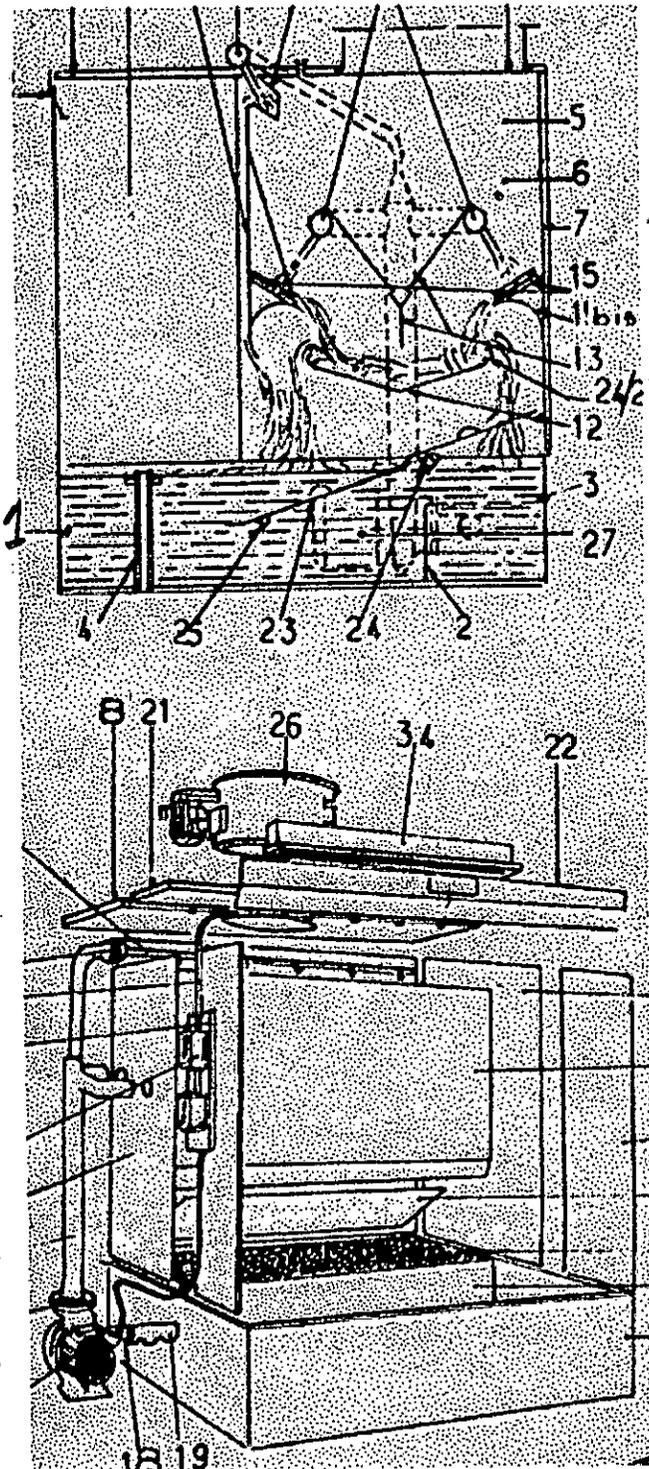
L'installation et la cabine de métallisation sont illustrées sur les figures 16 et 17.



- 1 - Tableau de réglage N° 1101001 - 11 1002 - 11 1004
- 2 - Epurateur d'air 11 1381
- 3 - Arrivée d'air
- 4 - Raccord rapide d'arrivée d'oxygène 11 1282
- 5 - Raccord rapide sortie d'oxygène 11 1281
- 6 - Raccord rapide sortie acétylène ou propane 11 1282
- 7 - Raccord rapide d'arrivée acétylène ou propane 11 1281
- 8 - Raccord rapide de sortie air 11 1291
- 9 - Mano détendeur d'oxygène - 1ère détente 11 1209
- 10 - Bouteille d'oxygène
- 11 - Mano - détendeur d'acétylène ou propane 1ère détente (A : 11 120 P : 11 121)
- 12 - Bouteille d'acétylène ou propane
- 13 - Pistolet métalliseur
- 14 - Raccord rapide d'oxygène au pistolet F : 17.01.1.5181
- 15 - Raccord rapide d'acétylène ou propane au pistolet M:17,013
- 16 - Raccord rapide d'air au pistolet 17,01,5183
- 17 - Tyauterie complète 11,1306

Figure 16. Schéma de l'installation de la projection thermique.

[ 8 ]



- 1 Cuve profondeur 2m
- 2 Tôle de décantation
- 3 Tôle perforée 2m
- 4 Tube trop plein et vidange
- 5 Bloc de lavage H = 2m
- 6 Panneau côté lavage
- 7 Panneau de fond 2m
- 8 Panneau toit de lavage
- 9 Raidisseur toit de lavage
- 10 Bac de rideau avec joint
- 11 Rideau
- 11 bis Bec de corbin
- 12 Bac de lavage avec 2 bavettes de niveau
- 13 Y de séparation
- 14 Rampe de lavage intérieur
- 15 Cornière de remontée
- 16 Tuyauterie de distribution
- 17 Tuyauterie de refoulement
- 18 Coude aspiration
- 19 Crépine
- 20 Côté avant droit
- 21 Panneau de toit avant
- 22 Déflecteur avec plaque
- 23 Tôle de réception
- 24 Tube support de tôle de réception
- 25 Support de tube
- 26 Ventilateur
- 27 Pompe horizontale
- 28 Joint de pompe
- 29 Diaphragme
- 30 Tableau de commande
- 31 Contacteur
- 32 Interrupteur éclairage
- 33 Câblage et tube électrique
- 34 Eclairage avec vitre, tube fluorescent et joint.

Figure 17. Cabine de métallisation.

Un certain contrôle doit être effectué lors de la projection, à savoir :

- le retour de la flamme (claquement)
- l'influence des gaz et de l'air sur les qualités mécaniques
- l'oxydation.

La distance entre le pistolet et la pièce doit être respectée, sinon le dépôt risque de brûler ou de s'oxyder.

### **III.2. – Post-traitement :**

Le dépôt est suivi d'un post-traitement thermique afin de réduire, au maximum, la porosité et l'oxydation des échantillons, ainsi que d'assurer une bonne diffusion du molybdène dans le substrat.

Le choix de la température et du temps de traitement est fait sur la base de l'étude bibliographique [21] et [13] et en comparant les diagrammes d'équilibre binaires et ternaires des éléments Fe, Cr, Mo, Al, Ni. Aussi des traitements thermiques à certaines températures et temps de maintien ont été effectués afin de pouvoir trouver le traitement le plus adéquat.

La température de traitement est fixée à  $T = 500^{\circ}\text{C}$  à différents temps :  $t_1 = 30\text{mn}$ ,  $t_2 = 60\text{mn}$  et  $t_3 = 90\text{mn}$ , sous atmosphère contrôlée (Argon : Ar).

Le débit d'argon est de 3 l/mn.

Après traitement, les échantillons sont refroidis à l'air.

**CHAPITRE IV.**  
**CARACTERISATION**  
**RESULTATS ET INTERPRETATION**

## **IV. 1. - Introduction**

Les multimatériau de deux types différents étant élaborés, leur caractérisation s'effectue principalement au niveau de l'interface. Il s'agit d'échantillons avec et sans sous couche d'accrochage.

Les essais qui ont été utilisés afin de mettre en évidence la physico-chimie et les propriétés mécaniques, ainsi que l'influence du post-traitement préconisée, consistent en :

- 1) – une étude métallographique
- 2) – une étude de microdureté HV
- 3) – une étude de dureté BRINELL
- 4) – un test d'arrachement renseignant sur le degré d'accrochage du dépôt sur le substrat.

Ces différents essais permettront de faire une étude comparative des différents échantillons et de ressortir l'effet de la sous-couche d'accrochage Ni- Al, l'effet du post-traitement et le choix du temps de maintien le plus adéquat.

Signalons que certains échantillons (avec et sans sous-couche) n'ont pas subi de post-traitement pour servir de référence.

## **IV.2. - Analyses métallographiques :**

### **IV.2.1. Micrographie optique :**

Elle a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques, lors d'observations au microscope optique [20]. Les résultats obtenus dépendent directement du soin apporté à la préparation des échantillons. En effet, après le traitement thermique, les échantillons sont polis sur papiers abrasifs à différentes granulométries (120,320,600,1000,1200) puis sur papier feutre à l'aide d'une suspension d'alumine.

La mise en évidence de la structure est réalisée par deux attaques :

REACTIF DE MURAKAMI : [ 1 ] [ 20 ] .

10g de ferricyanure de potassium

10g de soude

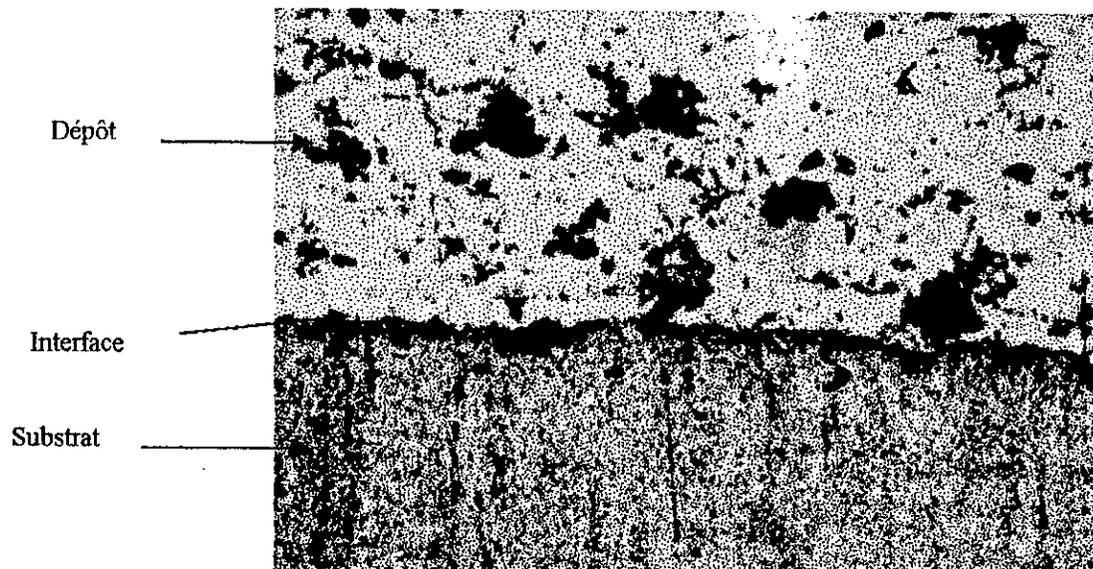
100ml d'eau distillée

C'est un réactif caractéristique pour identifier le molybdène et évaluer sa diffusion dans le substrat à travers l'interface .

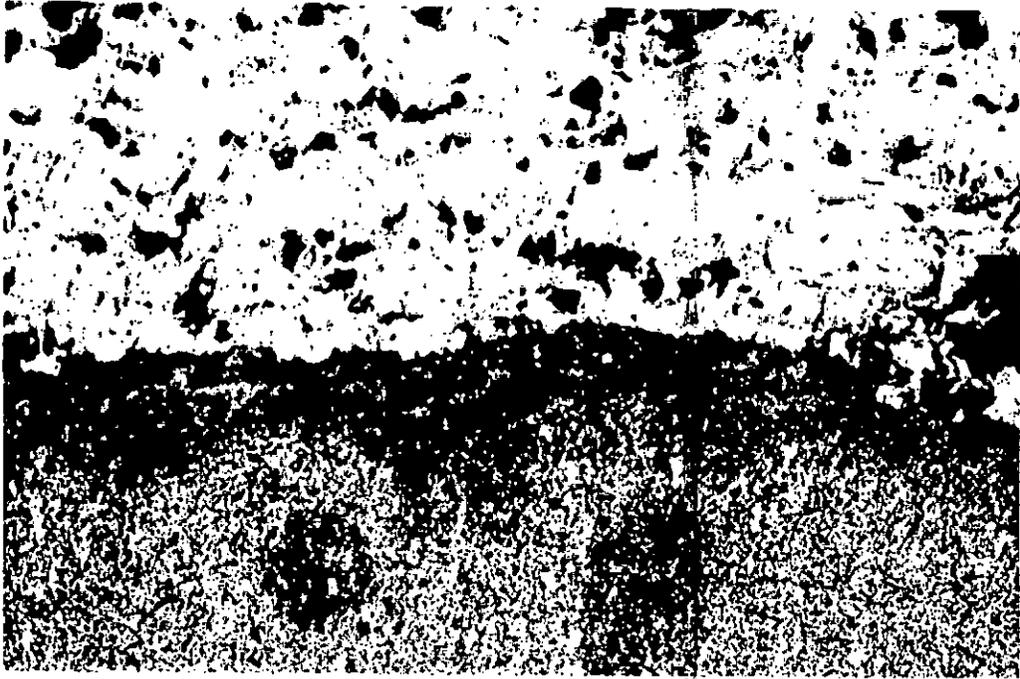
L'échantillon est imbibé de ce réactif pendant 15 s , rincé à l'eau puis soumis à un léger polissage .

Les observations micrographiques et les photos ont été prises avec des grossissements de 200 x , au niveau de l'interface et sur le substrat pour les 8 échantillons (post - traités ou pas) afin de mieux comprendre les processus physico-chimiques qui se sont déroulés , à savoir l'interdiffusion entre le dépôt, le substrat et la sous - couche d'accrochage. [15]

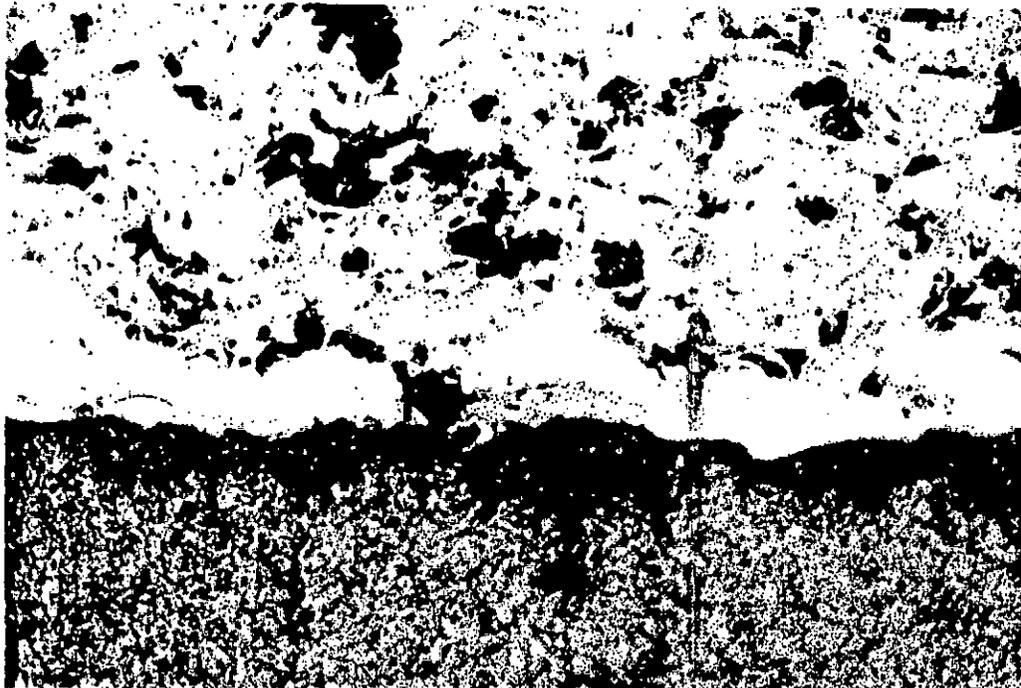
Les micrographies obtenues sont illustrées ci-dessous :



Micrographie 1. Interface sans traitement, sans sous-couche



- Interface avec traitement  $t = 60$  mn sans sous-couche grossissement x 200 -



- Interface avec traitement  $t = 60$  mn avec sous-couche grossissement x 200 -



- Interface avec traitement  $t=90$  mn sans sous-couche grossissement x 200 -



- Interface avec traitement  $t=90$  mn avec sous-couche grossissement x 200 -

## Interprétation

L'observation micrographique montre de façon générale un substrat sombre, un revêtement clair parsemé de taches noires et une interface encore plus claire particulièrement lorsque la sous-couche est présente.

Les taches noires représentent les oxydes et les pores qui se sont formés pendant la projection thermique du molybdène. En effet, ce dernier vient à 2600°C percuter la surface du substrat 35CD4 froid. Les particules liquides s'écrasent au cours des passes de la projection et forment des couches parsemées d'oxydes et de pores.

La projection se faisant à l'air, ce phénomène est donc inévitable.

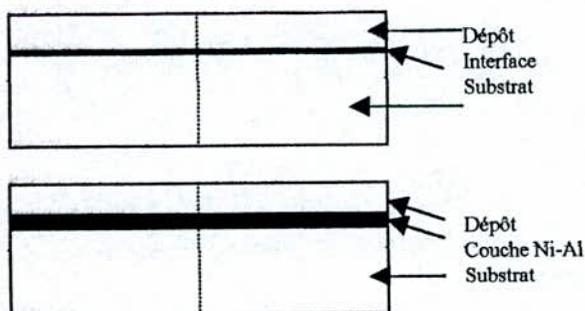
En ce qui concerne le post-traitement thermique de 500°C, on remarque que le temps de maintien influe sur la densité et la taille des oxydes et des porosités.

Pour les échantillons réalisés avec sous-couche d'accrochage, la présence d'oxydes et de porosités est moindre au niveau de l'interface et celle-ci diminue en fonction du temps de maintien.

### IV.3 Essais de microdureté

L'essai consiste à imprimer dans la phase à tester un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée, d'angle au sommet 136°, effectuée sous une charge choisie de telle sorte que l'empreinte soit mesurée avec une plus courte marge d'erreur.

Cet essai est réalisé en effectuant une quinzaine de tests perpendiculairement à l'interface comme indiqué sur la figure 18.



**Figure 18. Répartition des prises de microdureté HV**

**Echantillon non traité avec couche Ni -Al**

|              |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>X(mm)</i> | 0,2  | 0,5  | 0,7  | 0,9  | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,6 | 2   | 2,5 | 3   | 3,5 | 4   | 6   | 8   |
| <i>HV</i>    | 1224 | 1254 | 1200 | 1107 | 131 | 230 | 224 | 214 | 215 | 220 | 220 | 229 | 232 | 220 | 225 |

**Echantillon non traité sans couche Ni -Al**

|              |      |      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>X(mm)</i> | 0,2  | 0,5  | 0,7 | 0,9  | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,6 | 2   | 2,5 | 3   | 3,5 | 4   | 6   | 8   |
| <i>HV</i>    | 1403 | 1726 | 990 | 1089 | 457 | 231 | 224 | 264 | 226 | 218 | 216 | 210 | 228 | 222 | 219 |

**Echantillon traité à ½ h avec couche Ni -Al**

|              |      |     |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>X(mm)</i> | 0,2  | 0,5 | 0,7  | 0,9  | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,6 | 2   | 2,5 | 3   | 3,5 | 4   | 6   | 8   |
| <i>HV</i>    | 1864 | 850 | 1328 | 1163 | 83  | 219 | 225 | 218 | 231 | 229 | 220 | 218 | 224 | 200 | 228 |

**Echantillon traité à 1/2 h sans "Ni -Al"**

|              |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>X(mm)</i> | 0,2  | 0,5  | 0,7  | 0,9  | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,6 | 2   | 2,5 | 3   | 3,5 | 4   | 6   | 8   |
| <i>HV</i>    | 1100 | 1200 | 1400 | 1150 | 195 | 198 | 206 | 200 | 219 | 200 | 203 | 208 | 198 | 209 | 200 |

**Echantillon traité à 1 h avec couche Ni -Al**

|              |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>X(mm)</i> | 0,2  | 0,5  | 0,7  | 0,9  | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,6 | 2   | 2,5 | 3   | 3,5 | 4   | 6   | 8   |
| <i>HV</i>    | 1267 | 1016 | 1552 | 1447 | 93  | 206 | 238 | 221 | 225 | 217 | 206 | 224 | 212 | 208 | 219 |

**Echantillon traité à 1 h sans couche Ni -Al**

|              |     |     |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>X(mm)</i> | 0,2 | 0,5 | 0,7  | 0,9  | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,6 | 2   | 2,5 | 3   | 3,5 | 4   | 6   | 8   |
| <i>HV</i>    | 900 | 998 | 1210 | 1083 | 840 | 224 | 227 | 206 | 216 | 217 | 206 | 224 | 212 | 208 | 219 |

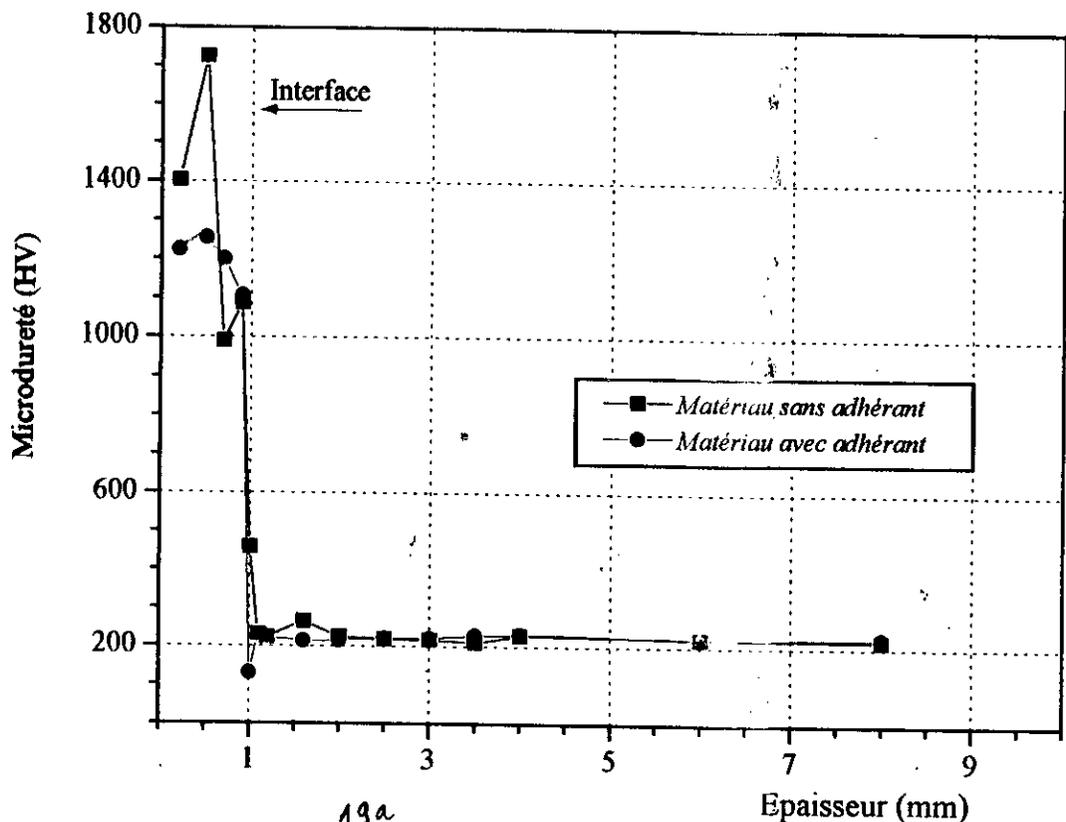
**Echantillon traité à 1 h 30 avec couche Ni -Al**

|              |      |      |      |      |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |     |
|--------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>X(mm)</i> | 0,2  | 0,5  | 0,7  | 0,9  | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,6 | 2   | 2,52 | 3   | 3,5 | 4   | 6   | 8   |
| <i>HV</i>    | 1106 | 1429 | 1088 | 1337 | 115 | 215 | 235 | 215 | 233 | 223  | 200 | 219 | 230 | 220 | 214 |

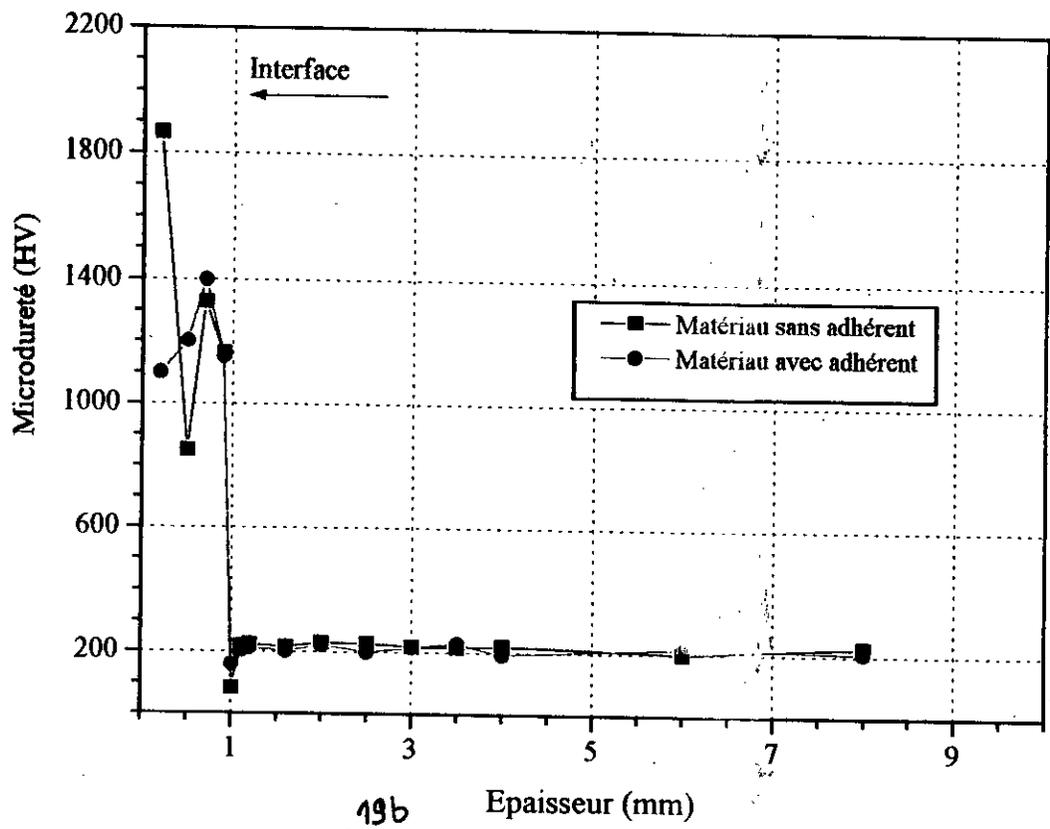
**Echantillon traité à 1 h 30 sans couche Ni -Al**

|              |      |      |      |      |       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------|------|------|------|------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>X(mm)</i> | 0,2  | 0,5  | 0,7  | 0,9  | 1,0   | 1,1 | 1,2 | 1,6 | 2   | 2,5 | 3   | 3,5 | 4   | 6   | 8   |
| <i>HV</i>    | 1110 | 1345 | 1210 | 1054 | 636,5 | 232 | 234 | 225 | 178 | 204 | 224 | 219 | 200 | 210 | 212 |

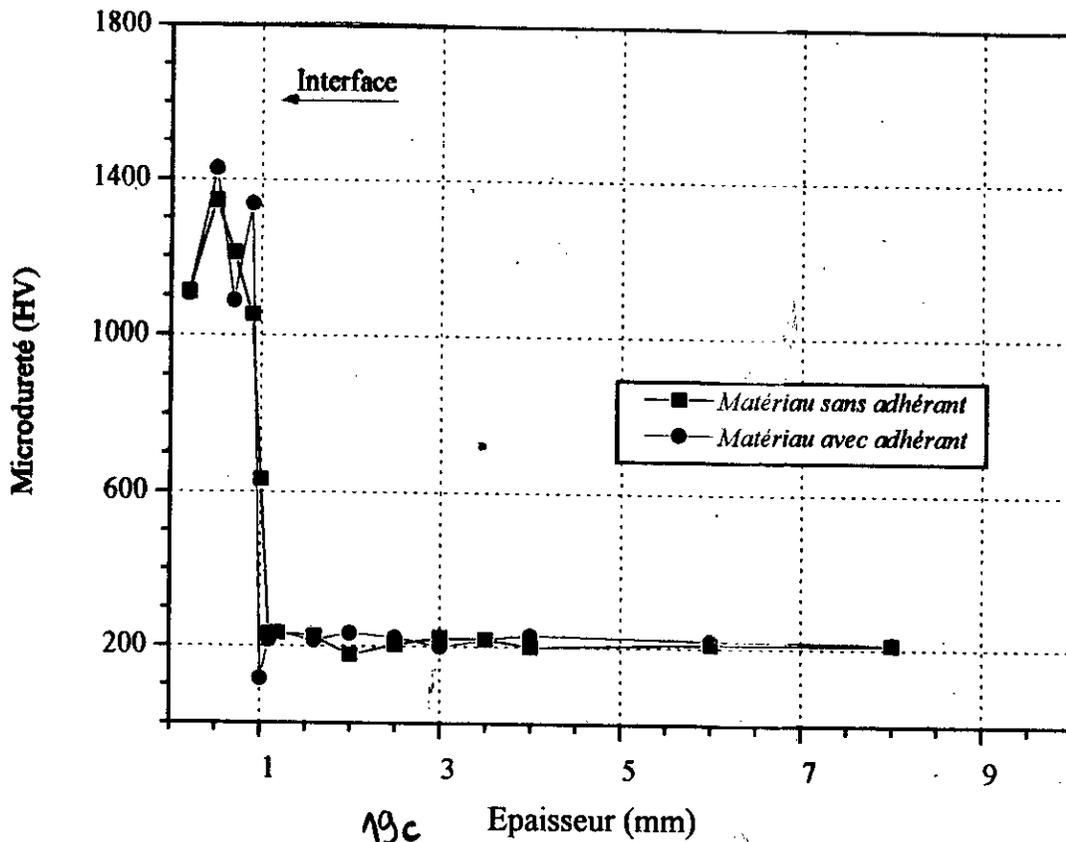
Tableau 8. Résultats de l'essai de microdureté.



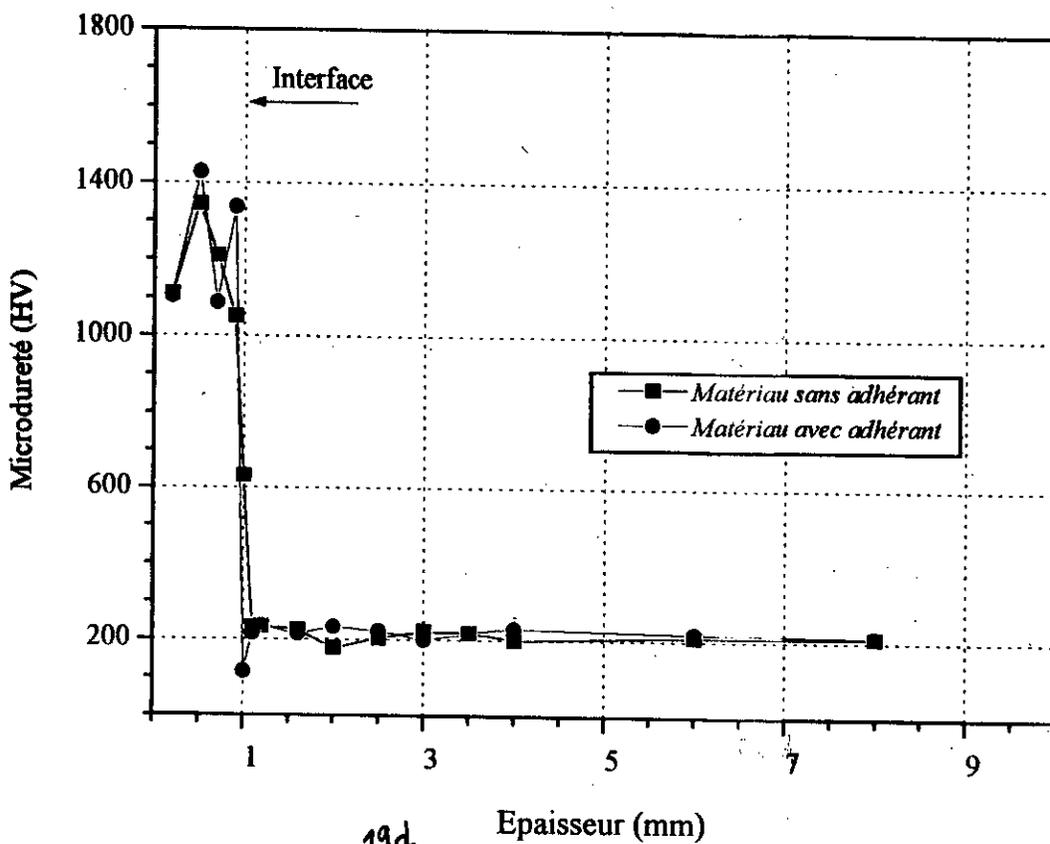
19a  
 Fig : Microdureté HV du multimatériau sans traitement thermique.



19b  
 Fig : Microdureté HV du multimatériau traité pendant 1/2 heure



19c Epaisseur (mm)  
 Fig : Microdureté HV du multimatériau  
 traité pendant 1 heure



19d Epaisseur (mm)  
 Fig : Microdureté HV du multimatériau  
 traité pendant 1 heure et demie

## **Interprétation**

On remarque, d'une part, que la microdureté du substrat est très homogène pour les échantillons non traités et ceux traités à différents temps de maintien. Celle-ci est voisine de 200 HV de façon générale.

La microdureté des échantillons avec sous-couche Ni-Al est faible au niveau de l'interface ; en effet elle représente celle de l'adhérent Ni-Al (80-20) : elle est d'environ 140 à 150 HV.

Les échantillons réalisés sans sous-couche, présentent des valeurs intermédiaires car l'empreinte est réalisée à la frontière entre le dépôt, très dur, et le substrat de dureté avoisinant 200 HV.

La microdureté du dépôt devient de plus en plus homogène en fonction du temps de maintien et les valeurs se confinent dans l'intervalle 1200-1400 HV.

### **IV.4. – Tests d'arrachement**

Ce test consiste à soumettre un échantillon défini à un effort progressif d'extension, jusqu'à rupture. Ainsi, on peut se faire une idée de la qualité de l'adhérence.

La manipulation est réalisée sur une machine de traction servo-hydraulique équipée de mors polyvalents pouvant s'adapter à des éprouvettes de formes géométriques variables.

L'éprouvette élaborée pour le test d'arrachement est illustrée sur la figure 20. [4]

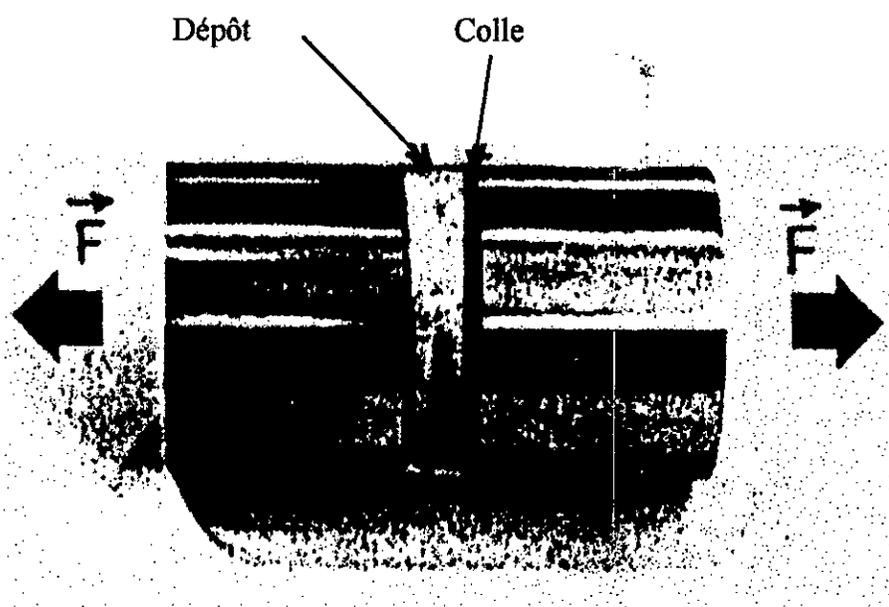


Figure 20. Echantillon relatif au test d'arrachement.

L'éprouvette est, en fait, constituée de trois parties :

- échantillon de nuance 35CD4 rechargé au molybdène (traité et pas)
- échantillon de nuance 35CD4
- une colle spéciale entre les échantillons cités, M bonde 200 adhésive, dotée d'un grand pouvoir collant.

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats obtenus :

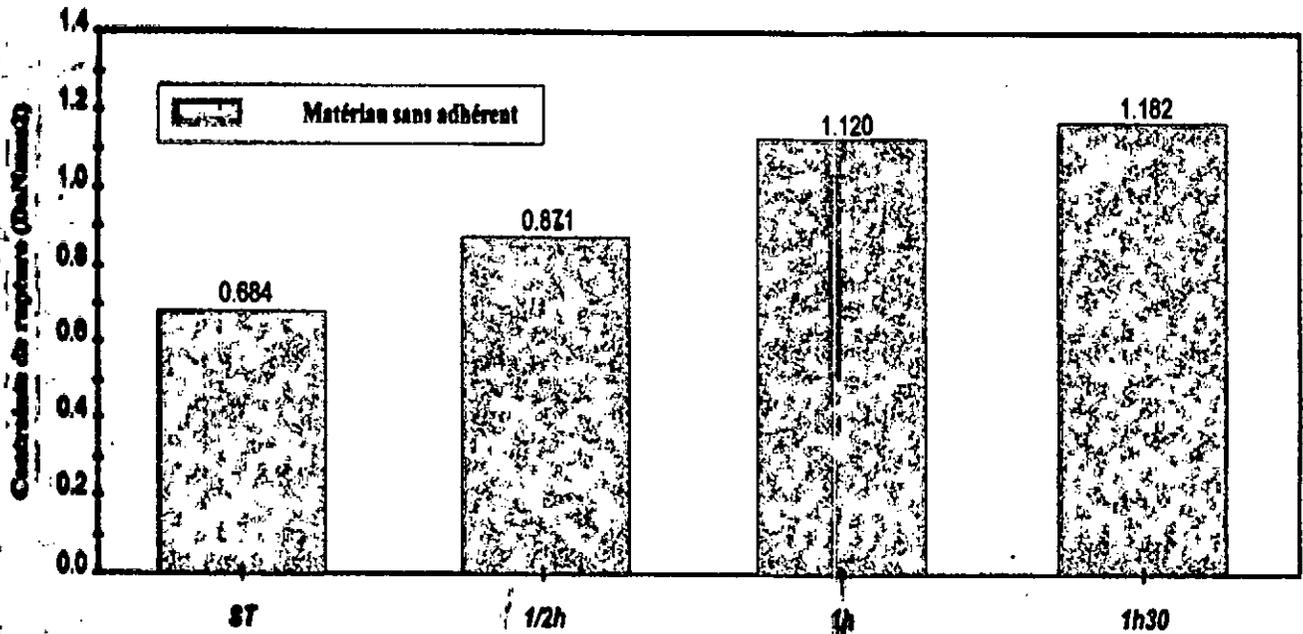
**Echantillons avec sous-couche d'accrochage.**

| Echantillon                     | AA    | AA 1/2 | AA 1  | AA 1 + 1/2 |
|---------------------------------|-------|--------|-------|------------|
| $\sigma$ (daN/mm <sup>2</sup> ) | 0,809 | 0,933  | 1,207 | 1,306      |

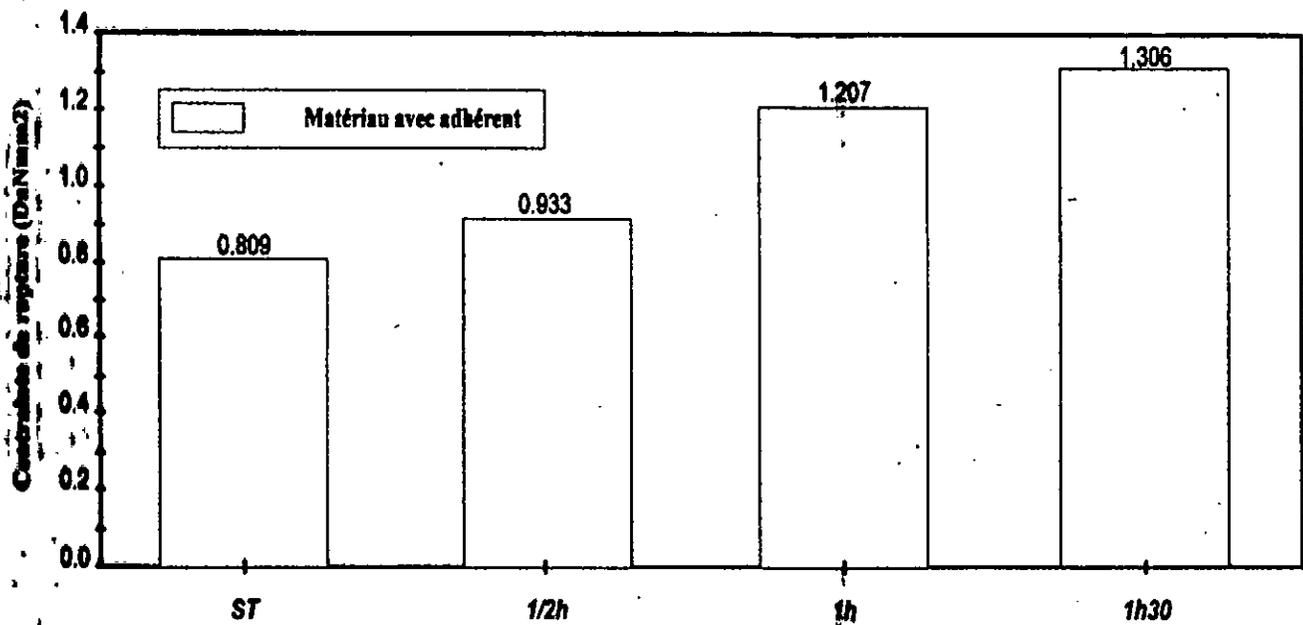
**Echantillons sans sous-couche d'accrochage.**

| Echantillon                     | SA    | SA 1/2 | SA 1  | SA 1 + 1/2 |
|---------------------------------|-------|--------|-------|------------|
| $\sigma$ (daN/mm <sup>2</sup> ) | 0,684 | 0,871  | 1,120 | 1,182      |

### 3. Test d'arrachement



21 Condition de traitement  
Figure : Evolution de la contrainte de rupture  
en fonction des conditons de traitement



22 Condition de traitement  
Figure : Evolution de la contrainte de rupture  
en fonction des conditons de traitement

### Interprétation

A travers les résultats obtenus, après la réalisation du test d'arrachement, on note l'importance de la sous-couche d'accrochage. En effet, les échantillons réalisés avec la sous-couche Ni-Al, présente une adhérence relativement meilleure par rapport aux échantillons réalisés sans la sous-couche.

Aussi, on remarque que l'adhérence devient meilleure lorsque le maintien passe d'une demi heure à une heure puis à une heure et demi.

On peut dire que la sous-couche d'accrochage, comme son nom l'indique, permet de relier le substrat au dépôt en rapprochant leurs propriétés physico-chimiques.

Le post-traitement à 500°C pour un temps d'une heure et demi offre une meilleure adhérence que dans les autres cas.

### **IV.5. Interprétation générale**

Il ressort des résultats métallographiques, microdureté et test d'arrachement que, de façon générale, les échantillons, n'ayant pas subi de post-traitement, ont une structure non homogène, particulièrement au niveau de l'interface.

Le post-traitement d'une heure et demi avec sous-couche d'accrochage est le plus recommandé ; en effet, pour un traitement thermique d'une heure et demi, on observe une convergence positive des diverses propriétés.

## CONCLUSION

L'étude que nous avons entreprise a permis d'une part, une prise de connaissance des problèmes de dégradation des matériaux et pièces mécaniques dus à la fatigue, l'usure, la corrosion, le frottement et, d'autre part, de préconiser un des moyens de lutte contre cette dégradation, et qui est la projection thermique.

Le molybdène étant connu pour ses propriétés exceptionnelles, nous avons réalisé des couches d'environ 1mm sur des substrats en acier 35CD4 très utilisé dans l'industrie mécanique.

Nous avons mis en évidence l'importance de la sous-couche d'accrochage ; en effet, son rôle de liant augmente l'accrochage et l'adhérence entre dépôt et substrat.

Nous avons aussi établi que le post-traitement est bénéfique, particulièrement pour un temps de maintien de 1h 30mn, car il permet une certaine diffusion à travers l'interface dans les deux sens. Une certaine homogénéisation de la structure avec une meilleure répartition des pores, oxydes ... dans le dépôt.

Les résultats obtenus par les différents tests effectués (métallographie, microdureté, test d'arrachement ...), sont assez concluants.

Cependant, il serait souhaitable d'approfondir cette étude par une étude au microscope électronique et une diffraction X. Sans doute, ces tests donneraient de plus amples détails et conduiraient à des recommandations éventuelles.

## BIBLIOGRAPHIE

- [2] / Techniques de l'ingénieur M1645 1982  
Revêtement par projection technique.
- [3] / MADESJSKI – BULL académie polonaise des sciences – 24 1976.
- [4] / Thermal Spraying Practice, theory and application AWS committee anthermal 1977  
Spraying American Welcing Socity, inc.
- [5] / C. DEHMAS. 1994  
Etude de l'influence des post-traitements sur l'adhérence et le comportement  
Mécanique d'un multimatériau réalisé par projection thermique.  
Projet de fin d'étude. Département métallurgie ENP.
- [6] / Cahier des charges de SNVI  
Contrôles des couches de molybdène déposées par projection.
- [7] / J.BURGEN 1983  
Molybdène, Tungstène, Vanadium  
Utilisation, cycle de déchets et possibilités de récupération  
669.27/28.BUR, BIPE - Paris
- [8] / Techniques de l'ingénieur M 565 1982  
Molybdène.
- [9] / Techniques de l'ingénieur M 2374 1982  
Molybdène.

- [10] / Techniques de l'ingénieur M 2462 1982  
Molybdène.
- [11] / Société nouvelle de métallisation  
La métallisation en mécanique T.10.
- [12] / Etude du procédé métallisation 1991/1994  
et amélioration de la qualité des fourchettes.  
Mémoire de fin de stage - SNVI
- [13] / THADDENS B.MASSALSKI 1989  
Binary alloy. Phase diagrams V. 1
- [14] / J. LIGNON R.MALBUAU 1983  
Technologie des fabrications mécaniques. Etude des matériaux. Métaux ferreux  
Editions Delagrave.
- [15] / I. LAKHTINE 1983  
Métallographie et traitement thermique des métaux
- [16] / A. HALLAL 1995  
Etude du comportement d'un multimatériau réalisé par  
Projection thermique d'un acier sur un alliage d'aluminium  
Projet de fin d'étude.
- [17] / J. BARRALIS G. MAEDER 1991  
Précis de métallurgie  
Edition 6.AFNOR et NATHAN

- [18] / **H. ADJRHOURE** 1993  
Adhérence et réactivité des multimatériaux à base de graphite  
Thèse doctorale E. C. Lyon.
- [19] / **L. HADDOUR** 1995  
Comportement au frottement d'un multimatériau type 35CD4/75E/55E-65E  
réalisé par projection thermique.  
Thèse de magister
- [20] / Contrôle des couches de molybdène déposées par projection  
(document Renault- véhicules industriels) norme 01-72-4001
- [21] / **G. V. RAYNOR V. G. RIVLIN** 1989  
Phase equilibria in iron ternary alloys.
- [22] / Nuances et caractéristiques relatives 1985  
Manuel de référence de laboratoire.



- Interface avec traitement  $t = 30$  mn sans sous-couche grossissement x 200 -