

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Ecole Nationale Polytechnique**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en**  
**Métallurgie**

**ETUDE DU COMPORTEMENT**  
**MECANIQUE DES**  
**MULTIMATERIAUX**  
**AU4G/NiAl/55E ET AG3/NiAl/55E**

**Dirigé par :**  
**Mr. MESRATI Nadir**

**Réalisé par :**  
**BOUTEMINE**  
**Zakaria Abderrahmane**

# Remerciements

*Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir donné le foie, la volonté et le courage afin d'arriver à finir ce modeste travail.*

*J'exprime toute ma gratitude à mon Promoteur, Monsieur N. MESRATI pour l'aide précieuse et les conseils éclairés au cours de ce travail..*

*Je suis honoré que Monsieur M.A.DJEGHLAL ait accepté de présider mon jury. Je tiens à exprimer ma gratitude à Messieurs K.ABADLI et KASSER qui ont accepté d'examiner et d'évaluer mon mémoire.*

*Je tiens à remercier vivement Mr A. SADKI qui nous a fourni les échantillons, le technicien de l'Algérie Métallisation Mr. Salah qui n'a ménagé aucun effort lors de la réalisation des composites par la projection thermique, Messieurs A.G.MOKDAD et A.ZEMITTI qui m'ont beaucoup aidé dans la réalisation des essais et pour leurs conseils précieux.*

*Je voudrais aussi remercier tous les enseignants du département de métallurgie et qui ont participé à ma formation et tous les employés de l'ENP.*

*Enfin, je remercie tous mes amis, sans exception et sans distinction, surtout RACHRACHE Youcef pour leur présence et leur soutien.*

# *Dédicaces*

*Aux meilleurs parents du monde ;*

*A mes sœurs ;*

*A toute ma famille ;*

*A mes amis spécialement ceux de l'ENPEI  
;*

*A mes amis de Polytech ;*

*Et à tous ceux qui ont été là pour moi...*

*Je dédie ce travail*

*Zakaria Boutemine*

## ملخص:

في هذه الدراسة قمنا بتلبيس الحديد الصلب الغير قابل للتأكسد (thermanit) على الخليطين المعدنيين (AG3) و (AU4G) عن طريق الشعلة الحرارية (القوس الكهربائي) وذلك قصد تحسين مقاومتها ضد التآكل والإتلاف. الهدف الأساسي من هذا العمل هو دراسة ظاهرة الالتحام بين معدن الأساس وطبقة التلبيس وكذا تعامله مع الضغوط الميكانيكية. الكلمات المفتاحية: الشعلة الحرارية, المتعدد المواد , النارمانيت, الالتحام . التعامل الميكانيكي, AG, AU4G ,

## Résumé :

Dans le cadre de cette étude, nous avons tenté d'élaborer des dépôts d'un acier inoxydable (thermanit) sur deux alliages d'aluminium AU4G et AG3 par projection thermique à l'arc électrique afin d'augmenter leur résistance à la corrosion et à l'usure.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'adhérence entre le dépôt et le substrat ainsi que leurs comportements mécanique.

**Mots clés :** projection thermique, multimatériaux, AU4G, AG3, Thermanit, adhérence, comportement mécanique.

## Abstract:

In the setting of this study, we tempted to elaborate some layers of stainless steel on two Aluminum alloys AG3 and AU4G by the thermal projection with the electric arc in order to increase their resistance to the corrosion and to the wear.

The main objective of this work is to study the adhesion between the substrate and the layer, and then to explain their mechanical behavior.

**Keywords:** thermal projection, Multimaterials, AU4G, AG3, Thermanit, adhesion.

## LISTES DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> Revêtement monocouche .....	07
<b>Figure I.2</b> Revêtement bicouche.....	08
<b>Figure I.3</b> Revêtement multicouche.....	08
<b>Figure I.4</b> Goute de métal liquide (goute de Cécile) sur une surface.....	11
<b>Figure I.5</b> Illustration de l'accrochage mécanique.....	12
<b>Figure II.1</b> Principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium.....	16
<b>Figure II.2</b> Diagramme d'équilibre de l'alliage Al- Mg.....	21
<b>Figure II.3</b> Contenu de l'aluminium dans les véhicules en Amérique du Nord, en Europe et au Japon.....	24
<b>Figure III.1</b> : présente le principe général de la projection thermique.....	28
<b>Figure III.2</b> Disposition des gouttelettes projetées sur le substrat.....	28
<b>Figure III.3</b> Structure en forme de disque .....	29
<b>Figure III.4</b> Structure stratifiée de type trempé.....	29
<b>Figure III.5</b> Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme poudre.....	30
<b>Figure III.6</b> Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil.....	31
<b>Figure III.7</b> Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique.....	32
<b>Figure III.8</b> Principe de fonctionnement d'un pistolet de projection plasma.....	34
<b>Figure IV.1</b> Eprouvette d'essais de traction cylindrique normalisée NF-NOR.....	43
<b>Figure IV.2</b> Eprouvette de traction avec méplat.....	44
<b>Figure IV.3</b> Microtrancheuse.....	44
<b>Figure IV.4</b> Grenaille.....	45
<b>Figure IV.5.</b> Chambre de grenailage.....	45
<b>Figure IV.6</b> : Pistolet de projection à arc entre deux fils « ARC SPRAY 234».....	46
<b>Figure IV.7</b> : Fonctionnement du pistolet a arc électrique.....	47
<b>Figure IV.8:</b> Machine de traction utilisée.....	47
<b>Figure IV.9:</b> Microduromètre utilisé.....	48

<b>Figure V.1</b> Courbe de traction $\sigma = F(A)$ de l'AU4G non revêtu.....	49
<b>Figure V.2</b> Courbe de traction de l'AU4G revêtu.....	50
<b>Figure V.3</b> Comparaison des éprouvettes avant et après rupture.....	50
<b>Figure V.4</b> Comparaison des deux courbes de tractions.....	51
<b>Figure V.5</b> amorçage de fissures lors de l'essai.....	52
<b>Figure V.6</b> Courbe de traction de l'AG3.....	52
<b>Figure V.7</b> Courbe de traction de l'AG3 revêtu.....	53
<b>Figure V.8</b> Comparaison des deux courbes de traction.....	54
<b>Figure V.9</b> Comparaison des deux Multimatériaux.....	54
<b>Figure V.10</b> Micrographie de l'AG3/NiAl/Thermanite avant sollicitation mécanique.....	55
<b>Figure V.11</b> Micrographie de l'AU4G/NiAl/Thermanite avant sollicitation mécanique....	55
<b>Figure V.12</b> Micrographie de l'AG3/NiAl/Thermanite après sollicitation mécanique.....	56
<b>Figure V.13</b> Micrographie de l'AU4G/NiAl/Thermanite après sollicitation.....	57
<b>Figure V.14</b> Micrographie de la Thermanite projetée.....	57
<b>Figure V.15</b> Graphe de la microdureté en fonction de la distance des empreintes.....	57

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau II.1</b> Familles des alliages d'Aluminium corroyés.....	18
<b>Tableau II.2:</b> Désignation des états métallurgiques de base .....	19
<b>Tableau II.3:</b> Les familles d'alliages d'Aluminium moulés.....	22
<b>Tableau III.1.</b> Combinaison produits d'apport/procédés.....	35
<b>Tableau III. 2</b> les principales caractéristiques des procédés et des poudres correspondantes.....	37
<b>Tableau IV.1:</b> Analyse spectrochimique de l'AU4G.....	41
<b>Tableau IV.2:</b> Analyse spectrochimique de l'AG3.....	42
<b>Tableau IV.3</b> Composition de la Thermanit [23].....	42
<b>Tableau IV.4 :</b> Les paramètres de projection.....	44
<b>Tableau V.1</b> Résultats de la microdureté du composite AU4G/NiAl/Thermanite.....	58
<b>Tableau V.2</b> Résultat de la microdureté du composite AU4G/NiAl/Thermanite.....	59

## INTRODUCTION GENERALE

Les organes mécaniques sont amenés à travailler sous des conditions qui peuvent être parfois extrêmes. Les sollicitations mécaniques, l'agressivité chimique du milieu et les contraintes thermiques auxquelles sont soumises ces pièces, provoquent leurs ruines prématurées et parfois brutales, ce qui peut causer des accidents très coûteux sur le plan économique et humain.

Les concepteurs de ces pièces doivent cependant prendre en considération ces phénomènes de dégradations, à savoir corrosion ; fatigue ; usure ; rupture mécanique. Et pour cela ils ont, dans la plupart des cas, recours à des traitements de surfaces ou revêtements pour faire face à ces phénomènes d'endommagements qui s'amorcent généralement au niveau des surfaces.

La projection thermique est une technique utilisée autrefois pour le rechargement des pièces usées et notamment pour l'application des revêtements, elle connaît de nos jours une grande expansion d'application, et ceci même au niveau des industries de pointe comme l'aéronautique, pour la réalisation de barrières thermiques sur les chambres de combustion, l'automobile, afin de revêtir des cylindres de blocs moteurs et la réalisation des biomatériaux pour les prothèses de hanches.

La réalisation des revêtements projetés de hautes qualités exige une bonne cohésion du dépôt et une adhérence élevée des revêtements sur leurs substrats. Du fait de leurs modes d'élaboration, les microstructures des interfaces dépôt/substrat obtenues par projection thermique sont hétérogènes et les propriétés mécaniques qui en découlent sont cependant modifiées. Il est donc nécessaire de comprendre et de cerner le comportement mécanique de ces multimatériaux, afin d'assurer leur bonne conduite en service, et essayer d'établir des relations entre conditions d'élaborations, microstructures, et caractéristiques mécaniques.

Dans le cadre de notre travail, nous avons élaboré des revêtements d'aciers inoxydables « Thermanite » sur des substrats d'alliages d'Aluminium « AG3/AU4G ». L'objectif principal de cette étude est la caractérisation du comportement mécanique de ces dépôts par rapport aux substrats et pour ce fait nous avons partagé notre travail en deux principales parties :

- ✓ Etude théorique : cette partie est réservée à la recherche bibliographique, ceci afin d'avoir des généralités sur les revêtements par projection thermique.
- ✓ Etude expérimentale : cette partie est réservée aux procédés expérimentaux effectués ainsi qu'à l'interprétation des résultats obtenus.

**CHAPITRE I**  
**LES MULTIMATERIAUX**

## I.1 INTRODUCTION

On a toujours besoin des matériaux dont la surface présente des propriétés particulières, telles que la résistance à la fatigue, à l'usure et la corrosion à température ambiante et à hautes températures. Pour ces différentes raisons, on doit faire des traitements de surface et des revêtements qui améliorent la tenue en service des pièces mécaniques soumises à des diverses sollicitations.

Ces traitements, en particulier les revêtements donnent naissance à d'autres matériaux appelés multimatériaux dont les qualités de surface sont différentes de celles qui existent sur le substrat.

## I.2 DÉFINITION

On appelle «multimatériau» tout regroupement de deux ou plusieurs classes de matériaux sous forme de couches sur un métal de base.

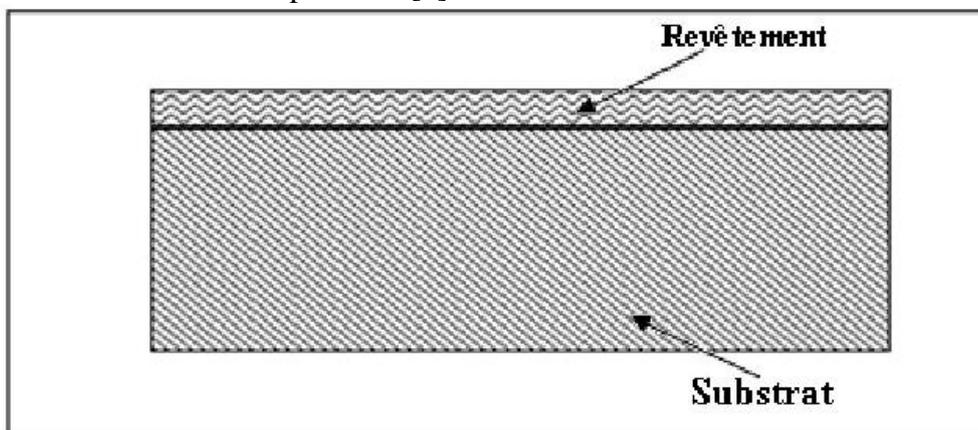
Chaque type de matériau possède des propriétés et des caractéristiques qui lui sont propres. Les métaux sont en général tenaces et ductiles, les matières plastiques sont légères, ont une faible rigidité et des propriétés mécaniques moyennes, et elles sont parfois fragiles. Les céramiques ont un module d'élasticité et une résistance théorique à la traction très élevée [1].

## I.3 TYPES DES MULTI MATÉRIAUX

Actuellement, on peut distinguer trois grands types de revêtements protecteurs qui permettent de résoudre partiellement les problèmes de tenue des pièces en service.

### I.3.1 Revêtements monocouches

Le revêtement est projeté directement sur un substrat (Figure I.1). Dans ce cas, il est recommandable que les coefficients de dilatation thermique de ces deux matériaux soient les plus proches possibles, sauf si une énergie d'adhésion forte peut être obtenue compte tenu des éléments en présence [3].



**Figure I.1** Revêtement monocouche [3].

## I.3.2 Revêtements bicouches

Appelés «duplexes», ces revêtements sont constitués d'un dépôt assurant la protection vis-à-vis du milieu externe (fig. I.2) qui peut jouer d'une part le rôle de barrière chimique et d'autre part d'accommoder les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux [3].

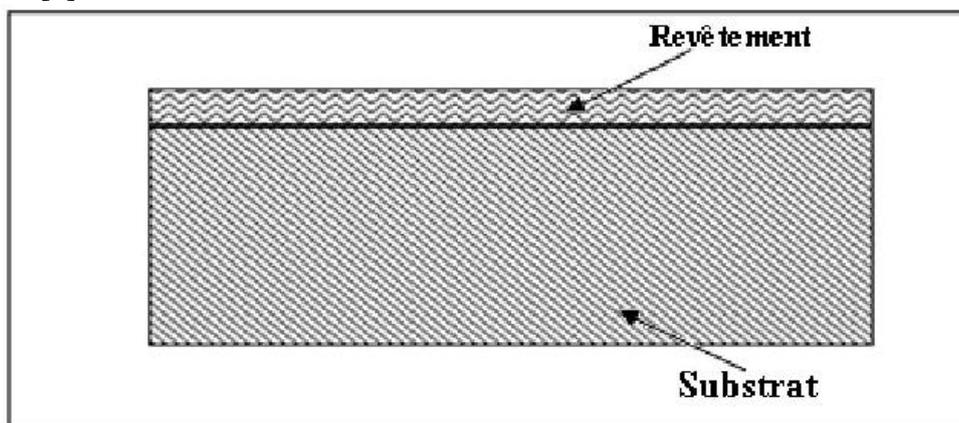


Figure I.2 Revêtement bicouche [3].

## I.3.3 Revêtements multicouches

Ils sont composés d'une sous couche recouverte à son tour d'une couche intermédiaire séparant ainsi le revêtement et la sous couche, cette 3<sup>ème</sup> couche est généralement ajoutée afin de garantir une bonne adhérence entre le substrat et la couche externe. (Figure I.3) [3].

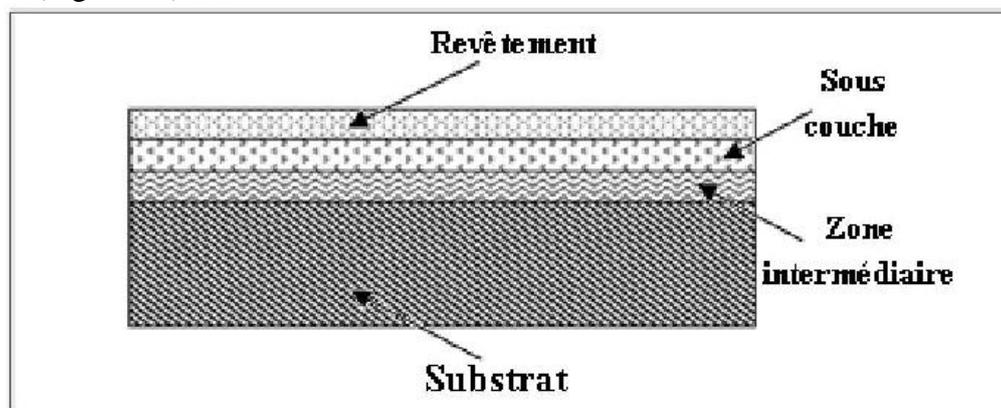


Figure I.3 Revêtement multicouche [3].

## I.4 PROPRIÉTÉS DES MULTIMATÉRIAUX

Plusieurs problèmes peuvent survenir au cours de la réalisation d'un multimatériau, le principal est d'ordre adhésif (au niveau de l'interface revêtement/substrat) en raison de la divergence des propriétés (mécaniques, thermiques et l'état de stabilité thermodynamique) entre les différents constituants du composite ainsi élaboré.

## I.4.1 Adhérence

L'adhérence d'un revêtement sur un substrat est souvent un facteur prédominant dans la détermination des performances des dépôts. Des essais d'adhérence simples et fiables sont nécessaires afin de garantir la reproductibilité du procédé de dépôt et l'intégrité des interfaces obtenues.

L'objet de cette partie est de définir ce que l'on entend par adhérence, de décrire ses diverses causes et de présenter les méthodes d'évaluation de l'adhérence (de façon non exhaustive).

### I.4.1.1 Adhésion et adhérence

#### 1. Définition

Dans la langue française, il existe deux termes pour désigner deux notions qu'il convient de distinguer : l'adhésion et l'adhérence. Les anglo-saxons n'emploient que le mot "adhesion" dans la langue courante. Toutefois, certains auteurs [2] ont ressenti le besoin d'introduire une nouvelle différenciation en parlant de "basic adhesion" et de "practical adhesion". "L'adhésion basique" correspond à l'adhésion francophone et "l'adhésion pratique" à l'adhérence en français.

L'adhésion représente tous les phénomènes microscopiques liant deux corps et l'adhérence en est la mesure.

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

Elle s'écrit, selon Dupré :

$$W_{adh} = \gamma_D + \gamma_S - \gamma_{DS} \dots\dots\dots(2)$$

Avec :

$\gamma_D$  et  $\gamma_S$  respectivement les énergies de surface du dépôt et du substrat.  
 $\gamma_{DS}$  l'énergie d'interface.

#### 2. Phénomènes à l'origine de l'adhérence

Les différents types de liaisons interatomiques peuvent être établis aux interfaces et conduire à l'adhérence des revêtements. Toutefois, les forces d'attraction correspondant à ces liaisons ne peuvent s'appliquer que si les deux matériaux sont suffisamment proches (<0,5 nm) [4]. Pour assurer ce contact, l'étalement de particules liquides sur un substrat est souvent employé, mettant en œuvre des phénomènes de mouillage.

Des impacts à grande vitesse, impliquant de la déformation plastique, peuvent également être utilisés. Les interfaces créées lors de ces divers procédés d'élaboration des dépôts diffèrent de par leurs épaisseurs et de par les mécanismes d'adhérence qui y prédominent. En plus des adhérences chimiques et physiques, qui se rapportent à des échelles atomiques, il existe deux principaux types de mécanismes d'adhérence microscopiques : la diffusion (avec ou sans formation de composés intermédiaires) et l'ancrage mécanique.

## I.4.1.2 Liaisons interatomiques

### a. Adhérence chimique

Les liaisons métalliques sont formées d'électrons délocalisés pour former un nuage électronique autour des ions métalliques positifs. L'énergie de cette liaison est comprise entre 100 et 400 kJ.mole<sup>-1</sup> et elle agit de façon isotrope.

La liaison covalente, qui correspond à une adhésion de type chimique, est due à une redistribution des électrons périphériques qui se déplacent sur des orbitales communes. Elle concerne des atomes particuliers et forment des liens directionnels.

La liaison ionique résulte de l'association d'ions positifs et négatifs. C'est une interaction non orientée car le champ d'attraction des ions a une symétrie sphérique. De nombreuses liaisons, notamment celles des oxydes, sont intermédiaires entre les liens ioniques et covalents. Ils sont dits iono-covalents.

Pour les céramiques, ces liaisons mixtes sont décrites par des taux d'ionisation. L'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) est ainsi considérée comme ionique à 63 % [5]. Ce type de liaison correspond à une énergie de 600 à 1000 kJ.mole<sup>-1</sup> [4].

### b. Adhérence physique

Des groupements d'atomes, reliés par des liaisons covalentes ou iono-covalentes, peuvent être associés entre eux par des liaisons de faible énergie, mais de longue portée, dites de Van der Waals. Elles se produisent entre des distorsions de charges, dans les liaisons entre atomes composant des oxydes, par exemple.

### c. Liaisons métal/oxyde

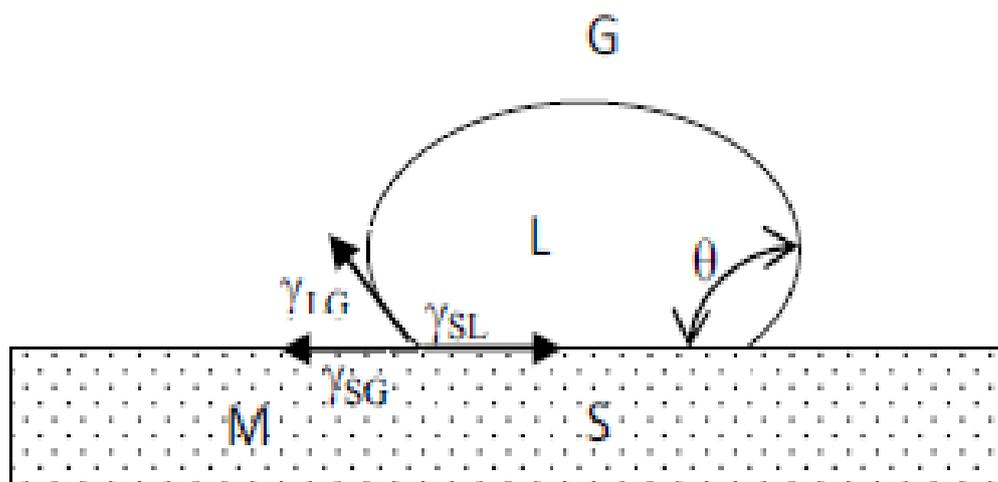
Les liaisons entre métaux et oxydes ne sont pas encore bien comprises. Il est en effet difficile d'imaginer comment des liaisons peuvent s'établir entre un corps à liaisons métalliques et un autre de type ionique ou covalent [6]. Des liaisons peuvent néanmoins être formées par diffusion.

## I.4.1.3 Mouillage

Le mouillage regroupe tous les phénomènes qui interviennent lorsqu'un liquide est mis en contact avec un solide, ce qui intervient lors de l'élaboration des interfaces par projection thermique. Une bonne adhésion implique un bon mouillage du substrat par le revêtement à l'état liquide. Une goutte de liquide sur une surface solide parfaitement lisse prend la forme d'une calotte ayant un angle de mouillage  $\theta$  avec la surface du substrat [7-8]. L'énergie d'adhérence  $W_{Adh}$  dépend du mouillage, via la relation :

$$W_{Adh} = \gamma_L (1 + \cos \theta) \dots\dots\dots(2)$$

Avec :  $\gamma_L$  l'énergie libre de surface du liquide.



**Figure I.4** Goutte de métal liquide (goutte de Cécile) sur une surface plane [16].

Le mouillage total, réalisé pour  $\theta = 0$ , correspond donc au maximum du travail d'adhésion. D'autre part, le mouillage peut être accompagné de transferts de masse à l'interface. L'étalement du liquide peut, en effet, être contrôlé par de la diffusion superficielle [16].

#### I.4.1.4 Diffusion

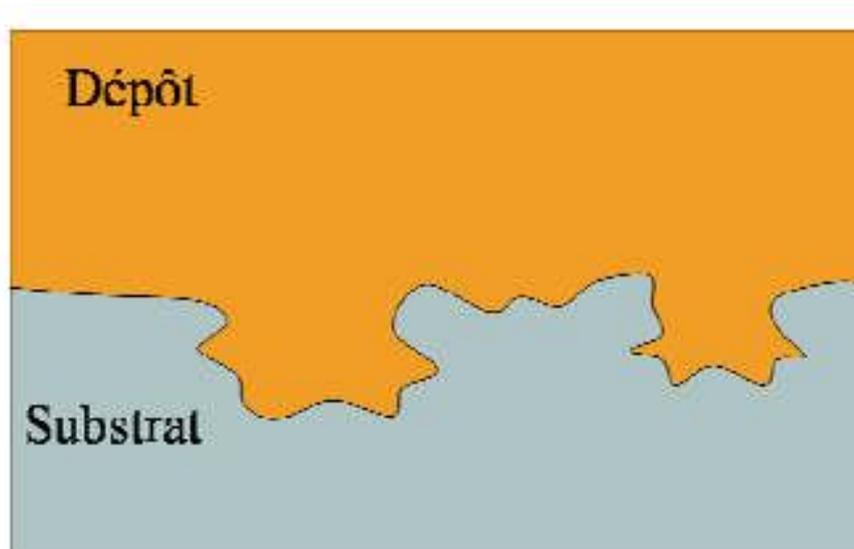
Le phénomène de diffusion entraîne la formation d'une zone de transition dans laquelle un changement constant de la structure cristalline et de la composition chimique sont observés. Ce phénomène de diffusion nécessite une solubilité et un apport d'énergie suffisant, notamment sous forme de chaleur. Une inter-diffusion peut aller jusqu'à la disparition complète de l'interface, déplacée ou remplacée par une zone de transition.

Des phases intermédiaires, dont la composition est constante, peuvent également être formées suivant les propriétés du couple métallurgique en présence. L'inter-diffusion est généralement considérée comme bénéfique pour l'adhérence [9]. La formation de phases intermédiaires fragiles aux interfaces peut conduire à une mauvaise adhérence des revêtements [9-10] ou au contraire l'améliorer [11].

#### I.4.1.5 Ancrage mécanique

La rugosité du substrat est considérée comme un paramètre déterminant pour l'adhérence des revêtements. D'une part, son accentuation permet une pénétration du dépôt dans les aspérités du substrat et un emboîtement des deux matériaux. Ce phénomène, qui est souvent désigné par le terme vague "d'ancrage mécanique", conduit à une augmentation de l'adhérence des revêtements [12-14]. L'adhérence par ancrage mécanique peut résulter plus précisément de l'accroissement de l'énergie mécanique dû à la déviation de la rupture sur les irrégularités de l'interface au cours de l'essai d'adhérence. Dans le cas de revêtements obtenus par projection, l'ancrage mécanique peut également résulter de la contraction des particules lors de leur refroidissement.

La contraction se trouve, en effet, contrariée par la rugosité du substrat, conduisant ainsi à un accrochage des particules.



**Figure I.5.** Illustration de l'accrochage mécanique [13].

La meilleure adhérence des dépôts réalisés sur des substrats rugueux peut également être issue d'une augmentation de l'aire de contact qui permet de multiplier le nombre de sites favorables à la formation de liaisons [6-15].

Tous ces phénomènes bénéfiques à l'adhérence, découlant de la morphologie du substrat, expliquent l'utilisation très répandue du sablage pour préparer les surfaces, avant de les revêtir par projection thermique, par exemple.

Il est rare que l'adhérence d'un couple donné soit attribuée à une seule des causes qui viennent d'être présentées. La plupart des interfaces adhésives mettent en jeu des mécanismes de création de liaison interatomiques. Cependant, la description des interfaces à des échelles atomiques n'est souvent pas suffisante. Les contributions microscopiques de l'ancrage mécanique et de la diffusion ne peuvent pas être négligées.

## **I. 4.2 Méthodes de mesure de l'adhérence**

Il existe un grand nombre de dispositifs permettant de déterminer l'adhérence d'un revêtement sur son substrat. Ces techniques peuvent, par exemple, être classées en quatre catégories [17] :

- les essais de rupture inter-faciale, incluant les essais de pelage, d'indentation inter-faciale et de gonflement-décollement, qui mesurent l'énergie nécessaire à la propagation d'une fissure inter-faciale.
- les méthodes directes, comme les essais de traction et de cisaillement, pour lesquelles la contrainte d'adhérence entraînant la décohésion est directement mesurée.
- les méthodes indirectes qui induisent des champs de contraintes complexes dans les matériaux et nécessitent une simulation des phénomènes intervenant lors de l'essai afin d'obtenir une valeur d'adhérence, soit en contrainte, soit en énergie: l'indentation normale, l'essai de rayure ou l'essai de choc laser.
- les méthodes non mécaniques, comme des techniques utilisant des ultrasons, les courants de Foucault...etc.

## **CHAPITRE II**

# **L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES**

## II.1 HISTORIQUE

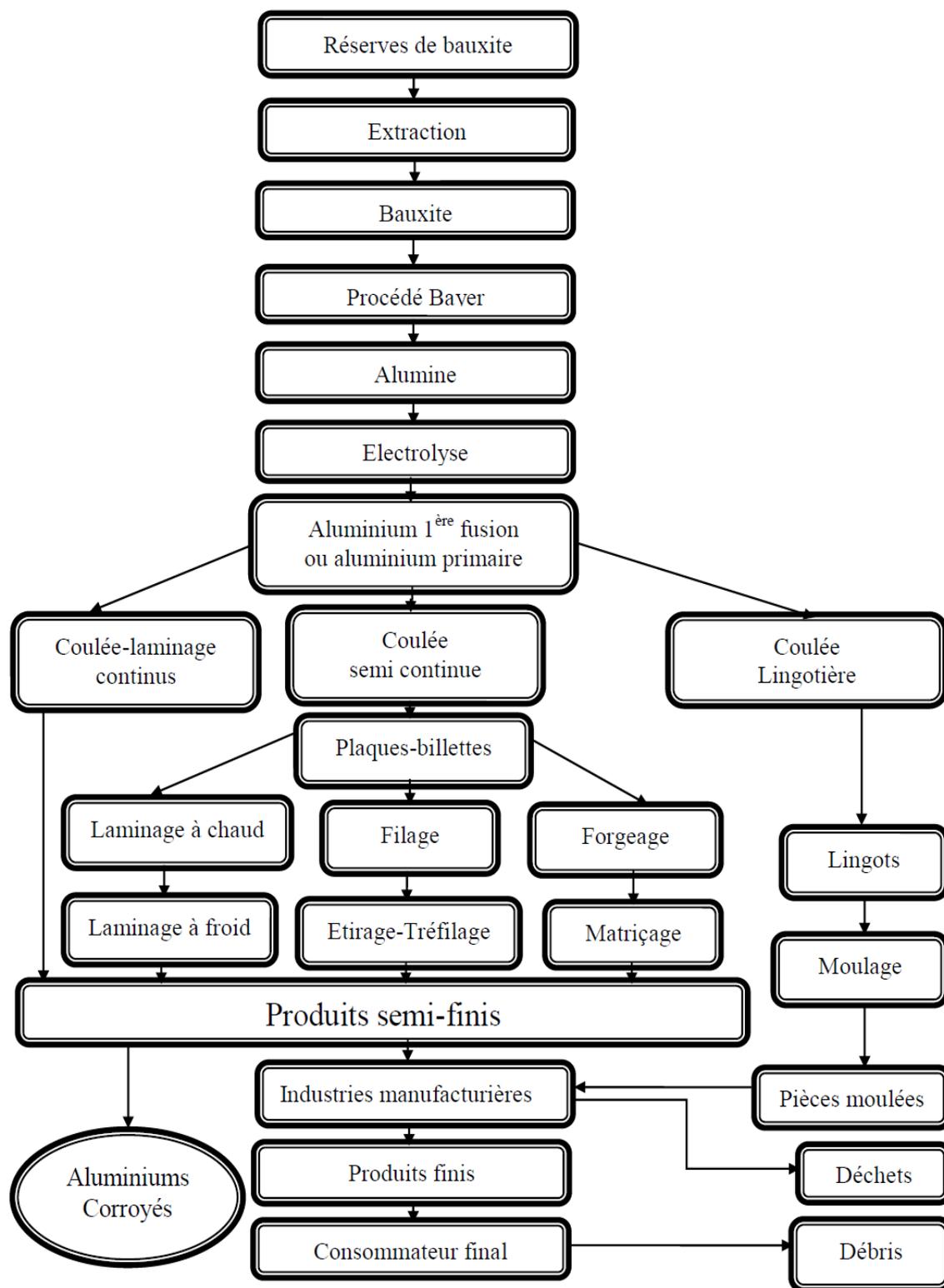
L'Aluminium est classé comme le troisième élément de l'écorce terrestre en quantité, après l'Oxygène et le Silicium. Il est le métal le plus récemment découvert puisqu'il n'est utilisé industriellement que depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Son existence ne fut prouvée qu'en 1808 par l'électro-chimiste Sir Humphrey Davy, qu'il appelle «Aluminium», en électrolysant des sels fondus d'Aluminium [18].

En 1825, Hans Christian Oersted obtient l'aluminium à l'état de corps simple sous forme d'une poudre grise contenant une très grande quantité d'impuretés. En 1827, le chimiste allemand Friedrich Wöhler obtient une poudre grise d'Aluminium contenant cependant moins d'impuretés. Entre 1827 et 1845, Friedrich Wöhler améliore le procédé d'Oersted en utilisant le Potassium métallique. Il est le premier à mesurer la densité de l'Aluminium et à montrer sa légèreté. En 1854, le chimiste français Henri Sainte-Claire-Deville obtient le métal en réduisant le Chlorure d'Aluminium par le Sodium. Avec le soutien financier de Napoléon III, (S.C.D) il crée une usine expérimentale à grande échelle et expose l'Aluminium pur à l'Exposition universelle de Paris en 1855.

Ce n'est qu'en 1886 que la production commerciale de l'Aluminium débuta suite à la découverte simultanée de Paul Louis Toussaint Héroult en France, et Charles Martin Hall aux Etats Unis du procédé d'électrolyse de l'oxyde d'Aluminium dissous dans un bain de cryolithe en fusion. C.M. Hall monte en 1888 une usine pour la Pittsburgh Reduction Co qui deviendra en 1907 The Aluminum Company of America. La production mondiale de celui-ci fut de 6000 tonnes en 1900, et a augmenté régulièrement surtout après 1950 pour atteindre une production mondiale actuelle de 20 000 kT [19].

## II.2 ELABORATION DE L'ALUMINIUM

L'élaboration de l'Aluminium consiste à extraire l'alumine pure de la bauxite, puis la réduire en Aluminium pur par électrolyse.



**Figure II.1:** Principaux stades et flux dans la fabrication de l'aluminium

## II.3 PROPRIÉTÉS DE L'ALUMINIUM PUR

### II.3.1 Propriétés atomiques et cristallines

Ces propriétés sont les suivantes :

- Numéro atomique : 13.
- Masse atomique : 26,98 u.m.a.
- Principal isotope : A127 stable comprenant 14 neutrons et 13 protons.
- Valence dans les composés chimiques : 3.
- Structure cristalline cubique à face centrées stable à toute température.
- Constante réticulaire :  $4,049596 \times 10^{-10}$  m à 25 °C.
- Diamètre atomique :  $2,86 \times 10^{-10}$  m.
- Volume atomique :  $9,999 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/mol.
- masse volumique
- La masse volumique de l'aluminium est de 2,7 kg/dm<sup>3</sup>.

L'utilisation de l'aluminium s'impose donc dans les domaines de la construction aéronautique et du transport automobile et maritime.

I

### II.3.2 Rôle des principaux constituants

L'utilisation d'aluminium en alliage avec les autres éléments est destinée en grande partie à améliorer ses caractéristiques mécaniques.

**Le cuivre (Cu) - U :** Le cuivre contribue fortement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des alliages et améliore considérablement les aptitudes à l'usinage des pièces réalisées y compris dans le cas où elles ne sont pas traitées thermiquement.

A l'inverse, le cuivre est défavorable à la tenue à la corrosion de la pièce. Une protection de surface (peinture, anodisation) est souvent nécessaire. De plus, les alliages aluminium cuivre, dans lesquels la teneur en silicium est très faible, sont assez facilement sujets à la crique (amorçage des fissures) si le refroidissement après la coulée est mal contrôlé ou si le moule est mal étudié vis-à-vis des contraintes dues au retrait.

Les **AU** (série 2000) sont des alliages délicats en fonderie, mais très appréciés des usineurs, lorsque les pièces sont bien étudiées d'un point de vue technologie de moulage. Les pièces réalisées dans cette série d'alliage sont très souvent des pièces soumises à des contraintes mécaniques importantes et, de ce fait, font presque toujours l'objet d'un traitement thermique.

**Le magnésium (Mg)-G :** Le magnésium est le principal agent d'amélioration des caractéristiques mécaniques des alliages d'aluminium.

**Le silicium (Si)-S :** Il est présent dans la majorité des alliages pour fonderie. Sa principale caractéristique est d'améliorer la coulabilité du métal et, par conséquent, de limiter les risques de criques. En revanche, le silicium diminue l'usinabilité de la pièce et rend plus difficile le traitement anodique de décoration.

**Le zinc (Zn)-Z :** Le zinc augmente les caractéristiques mécaniques de l'alliage mais nettement moindre que le cuivre. Il diminue aussi la tenue à la corrosion.

**Le titane (Ti)-T** : Sa principale propriété est d'affiner le grain du métal, ce qui a aussi une influence bénéfique sur les caractéristiques mécaniques [19].

## II.4 CARACTERISTIQUES DE L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

Le développement des applications de l'Aluminium et de ses alliages s'explique par plusieurs propriétés, en particulier [19]:

### II.4.1 La légèreté

L'Aluminium appartient à la famille des métaux légers et de plus présente des caractéristiques mécaniques très élevées. Son poids atomique est égal à 27 uma. Il est l'un des métaux les plus répandus sur la surface de la terre; plus que le Fer, le Cuivre et l'Acier qui sont réputés être les métaux les plus communs. Il constitue de ce fait 80 % du poids des avions actuels. Il est très utilisé aussi dans les transports terrestres rapides TGV et maritimes, et de plus en plus dans l'automobile. Bien que cet élément ait une grande diffusion (plus de 7% des composants de la lithosphère), à cause de sa forte réactivité, surtout avec l'Oxygène, il est présent d'une façon trop dispersée et jamais à l'état élémentaire.

### II.4.2 La conductivité thermique

L'Aluminium non allié a une excellente conductivité thermique, de l'ordre de 60 % de celle du cuivre. Il fond à 660°C et bout à 2500°C, la chaleur de vaporisation est de 10 780 kJ/kg. Les applications des échangeurs en Aluminium sont très nombreuses : automobiles, véhicules industriels, aéroréfrigérants, climatisation, dessalement de l'eau de mer, énergie solaire...etc.

### II.4.3 La conductivité électrique

La conductivité électrique de l'Aluminium est de l'ordre des deux tiers de celle du cuivre (237 W/m. k à température ambiante). L'Aluminium est très utilisé dans les postes de connexion des réseaux aériens haute et moyenne tension.

### II.4.4 La tenue à la corrosion

La position de l'aluminium dans la série des potentiels électrochimiques le rend très réactif ( $E_{Al/Al^{3+}}^{\circ} = -1,66 \text{ V/ENH}$ ), ce qui pourrait faire craindre une grande corrodabilité.

Cette grande réactivité implique une très forte affinité pour l'oxygène, ce qui fait que l'aluminium se recouvre d'une pellicule très dure et adhérente d'oxyde  $Al_2O_3$  qui stoppe la réaction d'oxydation en profondeur et permet à l'aluminium de s'auto protéger en se passivant.

Cette couche d'oxyde plus ou moins hydratée a une résistance chimique limitée car elle résiste bien dans les solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique, et nitrique, par contre, les bases attaquent violemment le métal.

En cas de contact physique entre l'aluminium et d'autres matériaux, des corrosions locales se produisent.

**Ciment et béton** – Signalons que le ciment ou le béton exercent une action néfaste sur l'aluminium, tout au moins au moment de la prise. Le contact de ces deux matériaux est déconseillé en atmosphère humide.

**Fer** – On prendra garde également au contact du fer et de l'aluminium, ce dernier est susceptible de produire le phénomène de pile. Celui-ci est d'ordre électrochimique et se produit lorsque deux métaux de potentiels électriques différents en atmosphère sont plongés dans un milieu ionique conducteur (de l'eau légèrement salée, par exemple). Il est donc tout à fait imprudent de concevoir un assemblage hétérogène sans prendre de précautions particulières, surtout en atmosphère humide. Il faut également savoir qu'en cas de création d'un couple galvanique, l'élément corrodé est celui qui est le plus électro-négatif ; il se sacrifie en quelque sorte au profit de l'autre.

**Zinc** – Ainsi fait le zinc vis-à-vis de l'aluminium qui, lui-même, joue le rôle d'anode soluble corrodée en présence de l'acier, du cuivre ou de l'inox.

Mais en pratique, l'acier rouillant beaucoup plus vite que l'aluminium, la détérioration d'un assemblage mixte provient plutôt de cet élément.

**Inox** – On note également que des réactions de passivation secondaires bloquent souvent la corrosion de contact entre l'aluminium et l'inox.[21]

## II.5 Désignation des alliages d'Aluminium

Généralement, on distingue les deux grandes classes d'alliages d'Aluminium suivantes [18]:

- **Les alliages corroyés** : produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage... etc.
- **Les alliages de moulage** : ils sont obtenus directement par fonderie.

### II.5.1 Désignation des alliages corroyés

La désignation, conforme à la norme **AFNOR NF EN 573** ainsi qu'aux spécifications internationales de l'Aluminium Association (Tab. II.1) :

- Le premier chiffre indique la famille ou la série à laquelle appartient l'Aluminium.
- Le deuxième chiffre indique les modifications nécessaires d'alliages.
- Le troisième et le quatrième chiffre forment un numéro qui indique la pureté d'alliage dans la série 1000 et identifie les alliages dans les autres cas.

<b>Élément d'alliage</b>	<b>Famille</b>
Aluminium non- allié > 99%	1000
Cuivre	2000
Manganèse	3000
Silicium	4000
Magnésium	5000
Magnésium et Silicium	6000
Zinc et Cuivre	7000
Lithium et autres.	8000

En plus de la désignation numérique, les alliages d'Aluminium sont indiqués par l'état métallurgique et l'état de livraison.

L'état métallurgique de base est indiqué en divers états par une lettre F, O, H, T ou W conformément à la norme **AFNOR NF EN 515** (Tableau II.2). [18]

<b>Symbole</b>	<b>Etat de base</b>
F	Brute de fabrication
O	Recuit
H	Ecroui et restauré ou stabilisé
T	Durci par traitement thermique
W	Trempé et non stabilisé

Il est usuel de distinguer deux groupes d'alliages suivant qu'ils sont ou non susceptibles de durcissement structural [22].

## **I.5.1.1 Les alliages sans durcissement structural**

Pour lesquels, le niveau des caractéristiques mécaniques est obtenu par l'effet d'écrouissage dû aux déformations (laminage-filage). Ces alliages sont ceux des séries 1000, 3000 et 5000.

### **1. Alliages de la série 1000 (Aluminium pure)**

Les alliages de cette série sont essentiellement des Aluminiums dont la pureté commerciale est d'au moins 99 % Al. Ils sont utilisés dans de très nombreuses applications et souvent pour des applications de grande consommation : cuve, échangeur, bardage pour bâtiment, emballage, matériel ménager.

Les alliages dits raffinés contiennent plus de 99,99 % d'Aluminium. Ils trouvent leurs applications principales dans l'industrie de l'électronique ou de l'optique: condensateur, microprocesseur mais également dans la fabrication de pièces de réflexion.

### **2. Alliages de la série 3000 (Al-Mn)**

Pour certains alliages de cette famille, le taux de Magnésium est relativement important, on peut parler d'alliage Aluminium Manganèse Magnésium (Al- Mn- Mg). Le Manganèse a pour effet d'augmenter les caractéristiques mécaniques. Dans le même objectif, il est également possible de jouer sur le taux de Cuivre (jusqu'à 0,20 %). Ce sont des alliages à écrouissage. Leurs caractéristiques mécaniques ne sont pas obtenues par traitement thermique mais par la déformation à froid.

Ces alliages sont caractérisés par des propriétés mécaniques relativement faibles, une très bonne aptitude à la mise en forme, une bonne soudabilité et une bonne résistance à la corrosion.

### 3. Alliages de la série 5000 (Al-Mg)

Le Magnésium augmente la charge à la rupture, la limite d'élasticité et la dureté au déterminent de l'allongement. Un traitement thermique améliore les caractéristiques mécaniques, mais il se produit une maturation lente à la température ambiante qui provoque une fragilisation, même après plusieurs années.

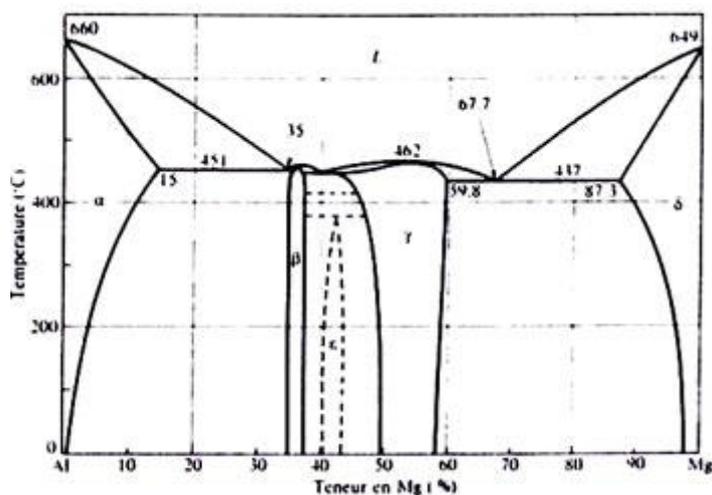


Figure II.2: Diagramme d'équilibre de l'alliage Al- Mg [8].

Les alliages Al-Mg ont une excellente usinabilité. La figure II.2 présente le diagramme d'équilibre de l'alliage Al-Mg. Il contient moins de 4% de Mg. Dans ces conditions, l'élément Mg est retrouvé en solution solide, et le reste sous forme du composé  $Mg_2Al_3$ .

Les alliages de cette série ne sont pas sujets au durcissement structural. Pour les alliages écrouis, un séjour prolongé à la température ambiante ou plus élevée, provoque une précipitation. Le composé  $Mg_2Al_3$  se forme aux joints de grains. Ceci peut entraîner des conséquences néfastes sur la résistance à la corrosion. Il y a, en effet, une possibilité de corrosion inter-granulaire ou de corrosion sous tension. Pour y remédier, on soumet ces alliages, après écrouissage, à un recuit de stabilisation.

Les alliages Al-Mg s'anodisent très bien, aussi pour la protection que pour la décoration. Leurs applications sont très importantes et variées : transports terrestres, construction navale, industrie chimique, et cryogénie (cuves de stockage et transport de gaz liquéfiés) [23].

#### I.5.1.2 Les alliages avec durcissement structural ou trempe

Le durcissement est obtenu par une gamme de traitement thermique comportant une mise en solution, une trempe suivie d'un revenu ou d'une maturation à l'ambiante. Ces alliages sont ceux des séries 2000, 6000 et 7000.

## 1. Alliages de la série 2000 (Al-Cu)

Ces alliages se caractérisent par une résistance mécanique élevée après revenu, une bonne tenue à la chaleur, une résistance chimique moins bonne que celle des alliages sans Cuivre et des possibilités de soudage limitées. Ils sont très utilisés en aéronautique, armement, mécanique et sport. Ils présentent une bonne résistance à la chaleur (utilisation pour les disques et aubes de compresseurs ainsi que pour la structure de l'avion Concorde). Ils sont spécialement adaptés pour le décolletage. L'addition du Cuivre à cet alliage améliore la charge de rupture et la limite d'élasticité au détriment de l'allongement. Ils ont une excellente usinabilité, mais ils ont une mauvaise tenue à la corrosion, en particulier à la corrosion marine.

Les couches de protection obtenues par anodisation sont peu épaisses, poreuses et de dureté moyenne. Par contre, elles sont claires, donc utilisables en décoration.

## 2. Alliages de la série 6000 (Al-Mg-Si)

Ce sont des alliages de filage par excellence, ils présentent, par ailleurs, une résistance mécanique moyenne mais surtout une bonne résistance à la corrosion et une excellente aptitude à l'oxydation anodique. La nuance 6060 est utilisée dans la menuiserie métallique, les nuances 6005A, 6061 et 6082 sont réservées aux profilés de structure (véhicules routiers et ferroviaires, charpente, pylônes...). L'alliage 6101, est actuellement le constituant majoritaire de tous les câbles des lignes de transport d'énergie électrique. Il est utilisé notamment pour réaliser des tubes hydrauliques.

## 3. Alliages de la série 7000 (Al-Zn)

Les alliages de cette famille présentent d'excellentes caractéristiques mécaniques de traction. Malheureusement, ses bonnes caractéristiques mécaniques sont obtenues au détriment de la résistance à la corrosion. Pour retrouver une bonne résistance à la corrosion, il faut effectuer ce qui est appelé un sur-revenu ou revenu à double pallier (T7). Ce traitement se paie par une baisse des caractéristiques mécaniques. Ces alliages se divisent en deux groupes: les 7000 avec addition de Cuivre et les 7000 sans addition de Cuivre.

- **Les alliages 7000 avec Cuivre** : ils possèdent les meilleures résistances mécaniques (à l'état T6). Le sur-revenu fait baisser les caractéristiques mécaniques d'environ 20 %. L'alliage le plus connu de ce groupe est le 7075 utilisé en aéronautique, armement et sport.

- **Les alliages 7000 sans Cuivre** : en les comparant avec les alliages au Cuivre, ils ont de moins bonnes caractéristiques mécaniques, mais leur résistance à la corrosion est meilleure. Certains comme le 7020 présentent également de bonnes aptitudes à la soudure [23].

## 4. Alliages de la série 4000 (Al-Si)

Ils sont nettement moins utilisés que les alliages des autres séries. Les alliages Aluminium Silicium sont principalement des alliages de fonderie. On peut distinguer :

- Les alliages bas Silicium (taux inférieur à 2 %) qui sont utilisés pour la soudure et également pour des ustensiles émaillés (alliage 4006).

- Les alliages hauts Silicium (taux compris entre 5 et 13 %). Ils sont utilisés en soudure (exemple, le 4043 est utilisé en soudure Tungestan Inert Gaz « TIG » et Manganèse Inert Gaz « MIG »).

## II.5.2 Désignation des alliages de moulage

La désignation alphanumérique, autrefois en usage en France, a été remplacée par une désignation numérique, comme pour les alliages de corroyage, mais en 5 chiffres selon la norme AFNOR NF EN 1780-1.

- La correspondance entre le premier chiffre et l'élément d'alliage est donnée dans le Tableau II.3. Les 2<sup>èmes</sup> et 3<sup>èmes</sup> chiffres indiquent le niveau de pureté de l'alliage d'Aluminium.
- Le dernier chiffre indique si l'on a affaire à un lingot ou à une pièce de fonderie.

<b>Élément d'alliage</b>	<b>Famille</b>
Aluminium non- allié > 99%	1000
Cuivre	2000
Manganèse	3000
Silicium	4000
Magnésium	5000
Magnésium et Silicium	6000
Zinc et Cuivre	7000
Lithium et autres.	8000

## II.6 QUELQUES APPLICATIONS DE L'ALUMINIUM

En quantité et en valeur, l'aluminium est le métal le plus utilisé après le fer, grâce à sa légèreté et sa bonne conductivité électrique et thermique. L'aluminium pur est mou et fragile, mais avec des petites quantités de cuivre, magnésium, manganèse, silicium et d'autres éléments, il peut former des alliages aux propriétés variées.

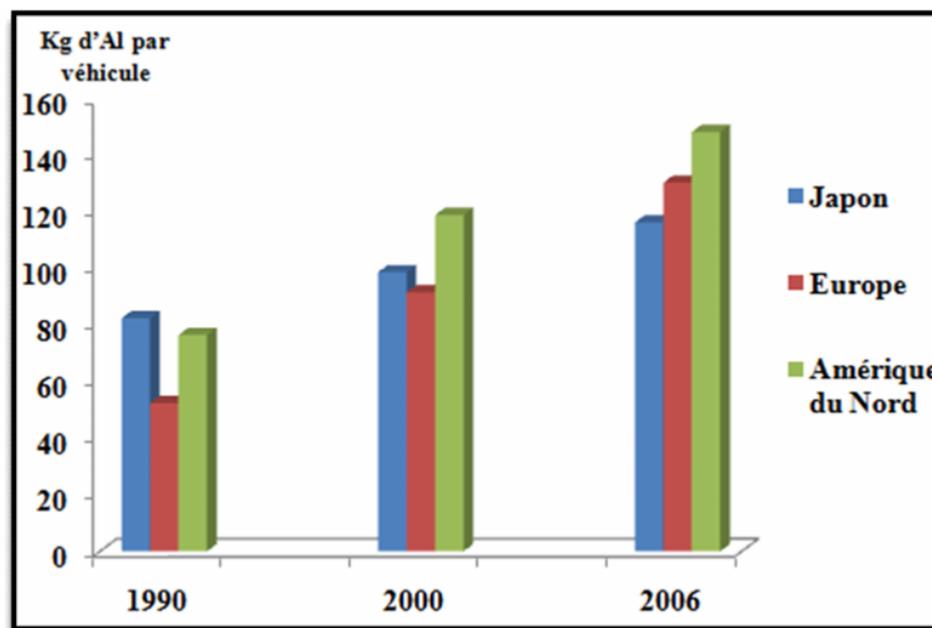
Parmi les secteurs utilisant l'aluminium, on peut citer [24]:

### II.6.1 L'aluminium dans les transports

La nécessité de réduire le poids des véhicules en vue de diminuer leur consommation de carburant, ou d'augmenter leur charge utile ou leur rayon d'action, conduit la plupart des constructeurs à substituer de plus en plus d'aluminium à d'autres matériaux lourds, notamment à la fonte, l'acier, les métaux cuivreux.

## a) Automobile

Dans le domaine de l'automobile où la bataille entre matériaux est la plus spectaculaire, l'aluminium est en compétition avec la fonte sur les blocs moteurs, avec les céramiques sur les pistons, avec l'acier, les plastiques, le magnésium sur les carter, avec le cuivre sur les échangeurs, avec l'acier, les plastiques et les composites sur la carrosserie [25].



**Figure II.3:** Contenu de l'aluminium dans les véhicules en Amérique du Nord, en Europe et au Japon [26].

## b) Transports aérien

L'Aluminium et l'aéronautique ont toujours été, et sont encore, étroitement liés. Si l'aéronautique a débuté avec les appareils dont les structures en bois, son véritable démarrage ne fut rendu possible que grâce à l'invention en 1903 d'un alliage aluminium-cuivre-magnésium, commercialisé sous le nom de duralumin, aujourd'hui alliage 2017 ; les premières applications furent en 1914 et concernent les structures des dirigeables Zeppelin et les structures des avions militaires Breguet 14 construits à 12 000 exemplaires en 1917.

La prépondérance de l'aluminium dans l'aéronautique n'a pu être conservée que par une évolution considérable au fil des ans des alliages utilisés ; aujourd'hui encore l'aluminium représente près de 80% de la masse à vide des structures des avions modernes.

## II.6.2 Aluminium dans l'armement et les équipements militaires

L'aluminium occupe une place importante dans ce domaine, citons :

- Les chars et véhicules blindés : roues ou galets en alliage 2014 matricé, blindage (à égalité de poids, les alliages du type 7020 présentent des propriétés balistiques voisines de celles de l'acier de blindage) ;

- Les véhicules amphibies ;
- Les obusiers (exemple : M-102 la légèreté de l'aluminium permet le transport par hélicoptère) ;
- Les munitions ;
- Les pièces balistiques : fonds et corps de propulseurs en alliages 2014, 7049,7075
- Les tubes (bazookas), les lance- rockets ;
- Les matériels de génie militaire: engins de franchissement en alliage 7020 soudé [27].

## **CHAPITRE III**

# **LA PROJECTION THERMIQUE**

## III.1 INTRODUCTION

L'apparition des revêtements par projection thermique date de 1909 avec l'invention de Schoop portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme. Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'aluminium), ou encore en décoration (dépôts de bronze). Dès 1914 également des essais de projection par arc électrique furent réalisés.

### *Évolution des procédés*

C'est après la Seconde Guerre mondiale que le domaine d'application de la projection thermique s'est élargi à l'industrie mécanique (apport de revêtement d'acier dans le cadre de rénovation de pièces usagées), puis à l'industrie aéronautique. La recherche de propriétés de surface spécifiques sur les pièces en service, dont les conditions d'emploi sont de plus en plus sévères, a permis le développement de nouveaux procédés [plasma, canon à détonation, HVOF High VelocityOxygene Fuel...] (figure A) et de nouveaux matériaux associés (céramiques, carbures, composites, superalliages...).

Aujourd'hui les objectifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs vont dans le sens de la réduction des coûts et de l'amélioration des performances. Les pièces constitutives de machines ou équipements, de dimensions de plus en plus réduites, doivent résister à des sollicitations nombreuses :

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

La projection thermique va permettre de conférer à chaque zone la propriété de surface nécessaire à son fonctionnement, tout en autorisant des choix de matériaux de base compatibles avec les propriétés à cœurs recherchées.

### *Secteurs d'activité*

Tous les secteurs d'activité sont aujourd'hui concernés par la projection thermique. Si la protection anticorrosion reste le cas d'application le plus fréquent, certains secteurs comme l'automobile présentent des applications multiples parmi lesquelles on peut citer à titre d'exemples : soupapes, segments de piston, anneaux de synchro, disques d'embrayage, sondes lambda, cylindres, pompes, platines d'alternateurs, plaquettes de freins...

## III.2 PRINCIPE GENERAL

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. La surface de base ne subit ainsi aucune fusion. L'adhérence du dépôt est mécanique.

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

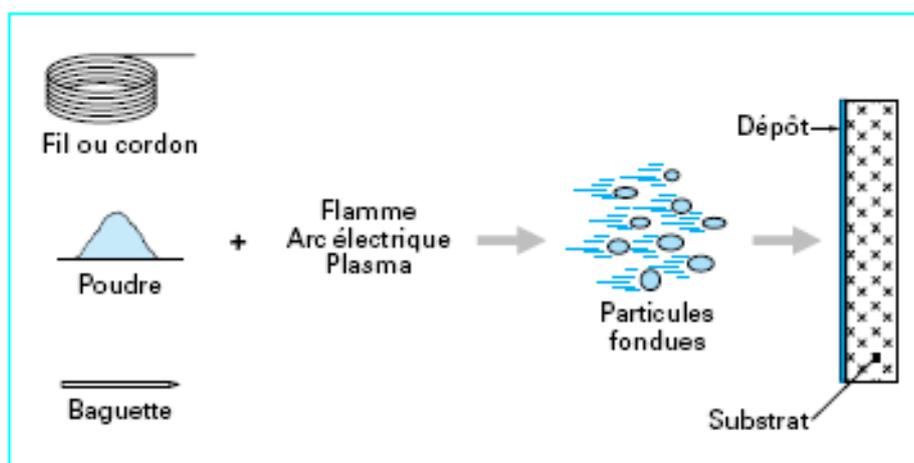


Figure III.1 présente le principe général de la projection thermique. [21]

## III.3 FORMATION ET STRUCTURE DES DEPOTS

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est 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.

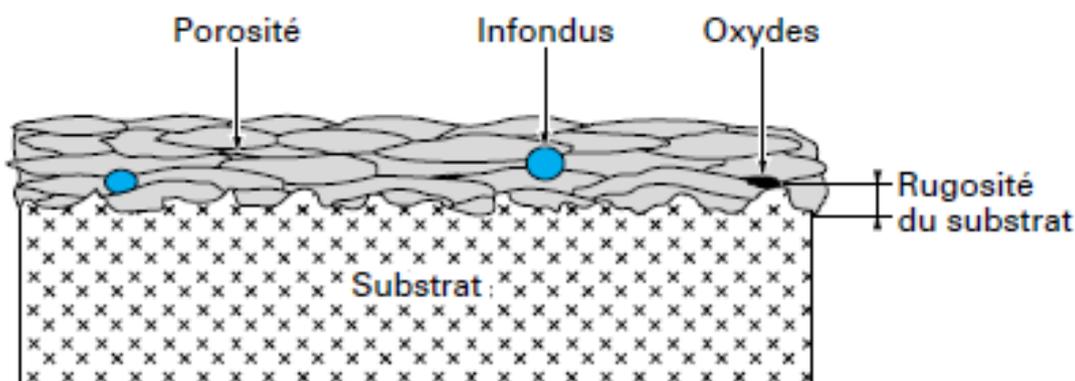


Figure III.2. Disposition des gouttelettes projetées sur le substrat [21].

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. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules in-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). La figure 3 représente la coupe d'un dépôt. (Figure III.3)

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. [28]

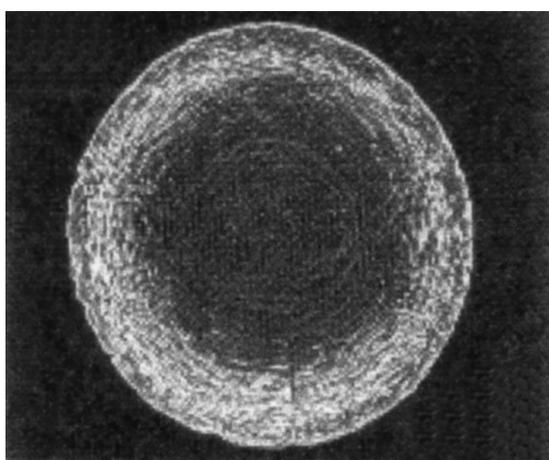


Figure III.3 : Structure en forme de disque

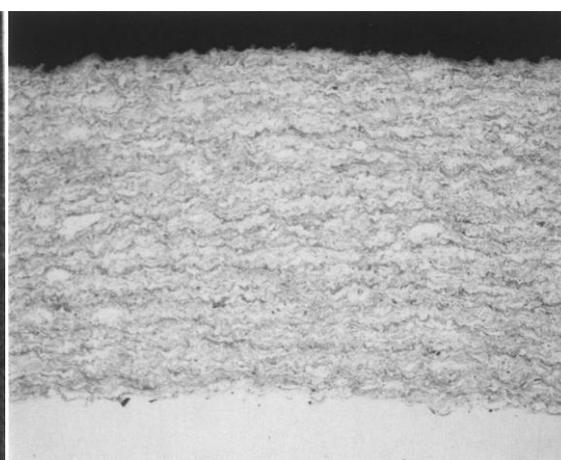


Figure III.4 : Structure stratifiée de type trempé

### III.4 PRESENTATION DES DIFFERENTS PROCEDES

Tous les procédés utilisent le même principe : fondre un matériau d'apport, puis le projeter grâce à un gaz vecteur.

Deux types d'énergie sont utilisés comme source de chaleur :

- la flamme ;
- l'arc électrique.

L'autre caractéristique commune à l'ensemble des procédés est la liaison avec le substrat qui est entièrement mécanique, avec cependant, dans quelques cas particuliers, inter-diffusion entre dépôt et substrat.

#### III.4.1 Projection thermique flamme

##### III.4.1.1 Principe général

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

## III.4.1.2 Projection flamme-poudre

### • Principe

On désigne généralement sous le nom de projection flamme-poudre le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion

### • Pistolets flamme-poudre

Les pistolets flamme-poudre sont de deux types :

- à réservoir de poudre intégré, la poudre tombant par gravité puis étant aspirée par un des gaz de combustion ;
- à réservoir séparé, relié au pistolet par un flexible, la poudre étant véhiculée par un gaz porteur (gaz neutre, air...).

La vitesse des particules projetées est faible (30 m/s) et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm (afin que la poudre ait un temps de séjour suffisamment long pour être fondue).

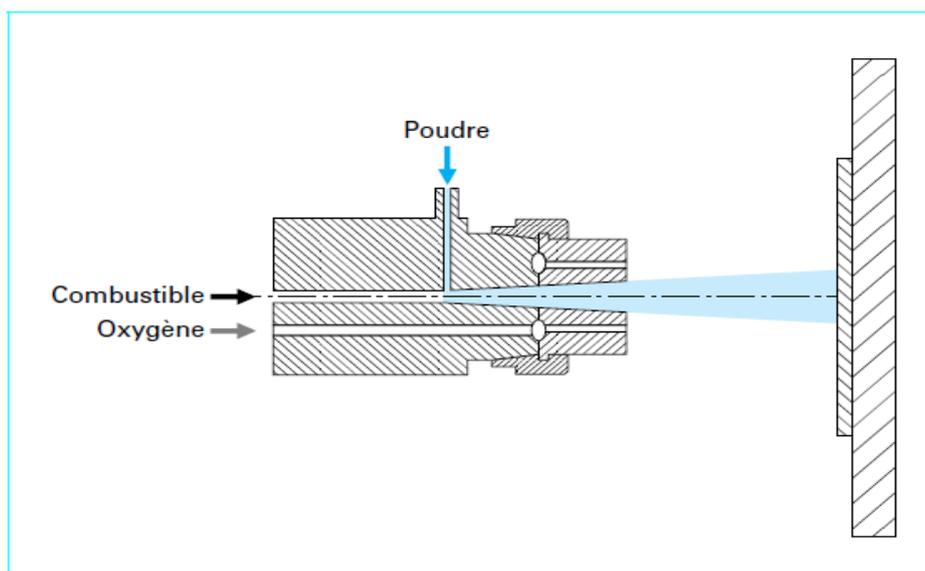


Figure III.5. Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme poudre [21].

## III.4.1.3 Projection flamme-fil

### • Principe

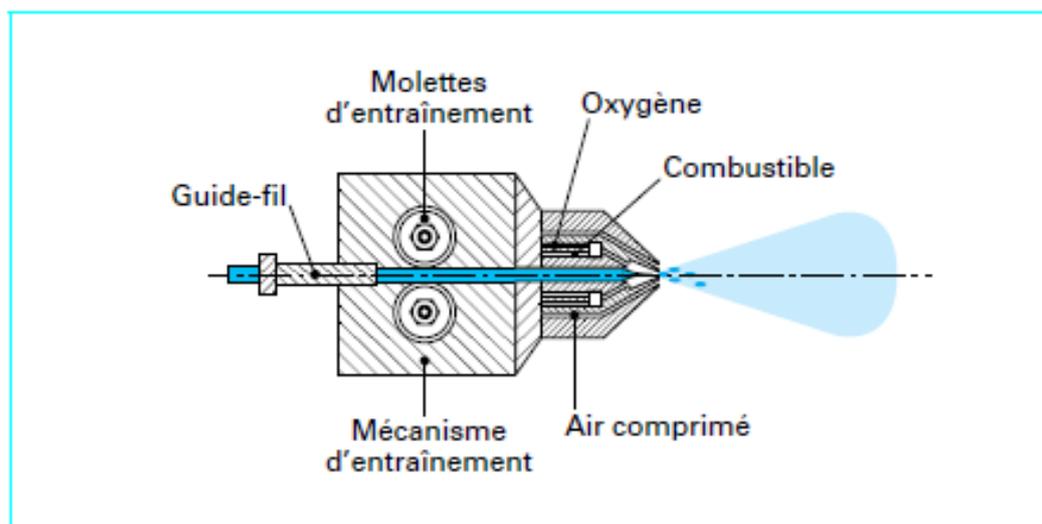
La flamme sert en projection flamme-fil à fondre le métal d'apport, introduit sous forme de fil, de cordon, ou de baguette, en son centre. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé.

## • Pistolets flamme-fil

Les pistolets de projection flamme-fil se composent de deux parties (figure III.6) :

- une partie chalumeau dans laquelle le matériau d'apport est fondu et pulvérisé ;
- une partie entraînement de fil.

La partie chalumeau comprend un mélangeur de gaz, une buse à gaz, une buse à air. Elle est alimentée par les mêmes gaz que ceux utilisés en projection poudre (oxygène + gaz combustible), auxquels s'ajoute l'air comprimé servant à la pulvérisation du matériau d'apport fondu.



**Figure III.6.** Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [21].

La vitesse des particules est d'environ 150 m/s et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres.

Cette technique de projection permet de réaliser les grandes familles de dépôts suivantes :

- métaux : Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo, aciers, aciers inoxydables ;
- alliages de base Zn, Cu, Ni ou Sn ;
- céramiques sous forme de cordon ou de baguette : NiAl , NiCrBSi , Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , ZrO<sub>2</sub>-CaO.

### III.4.1.4 Les gaz de projection

Les deux procédés présentés précédemment utilisent une flamme oxy-combustible comme source de chaleur. Si l'oxygène est généralement utilisé comme comburant de préférence à l'air pour l'obtention de performances thermiques élevées, le choix des combustibles sera dicté par des critères de paramètre de procédé (température de flamme, pression de travail), de coût, de stockage ou de sécurité.

Les principaux gaz combustibles sont l'acétylène, le propylène, des mélanges acétylène éthylène propylène, des mélanges méthyle-acétylène propadiène hydrocarbures ou encore des hydrocarbures tels que le propane. L'ensemble des propriétés des différentes flammes est lié à la structure moléculaire des combustibles utilisés, suivant qu'ils contiennent des triples liaisons de type acétylénique (liaison moléculaire du type C≡C) ou non (liaison du type C-C).

L'acétylène possède des performances thermiques exceptionnelles qui en font le gaz le plus employé en projection flamme-fil. En revanche, son instabilité sous pression élevée ne permet pas son utilisation dans la recherche d'amélioration de performances de pistolets flamme liée à une augmentation des pressions de travail.

## III.4.2 Projection par arc-électrique

### III.4.2.1 Principe générale

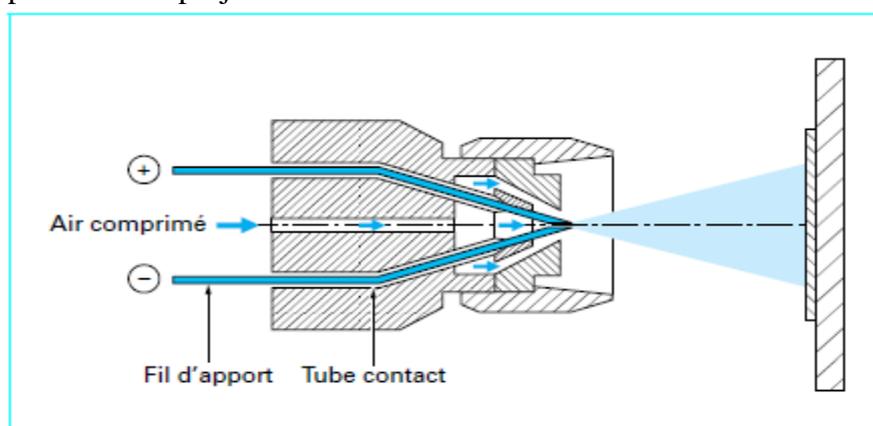
L'énergie calorifique provenant de l'arc électrique et utilisée pour fondre le matériau de revêtement, celui-ci est alors projeté à l'aide d'une pression pneumatique vers la surface à revêtir.

### III.4.2.2 Projection par arc électrique entre deux fils

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et le projetant sur le substrat.

Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu, sous des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités allant de 100 à 500 A. Ils comprennent deux parties (figure III.7) :

- une partie entraînement du fil ;
- une partie fusion/projection du métal fondu.



**Figure III.7.** Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique [21].

Les fils sont conditionnés en bobines ou en fûts et sont tirés, au travers de gaines souples, par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et mues par des moteurs électriques ou par des turbines à air.

À l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes permettant, d'une part, le positionnement du fil avant entré dans la zone de fusion et, d'autre part, la transmission du courant électrique aux fils.

L'application d'un courant électrique sur les fils génère un arc électrique qui permet de les fondre (température d'environ 6 000°C). Les fils fondus sont alors pulvérisés grâce à un jet d'air comprimé et projetés sur le substrat pour former le dépôt.

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

- porosité de 5 à 10 % ;
- épaisseur des dépôts de 0,2 à 3 mm ;
- force d'accrochage : 20 à 40 MPa ;
- taux horaire de dépôt de 5 à 30 kg/h.

Les seuls freins à son utilisation résident dans la nature des matériaux à projeter qui doivent être conducteurs, dans la structure grossière et le taux d'oxydation des dépôts relativement élevé en raison du transport des particules grâce à l'air comprimé (bien que l'utilisation de gaz neutre reste possible, au détriment du coût d'exploitation).

Les matériaux les plus couramment utilisés sont le zinc, l'aluminium, le cuivre, le molybdène, et les aciers. Des matériaux issus de la technologie des fils fourrés, tels que des alliages du type NiCrAl, NiMoAl, ou FeCrCMn, des fils chargés en carbures de chrome ou de tungstène, ou encore des composites AISi chargés graphite, sont aujourd'hui en plein essor. Le procédé de projection par arc électrique connaît donc un développement récent, en regard de ses performances techniques en progression et de son coût d'investissement faible.

### III.4.2.3 Projection plasma soufflé

#### III.4.2.3.1 Plasma

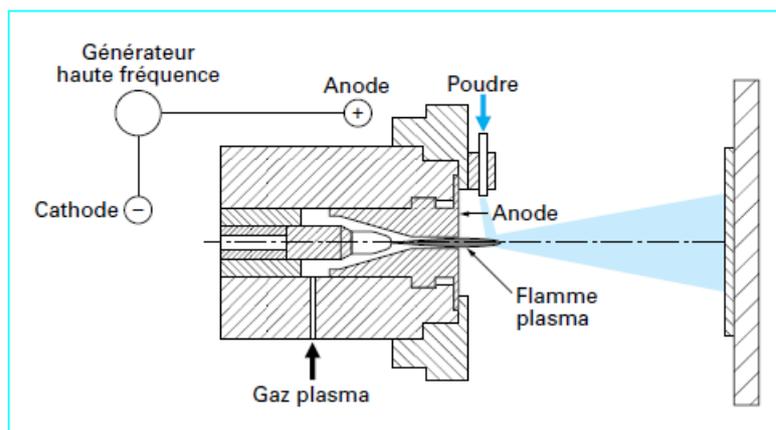
Le plasma est considéré comme le 4<sup>e</sup> état de la matière. C'est un gaz ionisé constitué de molécules, d'atomes, d'ions et d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre. Un plasma Ar/H<sub>2</sub> sera ainsi constitué des espèces suivantes : Ar, H, H<sup>+</sup>, Ar<sup>+</sup>, e<sup>-</sup>.

Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont[29] :

- une source de puissance (générateur à courant continu) ;
- une décharge ionisant le gaz (générateur haute fréquence ou haute tension) ;
- un couplage assurant le contact entre deux électrodes via le gaz plasma.

#### III.4.2.3.2 Procédé de projection plasma soufflé

Le procédé de projection plasma soufflé utilise comme source thermique un arc électrique éclatant entre une cathode et une anode dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général. Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (15 000 à 20 000°C), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz sur le substrat (figure III.8).



**Figure III.8.** Principe de fonctionnement d'un pistolet de projection plasma [21].

Les mélanges gazeux utilisés sont en général formés d'Ar et de H<sub>2</sub>. En effet, l'hydrogène a une conductivité thermique qui devient importante au-delà de 5 000 K. Son apport en complément d'Ar, dans un ratio de volume de 10 à 30 %, permet d'augmenter sensiblement la conductivité thermique du plasma, la température de la flamme et donc la température atteinte par les particules.

### III.4.2.3.3 Matériel de projection plasma

Les installations de projection plasma sont, pour la plupart d'entre elles, entièrement automatisées ou robotisées. Elles comprennent les éléments principaux suivants :

- une torche de projection ;
- une armoire de commande et de régulation ;
- un générateur de courant continu ;
- un distributeur de poudre.

### III.4.2.3.4 Dépôts plasma

La projection plasma présente un compromis chaleur/vitesse très performant et autorise ainsi la réalisation de dépôts de toutes sortes.

L'énergie thermique du procédé permet la fusion de la plupart des matériaux, l'énergie cinétique acquise par les particules étant suffisante pour la construction de dépôts d'adhérence supérieure à 40 MPa et de porosité inférieure à 10 %. Les taux de dépôts varient de 1 à 5 kg/h, avec des rendements de projection compris entre 50 et 90 % suivant les matériaux projetés.

Les matériaux projetables par ce procédé peuvent être répartis en cinq grandes familles:

- les métaux purs (Mo, Ti, Ta, Al, Zn) ;
- les alliages (NiCr, NiAl, NiCrAlY...) ;
- les céramiques (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>) ;
- les carbures (WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>...) ;
- les cermets (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/NiCr, WC/Co, ZrO<sub>2</sub>/NiAl...).

Ils sont utilisés sous forme de poudre de granulométrie comprise 22 et 120 µm.

Les domaines d'application sont très vastes du fait de la diversité des matériaux d'apport et de la flexibilité de la technologie. L'industrie automobile est, avec l'industrie

aéronautique, le domaine industriel où ce procédé est le plus répandu pour traiter des problèmes d'usure, de corrosion, d'oxydation, de barrière thermique ou de frottement.

### **III.4.2.3.5 Projection plasma sous vide en atmosphère et température contrôlées**

Le processus habituel de projection a lieu dans l'air ambiant. Les possibilités de réaction des particules projetées au contact de l'air sont fortement limitées du fait de l'effet protecteur du gaz plasma.

Cependant, lorsque les applications nécessitent des caractéristiques élevées en matière de densité, de pureté ou de résistance à l'oxydation, ce processus doit se dérouler en l'absence de gaz réactifs. La projection s'effectue alors dans une enceinte à basse pression (10<sup>-2</sup> mbar), dans laquelle un balayage préalable à l'aide d'un gaz neutre aura éliminé toute trace d'oxygène. Ce type d'installation, outre l'augmentation de la vitesse et l'absence d'oxydation des particules, permet l'utilisation d'un arc plasma transféré (la pièce jouant le rôle d'anode) servant à décaper la surface à revêtir, et à la préchauffer. L'adhérence des dépôts est ainsi fortement améliorée, pouvant aller jusqu'à la formation d'une couche de diffusion entre dépôt et substrat.

## **III.5 LES MATERIAUX DE PROJECTION**

### **III.5.1 Les grandes familles de matériaux**

Les matériaux d'apport sont caractérisés par :

- leur composition chimique ;
- leur forme (poudre, fil, cordon, baguette...) ;
- leur dimension (granulométrie des poudres, diamètre des fils...) ;
- leur mode d'élaboration.

Ils sont classifiés suivant les normes A81-981 en groupes, chaque alliage étant défini ensuite par un code. La composition chimique, les formes disponibles et les procédés d'utilisation sont précisés pour chacun d'eux.

Le tableau III.1 présente les principaux groupes utilisables en projection thermique ainsi que les procédés usuels.

## ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MULTIMATÉRIAUX

**Tableau III.1.** Combinaison produits d'apport/procédés

Groupe	Dénomination	Flamme	Arc	Plasma
1	Aciers non alliés	X		
2	Aciers alliés	X		
3	Aciers inox martensitiques.	X	X	
4	Aciers inox Austénitiques	X	X	
5	Alliages base Co			
6	Alliages base Co (auto-adhérents)	X		
7	Alliages base Ni :			
	Nickel	X		
	NiCrBSi (A-A)			
	Alliages A-A chargés carbures	X		
	Inconel	X	X	X
	Monel	X	X	
8	Alliages base cuivre	X	X	
9	Zinc	X	X	
	Zn/Al	X	X	
10	Al	X	X	X
	Mo	X	X	X
	Ta			X
	Sn	X		
	Ag	X		X
11	Carbures de W	X		X
	Carbures de Cr			X
	Carbures de Ti			X
	Carbures de B			X
12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X		X
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>	X		X
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	X		X
	ZnO <sub>2</sub>	X		X
13	Aluminure de Nickel	X	X	X
	Ni/Cr/Al	X		X
14	Nitride de Ti			X
15	Borure de Zr ou de Ti			X
16	Siliciure de Mo			X
17	Nickel/Graphite	X		X
	Al/Résine	X		X
18	Etain/Antimoine	X	X	
	Etain/ Plomb	X	X	
19	Alliages « M » CrAlY			X

## III.5.2 Méthodes d'élaboration

Les matériaux d'apport existent sous forme de fil, de cordon ou de poudre. Les fils massifs sont réalisés par tréfilage alors que les fils fourrés sont obtenus par remplissage d'une gaine métallique qui est ensuite formée et tréfilée. Les diamètres usuels vont de 1,6 à 4,75 mm.

Les cordons sont fabriqués à partir de poudres mélangées à un liant organique, extrudées ensuite dans une gaine cellulosique. La gaine et les liants organiques disparaissent lors de la projection et n'influent pas sur la composition des dépôts.

Les poudres peuvent être élaborées suivant différents procédés choisis en fonction de la morphologie spécifique à l'application considérée, des caractéristiques physico-chimiques des matériaux et de critères économiques.

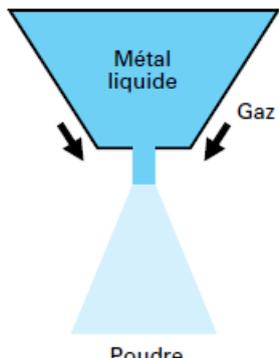
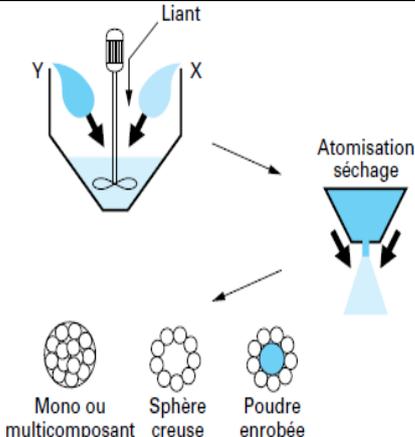
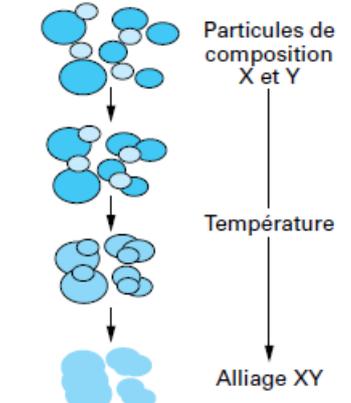
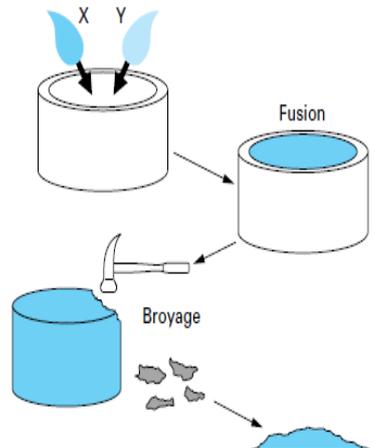
Les principaux procédés d'élaboration sont :

- l'atomisation sous gaz, sous eau ou sous vide ;
- l'agglomération ;
- le frittage ;
- la fusion/broyage.

Les principales techniques d'élaborations des poudres sont motrées dans le Tableau III.2 [21].

# ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MULTIMATÉRIAUX

**Tableau III. 2** les principales caractéristiques des procédés et des poudres correspondantes.

Procédés	Principe	Caractéristiques	Types de poudre
Atomisation		<ul style="list-style-type: none"> <li>Grains sphériques ou arrondis</li> <li>• Bonne coulabilité</li> <li>• Bonne densité</li> <li>• Chaque particule a la composition de l'alliage</li> <li>• Haute pureté</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Métaux</li> <li>- Alliages</li> </ul>
Agglomération		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grains sphériques</li> <li>- Fusion aisée</li> <li>- Faible densité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbures</li> <li>- Céramiques</li> <li>- composites</li> </ul>
Frittage		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grains arrondis</li> <li>- Grains poreux</li> <li>- Bonne aptitude à la fusion</li> <li>- Bonne coulabilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbures</li> <li>- Céramiques</li> </ul>
Fusion/Broyage		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grains irréguliers</li> <li>- Grains difficiles à fondre</li> <li>- Bonne densité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbures</li> </ul>

## III.5.3 Choix des matériaux

*Le choix des matériaux* ne pourra être effectué qu'après étude complète des conditions d'utilisation de la pièce traitée, et notamment :

- de la pièce traitée elle-même (composition chimique, finesse, traitements complémentaires...);
- du milieu environnant (nature, température...);
- de l'antagoniste éventuel (forme, composition chimique...);
- des conditions d'utilisation (vitesses relatives, chocs, pressions...);
- du mode de dégradation (dans le cadre de la réparation);
- etc.

Afin de conférer des *propriétés meilleures* aux dépôts, certains *post-traitements* peuvent être réalisés :

- par colmatage ;
- par imprégnation ;
- par voie mécanique ;
- par traitement thermique.

### - *Colmatage*

Le colmatage est une opération qui, par absorption ou par réaction chimique, permet de boucher les porosités ouvertes des dépôts par formation de composés chimiques. Il peut se dérouler de manière naturelle par réaction au milieu ambiant en formant des sels métalliques, des hydrocarbonates ou des oxydes (par exemple le zinc qui forme des sels à sa surface ou l'aluminium qui forme de l'alumine ou des carbonates d'alumine). Il peut également être provoqué artificiellement par application de liquides tels que l'eau, eau salée ou solutions de soude par exemple.

### - *Imprégnation*

L'imprégnation consiste à déposer, à la brosse, au pinceau ou par pulvérisation, des résines ayant un fort pouvoir pénétrant leur permettant de boucher ainsi les pores des dépôts. Ces résines polymérisent à froid ou à chaud à l'intérieur des dépôts. Un traitement par le vide permet d'en augmenter l'efficacité.

### - *Traitement mécanique*

Un traitement mécanique par projection de billes de verre, d'oxyde ou de métal peut être réalisé sur certains dépôts avec deux objectifs :

- le colmatage du dépôt par bombardement, lui faisant subir une déformation plastique ;
- la relaxation des contraintes résiduelles.

### - *Traitement thermique*

Les traitements thermiques sont souvent utilisés après projection. Ils permettent d'améliorer l'adhérence des dépôts, de modifier la structure métallurgique ou de relaxer les contraintes résiduelles.

## III.5.4 Préparation de la surface

La préparation de surface comprend trois étapes principales :

- **Le nettoyage de la pièce traitée**, nécessaire à l'élimination de toute matière contaminante (graisse, huile, poussières, polymères) réalisée par immersion, par pulvérisation, par ultrasons voire par élévation de température. Les nettoyants peuvent être des solvants ou des lessives.
- **La création de rugosité** en surface de la pièce traitée afin de permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface ainsi créées et d'assurer un bon accrochage mécanique. C'est un facteur prépondérant dans la bonne tenue des dépôts.

Cette création de rugosité peut être effectuée de deux manières :

— par sablage (au corindon ou à la grenaille métallique) permettant un nettoyage complémentaire de la pièce (enlèvement de peintures, d'oxydes...) et l'obtention d'une rugosité de surface comprise entre 6 à 10  $\mu\text{m}$  environ (qualité SA3).

— par tournage avec création d'un profil rainuré de profondeur 0,5 mm environ. Cette méthode est réservée en général aux dépôts les plus épais, le tournage étant suivi d'un sablage complémentaire. Il convient de noter qu'une attention particulière doit être portée aux raccords « partie rechargée/partie non traitée » qui sont généralement réalisés à l'aide de profils chanfreinés ou rayonnés.

- **Le masquage des zones non rechargées**. Les produits les plus courants sont des adhésifs ou des caches métalliques (en général réservés aux pièces de série). Les élastomères souples présentent l'avantage de pouvoir servir à la fois au sablage et à la projection et de permettre un masquage précis.

## III.6 Contrôles des dépôts

Les contrôles des dépôts, hormis les contrôles dimensionnels, sont tous des tests destructifs. Ils peuvent être réalisés sur prélèvement d'échantillons de production ou sur éprouvette témoin, traitée simultanément aux pièces de production.

Les contrôles sont de deux types :

— les contrôles métallurgiques, effectués sur coupes micrographiques (structure des dépôts, porosité, dureté...) ou sur éprouvettes (essais d'adhérence, de pliage...) ;

— les contrôles fonctionnels effectués sur machines de test (frottement, corrosion, résistance à l'usure, tenue aux chocs thermiques...).[5]

# **CHAPITRE IV**

# **THECNIQUES EXPERIMENTALES**

## IV.1 INTRODUCTION

Cette partie présente la procédure d'élaboration des multimatériaux par la technique de la projection thermique à l'arc entre deux fils ainsi que les processus relatifs à la préparation des éprouvettes et des échantillons. On présentera le procédé, l'appareil ainsi que les paramètres de projection thermiques utilisés pour la réalisation des revêtements.

Dans le cadre de notre projet et par ce procédé de protection et de récupérations de pièces, nous avons déposé un acier inoxydable de nom industriel «Thermanit » sur deux alliages différents d'aluminium.

Nous nous intéresserons à la qualité de l'interface entre les antagonistes et en particulier l'adhérence entre le dépôt et le substrat sous sollicitation de traction. Nous procéderons par la suite à une étude comparative du comportement du revêtement dans le cas des deux matériaux utilisés, tout en se basant sur le comportement en traction de ces derniers sans revêtement.

Les travaux expérimentaux inhérents à la technique de projection ont été réalisés à l'entreprise «**ALGERIE METALLISATION**», entreprise privée spécialisée dans la rénovation et la récupération par métallisation des pièces mécaniques usées.

## IV.2 MATÉRIAUX UTILISÉS

Les substrats ont été fournis par l'Unité de Rénovation du Matériel Aéronautique (URMA) situé à Dar El-Beida.

### IV.2.1 Substrats

- **L'alliage AU4G (2017A):** utilisé en aéronautique, il entre dans la construction du fuselage et voilures d'avion. En particulier, pour des pièces soumises à des contraintes, il fait partie de la famille des alliages "Durs".

La composition chimique de ce substrat est la suivante :

ELEMENTS	Cu	Mn	Mg	Si	Al
COMPOSITION	4	0.5	0.7	0.5	Reste

- **L'alliage AG3 (5754A):** moins dur que l'AU4G, mais cela n'empêche pas son utilisation en carrosserie. Cet alliage est mis en forme à l'état recuit, il peut être soudé par tous les procédés connus, ce qui rend la construction et la réparation aisées.

La composition chimique de cet alliage déterminée aussi par le spectromètre D.V.4, donne les résultats suivants (Tableau IV.2) :

ELEMENTS	Mg	Mn	Cr	Al
COMPOSITION	3.1	0.3	0.3	Reste

## IV.2.2 Dépôts

**Sous couche d'accrochage** : pour les matériaux dont l'adhérence est faible, l'utilisation de la sous couche d'accrochage est d'une importance primordiale pour l'amélioration de l'adhérence du dépôt au substrat. Dans notre cas et vu l'importance de celle-ci, nous avons utilisé une sous-couche d'accrochage réalisée par déposition d'un alliage **Ni-Al (75 E)** avec 5% de Al sur une épaisseur d'environ 0,03 mm.

**Matériaux de revêtement** : le revêtement utilisé est la thermanit désignée par 55E, c'est un acier inoxydable réfractaire utilisé comme une barrière thermique et résiste contre l'usure en frottements.

\*Sa composition chimique est présentée dans le tableau suivant :

Eléments	Fe	Cr	Mn	Ni	Al	C	SI	Sn	Cu
Concentration%	66.6	18.5	8.1	5.5	0.132	-	-	-	-

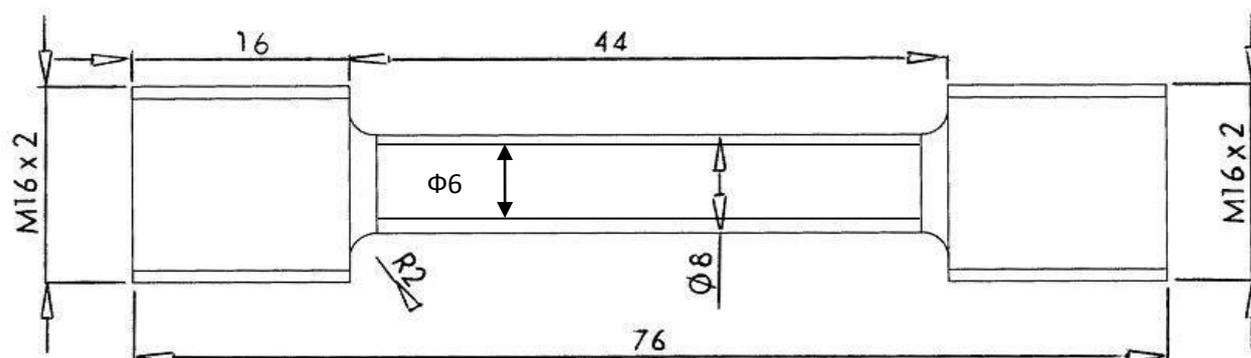
Cette composition correspond à la nuance de l'acier inoxydable **X12 CrMnNi 18-8-5**.

## IV.3 PREPARATION DES ECHANTILLONS

### IV.3.1 Eprouvettes de traction

Une série de huit éprouvettes cylindriques de traction normalisées suivant la norme NF-NOR ont été réalisées, par tournage, pour chaque matériau. L'ensemble de ces séries permet de balayer un large éventail de configuration de matériaux pour prendre compte des comportements possibles pendant les essais.

Les dimensions des éprouvettes utilisées sont montrées dans la Figure suivante :



**Figure IV.1.** Eprouvette d'essais de traction cylindrique normalisée NF-NOR.



**Figure IV.2.** Eprouvette de traction avec méplat.

## IV.3.2. Echantillons de micrographie

Afin de faire une étude métallographique de la face transversale des éprouvettes, nous avons coupé, à l'aide d'une microtrancheuse, des échantillons des éprouvettes avant et après essais de traction, ceci afin de caractériser les évolutions qu'ont subit les revêtements par rapport aux substrats.



**Figure IV.3** Microtrancheuse.

Les échantillons prélevés sont alors enrobés à froid par un mélange de résine en poudre et un liant, ceci afin de faciliter les manipulations et avoir une bonne planéité de surface, surtout lors du polissage mécanique.

Le polissage mécanique est une étape qui consiste à faire passer les échantillons à observer sur des papiers abrasifs de granulométrie décroissante, commençant de P.600 à P.1200, toute en passant par P.800 et P1000.

La finition est faite par la pâte diamantée et on prolonge son action jusqu'à ce que les raies issues du produit précédent disparaissent et apparaît une surface miroir.

Un nettoyage à l'alcool et un séchage par flux d'air chaud terminent le polissage mécanique.

Notons aussi que cette même procédure a été suivie pour préparer les échantillons sur lesquels les mesures de micro-dureté ont été effectuées.

La projection a été réalisée sous les mêmes conditions suivant les mêmes étapes pour chacune des éprouvettes, ceci afin de pouvoir varier la vitesse de déformation lors de l'essai de traction, et pouvoir comparer entre les éprouvettes du même matériau et des matériaux différents.

## IV.3.3 Préparation des surfaces

**Sablage :** Parmi les différentes méthodes de rugosification, nous avons opté pour le grenailage qui consiste à cribler la surface par un jet de particules métalliques de 0.4 mm (400  $\mu\text{m}$ ) permettant d'obtenir une surface prête à recevoir le dépôt et assurer une bonne adhérence du point de vue mécanique. La pression du jet de la grenaille utilisée est égale à 7 bars. Les particules de projection vont ainsi pénétrer les interstices de la surface rugueuse et pour ainsi dire s'agrippent à ses aspérités.

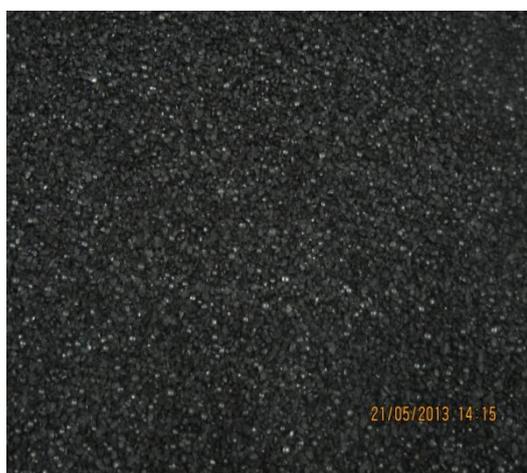


Figure IV.4. Grenaille



figure IV.5. Chambre de grenailage

## IV.4. LA PROJECTION

### IV.4.1 Paramètres de projection

Pour que la couche projetée s'amalgame le mieux possible avec le métal de base, il faut respecter les paramètres de projection préconisés par le constructeur, résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Les paramètres de projection.	
Pression d'air dans le moteur	3.8 bars
Pression d'air dans la buse de projection	3 bars
Vitesse d'avance du fil métallique	0.064 m/s
Tension de générateur	30 V
Intensité de courant	100 A
Distance de projection	140 mm
Angle de tir	90 °
Vitesse de rotation de la cible	16 trs/min

## IV.4.2 Pistolet de projection

C'est un appareil portatif qui présente une souplesse de manipulation tant mécanique que manuelle des plus remarquables suite à une conception et un développement appropriés.

Cet appareil nommé THRMO-SPRAY 234 utilise l'arc électrique comme source d'énergie, c'est un pistolet à deux fils comme le montre la figure IV.6.



**Figure IV.6** : Pistolet de projection à arc entre deux fils « ARC SPRAY 234».

Nous avons commencé par appliquer une sous couche d'accrochage en Ni-Al, d'une épaisseur de 0.3 mm soit 300  $\mu\text{m}$ , puis nous avons appliqué la couche de métallisation en Thermanite estimée à 0.8 mm soit 800  $\mu\text{m}$ .

## IV.4.3 Principe de fonctionnement

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet d'air comprimé pulvérise le métal fondu et le projette sur le substrat. (Figure IV.7)



**Figure IV.7 :** Fonctionnement du pistolet à arc électrique.

### IV.6. PROCÉDURE ET TECHNIQUES D'ANALYSES

#### IV.6.1 Essai de traction

Les pièces revêtues par projection thermique étant amenées à travailler sous diverses sollicitations mécaniques, il est donc indispensable d'avoir des prévisions sur le comportement mécanique des revêtements par rapport aux substrats sous l'action de ses contraintes.

L'essai de traction donne un bon nombre de caractéristiques mécaniques ( $R_p$  ;  $E$  ;  $A\%$ ..) des matériaux, ce qui nous permettra d'avoir une bonne idée sur le comportement mécanique des matériaux utilisés sous sollicitation de traction.

Les essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes en AU4G/NiAl/Thermanit (fig IV.8). La machine utilisée est une machine de traction INSTRON de type MAB SKF UE40 de capacité de 400 kN piloté par PC (figure IV.8).



**Figure IV.8:** Machine de traction utilisée.

## IV.6.2 Observation métallographique

Afin de révéler la structure des couches projetées et de mettre en évidence les éventuelles transformations ou inter-diffusion possible au niveau de l'interface, l'étape de l'observation métallographique est indispensable. Cette analyse, nous permettra également de comprendre les phénomènes qui sont à la base du comportement mécanique à l'échelle microscopique.

Cette opération est réalisée à l'aide d'un microscope métallographique optique **OLYMPUS BX51M** en lumière directe.

## IV.6.3. Étude de la microdureté

La détermination de la micro-dureté a pour but de caractériser les couches de faibles épaisseurs et mêmes les composants structuraux des alliages, ceci pourra notamment expliquer plusieurs phénomènes d'ordre mécanique pouvant intervenir lors de l'étude du comportement mécanique.

La machine d'essai est constituée d'un dispositif pour l'enfoncement d'une pyramide en diamant sous une faible charge et un microscope métallographique. Par la mesure des deux diagonales de l'empreinte laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge, on peut avoir les valeurs de la micro-dureté directement à partir d'un tableau (chaque micro-duromètre a un tableau de valeurs de micro-dureté propre à lui).



**Figure IV.9:** Microduromètre utilisé.

Dans notre étude, on a appliqué une charge de 100 à 300 grammes sur la surface perpendiculaire au substrat et au revêtement pendant 10 secondes. Le micro-duromètre utilisé est de type Shimadzo MM1006.(figure V.9)

**CHAPITRE V**  
**RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS**

## V.1 INTRODUCTION

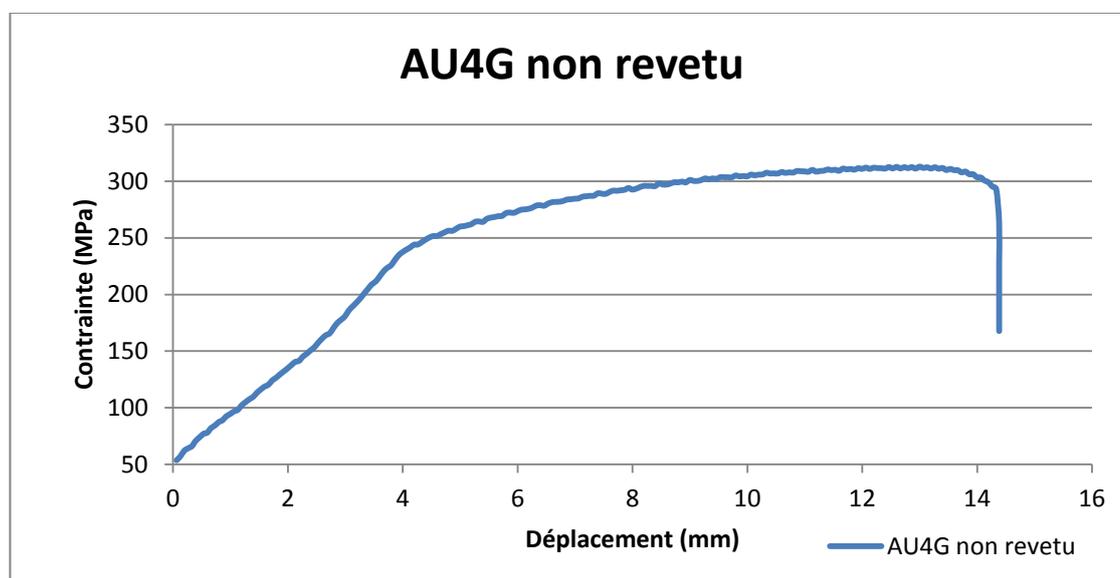
Dans ce chapitre, nous allons présenter et tenter d'expliquer les résultats des différents essais effectués au cours de notre étude. Notre analyse du comportement mécanique en traction est basée sur la comparaison des résultats obtenus, complétés par ceux de la microdureté et par l'observation métallographique.

## V.2 RESULTATS DES ESSAIS DE TRACTION

### V.2.1 Traction du Multimatéériau AU4G/NiAl/Thermanite

Afin de bien cerner le comportement mécanique du revêtement appliqué, il était nécessaire de se baser sur la courbe de traction du matériau de base (substrat) et de comparer par la suite les courbes obtenues.

#### V.2.1.1 Graphe de traction de l'AU4G :



**Figure V.1** Courbe de traction  $\sigma = F(A)$  de l'AU4G non revêtu.

On remarque que l'allure de cette courbe présente, comme les courbes conventionnelles de traction, trois principaux stades :

- Stade élastique, qui est la partie où le matériau a un comportement élastique vis-à-vis de la charge appliquée, la déformation est ainsi réversible, cette partie est caractérisée par le module d'élasticité ( $E=44,62 \text{ MPa /mm}^2$ ) ou module de Young. On rappelle que cette propriété se calcule par la pente de la courbe dans ce stade dont la fin est caractérisée par la limite élastique ( $Re=201 \text{ MPa}$ ). Après cette charge, le matériau commence à prendre des déformations irréversibles.
- Stade élastoplastique qui représente la transition entre le stade élastique et le stade plastique, dans cette partie le matériau a un comportement adaptatif avec la charge

## ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MULTIMATÉRIAUX

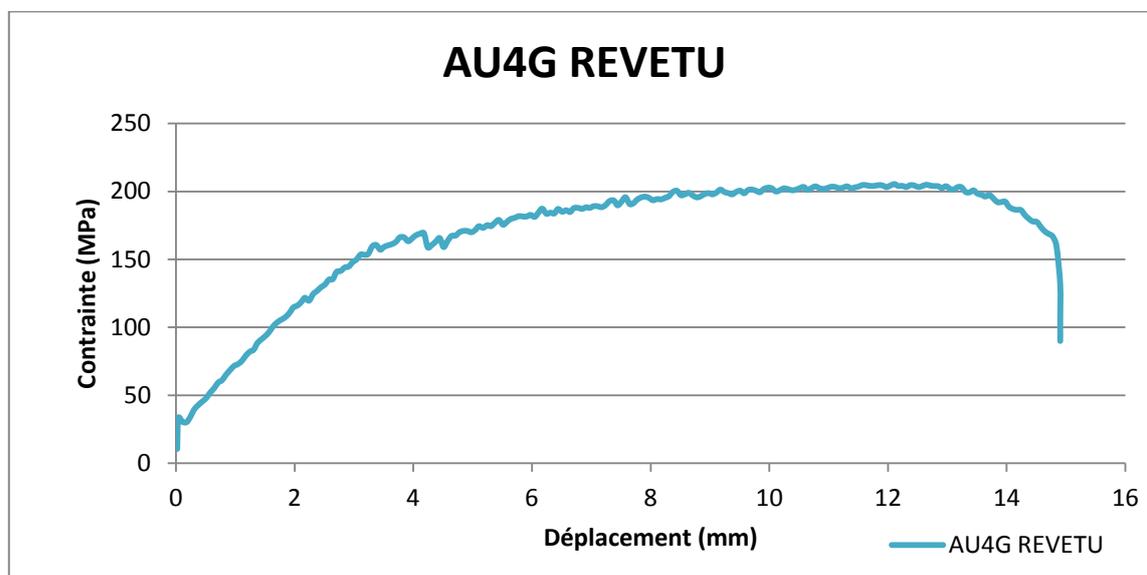
appliquée. Ce stade est principalement caractérisé par l'érouissage du matériau (adaptation plastique).

- Stade final (rupture) : il est caractérisé par la formation de la zone de striction jusqu'à la rupture brutale de l'éprouvette à la charge  $R_p = 262$  MPa. On peut également prélever par la méthode des tangentes le coefficient de striction  $Z\% = 67,6\%$  (fig V.2).



**Figure V.2** comparaison des éprouvettes avant et après rupture.

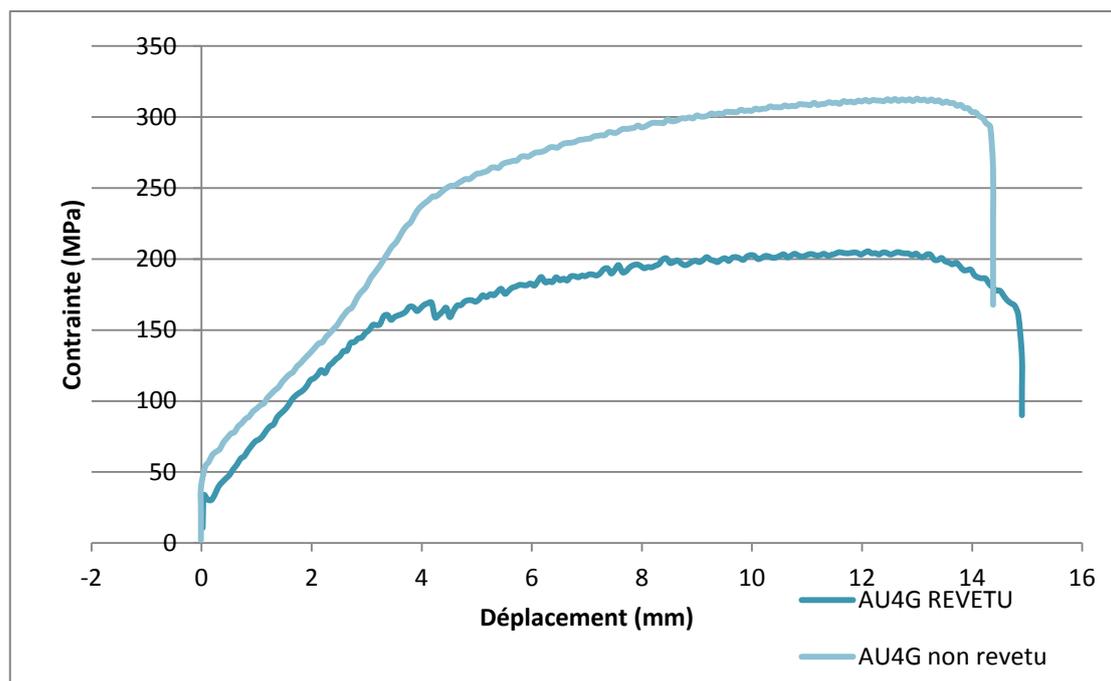
### V.2.1.2 Graphe de traction de l'AU4G revêtu :



**Figure V.3** Courbe de traction de l'AU4G revêtu.

La courbe relative à la traction de l'AU4G revêtu (Fig V.2) présente une allure très ressemblante aux courbes de traction conventionnelles, elle est caractérisée par les 3 stades de réaction du matériau sous chargement. Néanmoins, on remarque après la limite élastique ( $R_e$ ), une fluctuation de la courbe tout au long de la partie plastique jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

## V.2.1.3 Comparaison des deux courbes de l'AU4G revêtu et nu :



**Figure V.4** Comparaison des deux courbes de tractions.

En comparant les deux courbes de traction, on constate plusieurs changements en ce qui concerne les propriétés mécaniques, en particulier:

- Pour l'AU4G sans revêtement, la limite élastique a diminué de  $Re = 201$  MPa à  $Re = 165$  MPa.
- La contrainte de la rupture, diminue de  $Rp = 262$  MPa dans l'AU4G non revêtu à  $Rp = 206$  MPa pour l'AU4G revêtu.
- L'allongement  $A\%$  est resté constant.
- Dans le cas de l'AU4G revêtu, on note l'apparition de fluctuations dans le stade de la déformation plastique.

## V.2.2 Interprétations

- La fluctuation que présente la courbe de la figure V.3 est due à l'apparition d'une fissure au niveau du revêtement sous la charge de  $\sigma = 165$  MPa.
- Les fluctuations se trouvant dans la zone plastique de la courbe de l'AU4G sont moins intenses que celles présentées à 165 MPa, et sont dues à leurs tours à l'amorçage de microfissures toujours au niveau du revêtement (fig V.4).
- La diminution de la résistance à la rupture dans le substrat revêtu, par rapport au substrat nu est principalement due à la concentration des contraintes au niveau des cavités créées par sablage.



Figure V.5 amorçage de fissures lors de l'essai.

## V.2.3 Traction du Multimatéériau AG3/NiAl/Thermanite

### V.2.3.1 Graphe de traction de l'AG3

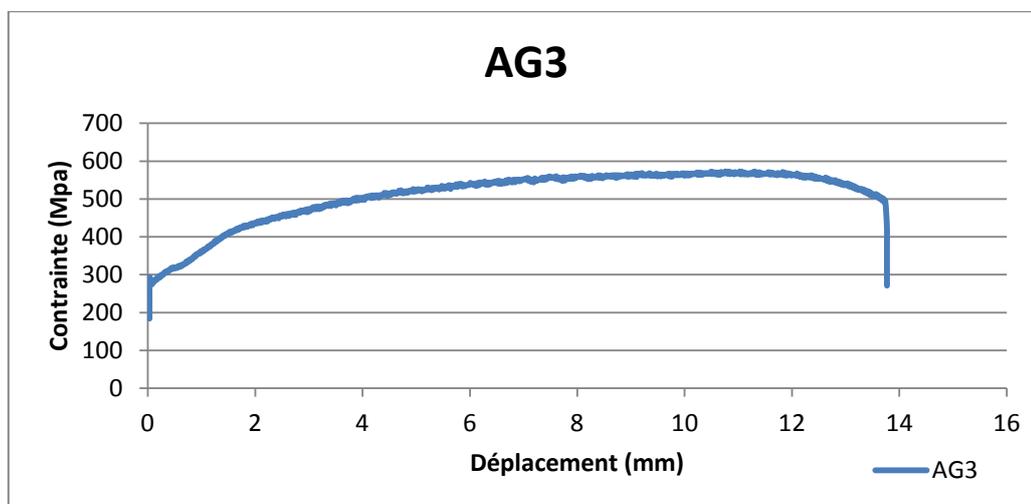


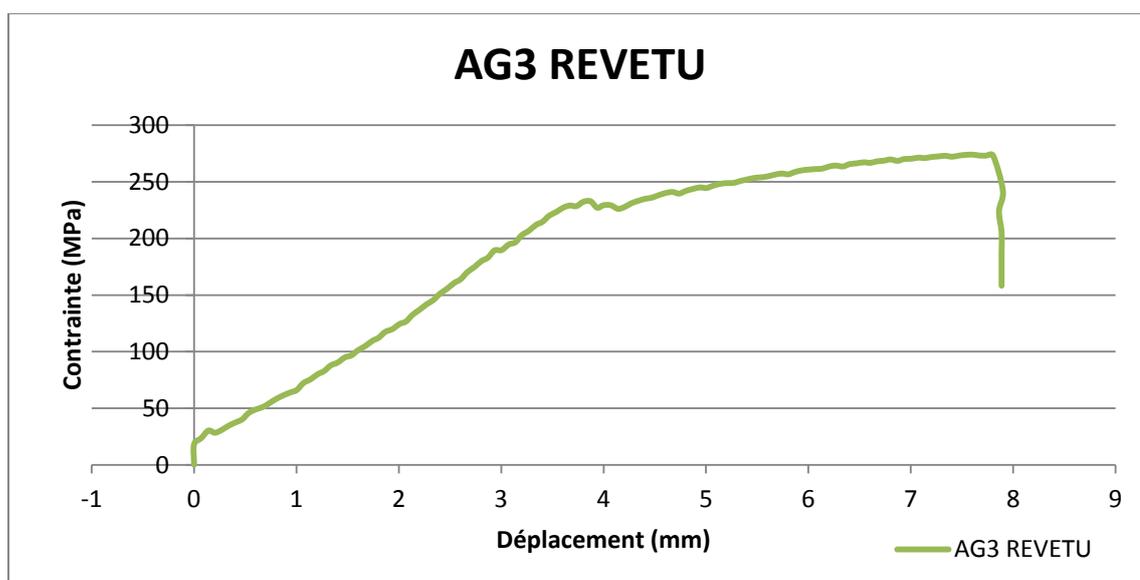
Figure V.6 Courbe de traction de l'AG3.

On constate que l'allure de cette courbe présente, comme les courbes conventionnelles de traction, trois principaux stades :

- Stade élastique correspondant à la partie où le matériau a un comportement élastique vis-à-vis de la charge appliquée, la déformation est ainsi réversible et la valeur du module élasticité  $E=58,4 \text{ MPa/mm}^2$  (module de Young). Propriété calculée par la pente de la de la courbe. La fin de ce stade et caractérisée par la limite élastique ( $Re=292 \text{ MPa}$ ) et après cette charge, le matériau commence à prendre des déformations irréversibles.

- Stade élastoplastique qui est représenté la transition entre le stade élastique et le stade plastique, dans cette partie le matériau a un comportement adaptatif avec la charge appliquée. Ce stade est principalement caractérisé par l'écroutissement du matériau (adaptation plastique).
- Stade final (rupture) : il est caractérisé par la formation de la zone de striction jusqu'à la rupture brutale de l'éprouvette à la charge  $R_p = 350$  MPa. On peut également prélever par la méthode des tangentes le coefficient de striction  $Z\% = 76,4\%$ .

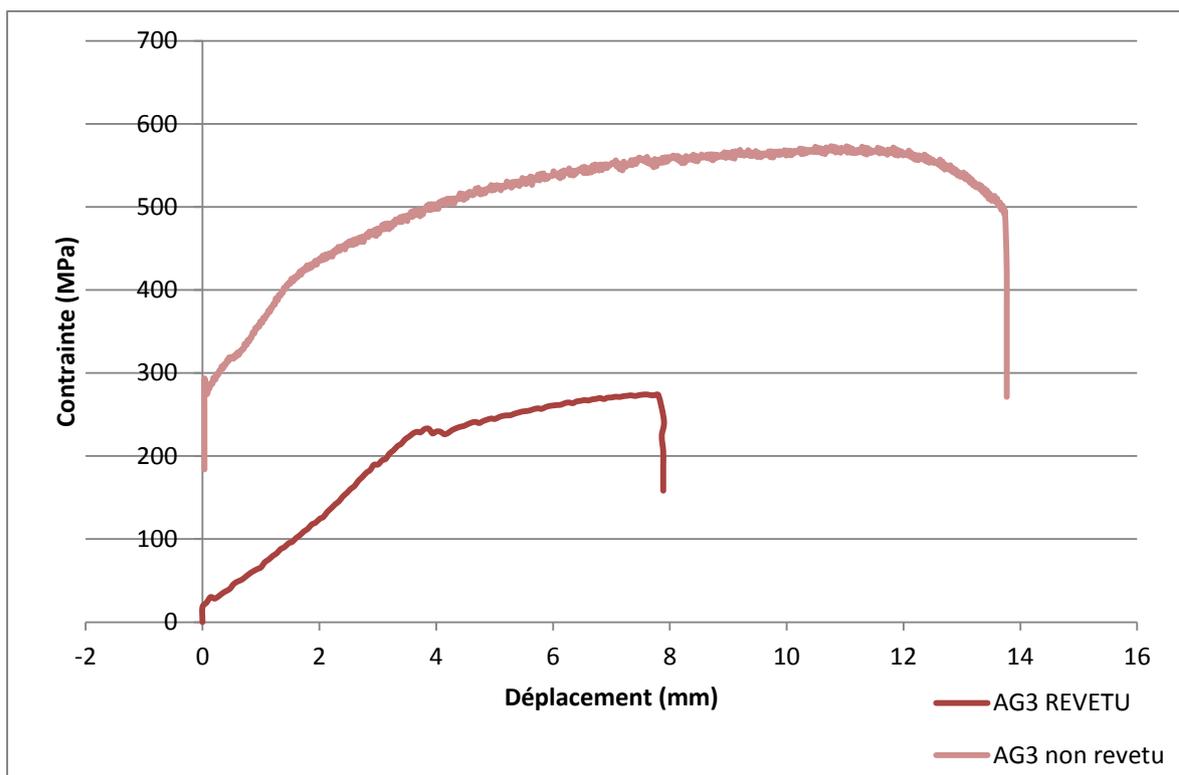
### V.2.3.2 Graphe de traction de l'AG3 revêtu :



**Figure V.7** Courbe de traction de l'AG3 revêtu.

La courbe de la Figure V.7 présente une allure très ressemblante à la courbe de traction de l'AG3 nu (Fig. V.6). Elle est caractérisée par les 3 stades de réaction du matériau sous chargement, sauf que dans ce cas aussi on remarque, après la limite élastique ( $R_e$ ), une fluctuation de la courbe sur le long de la partie plastique et ce jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

## V.2.3.3 Comparaison des courbes de traction de l'AG3 nu et revêtu



**Figure V.8** Comparaison des deux courbes de traction.

Plusieurs caractéristiques de l'AG3 ont connu un changement après application du dépôt, ces changements sont les suivants :

- La limite élastique a diminué de  $Re = 292$  MPa pour l'AG3 sans revêtement à  $Re = 217$  MPa.
- La diminution de la contrainte de la rupture, elle passe de  $Rp = 350$  MPa dans l'AG3 non revêtu à  $Rp = 327$  MPa pour l'AG3 revêtu.
- Une diminution de l'allongement A%.
- Des fluctuations sont apparues juste après la limite élastique  $Re$  dans le cas de l'alliage AG3 revêtu.

## V.2.4 Interprétation :

- Les fluctuations observées sur la courbe de la figure V.7.a sont principalement dues à la fissuration du revêtement sous la charge de  $\sigma = 217$  MPa.
- Les fluctuations observées dans la zone plastique de la courbe de la figure V.7, sont à leur tour dues à l'amorçage de micro-fissures au niveau du revêtement.
- La diminution de la résistance à la rupture est principalement due à la concentration de contraintes au niveau des cavités créées par le sablage pour l'ancrage mécanique dans le cas de l'AG3 revêtu.

## V.2.5 Comparaison des courbes de traction des Multimatériaux AG3/NiAl/Thermanite et AU4G/NiAl/Thermanite :

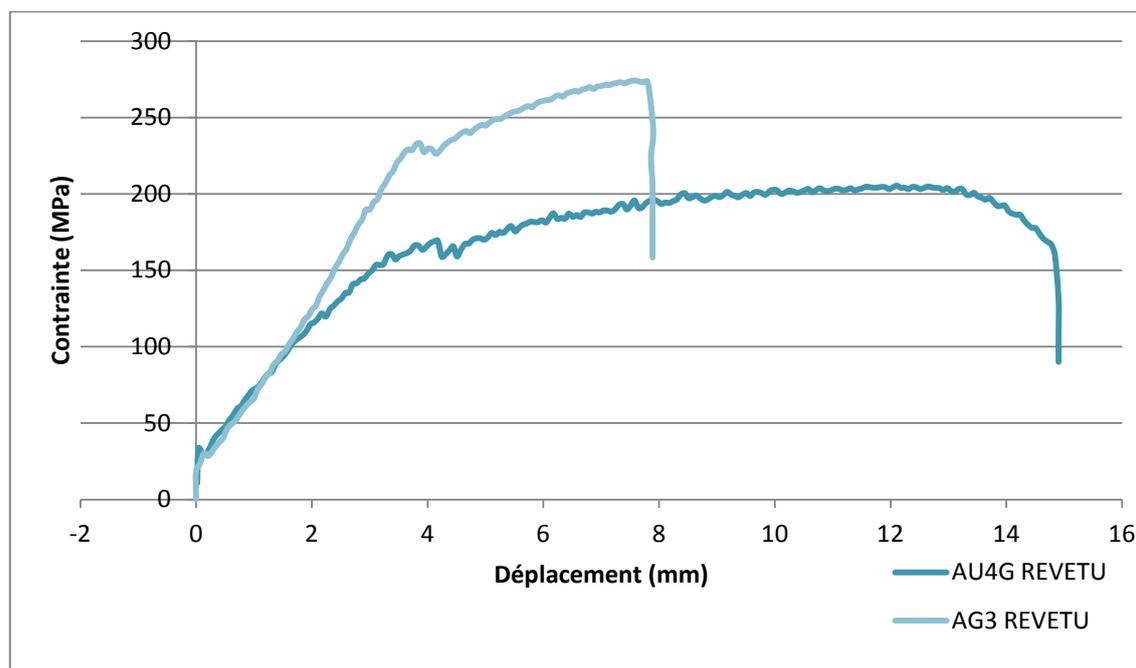


Figure V.9 Comparaison des deux Multimatériaux.

En comparant les deux courbes des matériaux revêtus, nous avons remarqué que :

- Les deux matériaux de base (AU4G/AG3) ont connu une baisse de leurs propriétés mécaniques après revêtement.
- Les deux matériaux subissent une fluctuation dans la zone plastique.
- L'AG3 a subi une plus grande diminution de sa limite élastique ( $\Delta Re=75\text{MPa}$ ) par rapport à celle qu'a subi l'AU4G ( $\Delta Re= 66 \text{ MPa}$ ).
- L'AU4G a subi une plus grande diminution de sa résistance à la rupture ( $\Delta Rp= 55\text{MPa}$ ) par rapport à celle qu'a subi l'AG3 ( $\Delta Rp=23\text{MPa}$ ).

## V.2.6 Interprétations

- La grande diminution de la limite élastique de l'AG3 revêtu par rapport à l'AU4G revêtu est due à la ductilité élevée de l'AG3 par rapport à l'AU4G, ce qui provoque lors du processus de sablage, une grande pénétration des particules de grenailles dans le substrat créant des zones plastiques. Ce qui exerce une compression radiale sur la section et accélère le processus de plastification.
- La diminution de la résistance à la rupture de l'AU4G par rapport à celle de l'AG3 est due probablement à deux facteurs :
  1. La diminution de la section moyenne du substrat après sablage et la concentration des contraintes au niveau des cavités.
  2. Les contraintes résiduelles de compression créées lors du sablage augmentent de l'écrasement de ce matériau et le rendent plus fragile.

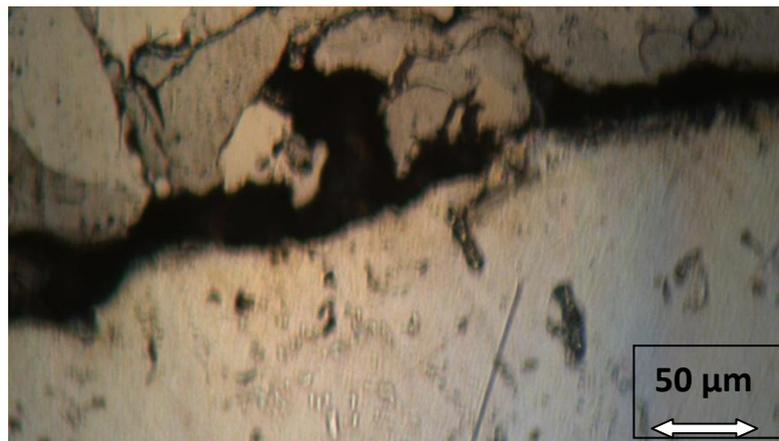
## V.3 CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE DES DEUX MULTIMATERIAUX ELABORES

### V.3.1 Analyse micrographique des multimatériaux

#### AG3/NiAl/Thermanite et AU4G/NiAl/Thermanite avant traction



**Figure V.10** Micrographie de l'AG3/NiAl/Thermanite avant sollicitation mécanique.



**Figure V.11** Micrographie de l'AU4G/NiAl/Thermanite avant sollicitation mécanique.

L'analyse micrographique concernant les deux composites avant la sollicitation en traction se résume comme suit:

- Les couches de dépôt ont bien épousés la forme de la surface du substrat.
- La frontière substrat/dépôt est bien tracée et très claire.
- L'existence de plusieurs phases dans le revêtement.
- Aucun changement structural n'est apparu aux interfaces de l'AG3 ou l'AU4G respectivement.
- Les oxydes de projection dans le cas de l'AU4G sont plus importants que pour l'AG3.

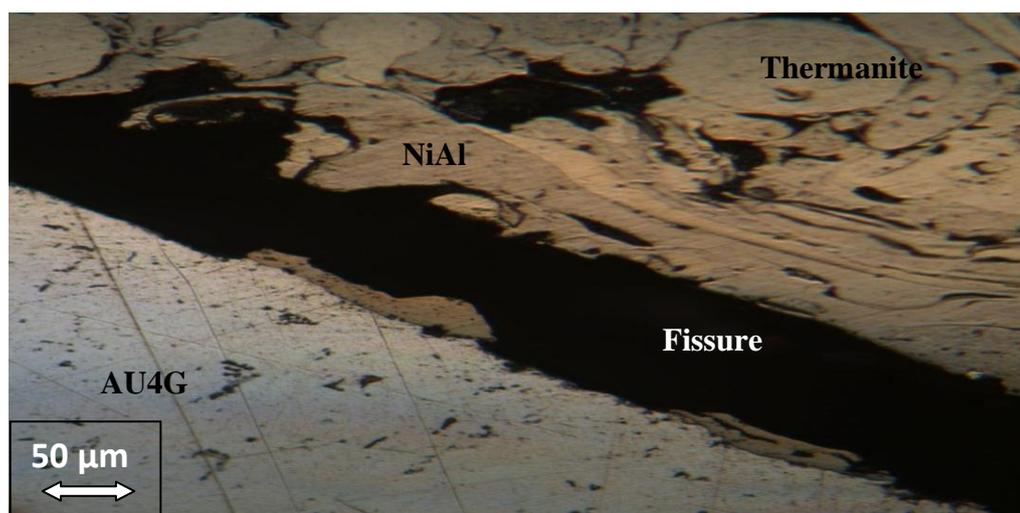
## V.3.2 Interprétations

- Le dépôt a bien pris la forme de la surface grenillée, ceci revient à la grande énergie cinétique avec laquelle les particules du métal fondu ou pâteux (Thermanite) ont été projetées. L'impact de ces particules sur le substrat permet une bonne pénétration de celles-ci dans les cavités créées par sablage.
- La clarté de la frontière substrat/dépôt et l'absence de changement structural non apparente à l'interface de l'AG3/AU4G sont la preuve qu'il n'y a pas eu transport de matières (diffusion) entre les deux matériaux, ceci s'explique par deux points :
  1. L'existence d'une couche d'oxyde d'aluminium (alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sur la surface de l'alliage qui revient à l'absence de traitement de décapage préalable à la projection.
  2. L'absence d'un préchauffage des éprouvettes qui aurait favorisé le phénomène de diffusion.
- La couche d'oxyde sur l'AU4G est plus importante que sur l'AG3, en raison de la composition des alliages : le composé  $\text{AlMg}_3$  est très important et empêche la création de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ce qui n'est pas le cas pour l'alliage AU4G.

## V.3.3 Micrographie des multimatériaux AG3/NiAl/Thermanite AU4G/NiAl/Thermanite après essais mécaniques



**Figure V.12** Micrographie de l'AG3/NiAl/Thermanite après sollicitation mécanique.



**Figure V.13** Micrographie de l'AU4G/NiAl/Thermanite après sollicitation.

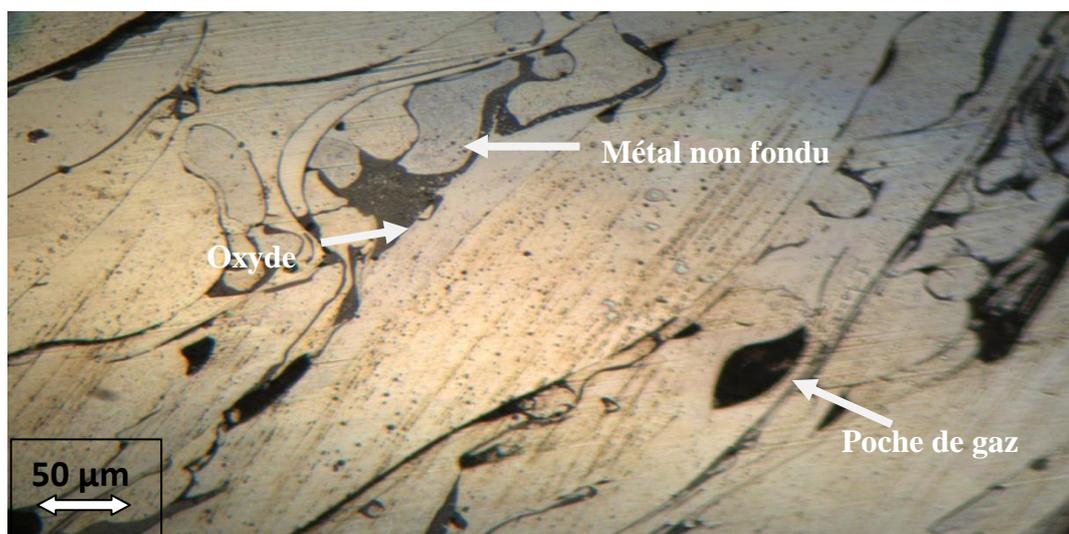
Les figures V.10 et V.11 montrent une rupture tout au long de l'interface.

### V.3.4 interprétations

L'apparition des fissures au niveau de l'interface revient principalement à :

- la présence de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) qui joue le rôle de barrière de diffusion entre le substrat et le dépôt et l'adhérence mécanique reste le seul phénomène et moyen favorable à l'accrochage entre le substrat et le revêtement.
- La striction, qui est l'étranglement de l'éprouvette sous sollicitation de traction, est le principal phénomène d'amorçage des fissures, surtout que le revêtement, sous les conditions de projection utilisées subit un grand effet de trempe, ce qui le rend dur et non apte à suivre les déformations que subit l'éprouvette.

### V.3.5 Micrographie du dépôt



**Figure V.14** Micrographie de la Thermanite projetée.

La figure V.12 montre la microstructure du dépôt (Thermanite projetée) avec les remarques suivantes:

- Une structure stratifiée.
- La présence de beaucoup de zone d'oxydes, de poches de gaz et de métal non fondu.

## V.3.6 Interprétations

Le résultat obtenu concorde parfaitement les prévisions théoriques, la structure stratifiée et due à l'application du revêtement couche par couche. Les pores sont dues à l'existence de poches d'air enfermées lors de la solidification rapide du métal fondu et les oxydes quant à eux sont dus au fait que le métal fondu pulvérisé dans l'air réagit avec l'oxygène et donne naissance aux oxydes présents.

## V.4 ETUDE DE LA MICRODURETE

### V.4.1 Microdureté de l'AG3/NiAl/Thermanite

On a utilisé une charge de 100 gr, les résultats obtenus sont relevés dans le tableau V.1

**Tableau V.1** Résultats de la microdureté du composite AU4G/NiAl/Thermanite.

	Microdureté	Moyenne des microduretés
Substrat	74.7	72.7
	70.7	
Substrat proche du revêtement	74.4	75.2
	76.4	
	74.9	
revêtement	321.7	285.23
	337.2	
	197.3	

Ainsi, nous remarquons que :

- Les valeurs de microduretés dans le substrat et dans le substrat près du revêtement ce sont du même ordre.
- Les valeurs de microduretés dans le revêtement montrent une très grande variation d'une zone à une autre.
- La dureté du revêtement est bien plus importante que la dureté dans le substrat.

## V.4.2 interprétations

La variation de la microdureté dans le revêtement est due à sa très grande hétérogénéité. Les zones d'oxydes, le métal et les porosités sont les principales causes de cette variation.

## V.4.3 Etude de la microdureté de l'AU4G/NiAl/Thermanite

On a utilisé une charge de 100 gr et les résultats obtenus figurent dans le tableau V.2

**Tableau V.2** Résultat de la microdureté du composite AU4G/NiAl/Thermanite

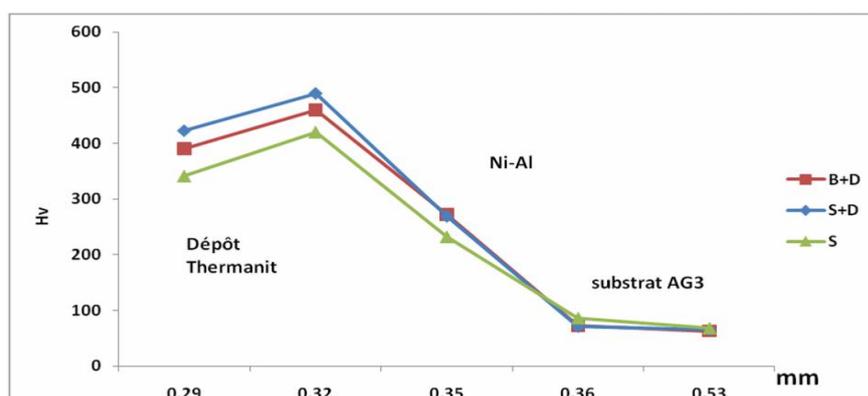
	Microdureté	Moyenne des microdurtés
Substrat	133.8	131.9
	130.1	
Substrat proche du revêtement	127.5	127
	126.5	
revêtement	298.2	292.7
	297.9	
	282.0	

Nous remarquons du tableau V.2 que :

- Les valeurs de microduretés dans le substrat et dans le substrat près du revêtement ce sont du même ordre.
- Les valeurs de microduretés dans le revêtement montrent une très grande variation d'une zone à une autre.
- La dureté du revêtement est bien plus importante que la dureté dans le substrat.

## V.4.4 Interprétations

Encore une fois, les variations de la microdureté dans le revêtement sont dues à sa forte hétérogénéité structurale. La sous couche d'accrochage est aussi impliquée dans cette variation de valeurs. Les duretés du substrat et de la zone proche du revêtement sont similaires, ceci prouve qu'il n'y a pas eu de transformations de phase dans cette zone.



**V.15** Graphe des résultats de la Microdureté en fonction de la distance de l'empreinte.

## VI CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La projection thermique, de nos jours, connaît une large expansion par le développement des procédés qu'elle connaît, utilisée auparavant pour la rénovation des pièces usées, et la réhabilitation des surfaces, elle est maintenant utilisée dans les domaines de technologie de pointe comme l'aéronautique ; le nucléaire ; notamment l'aérospatiale.

L'étude que nous avons faite porte sur une technique de projection thermique classique, utilisée principalement pour la rénovation des pièces usées, cette technique doit être accompagnée de conditions rigoureuses afin d'arriver aux résultats souhaités.

Les essais effectués nous permettent de prévoir le comportement mécanique des multimatériaux utilisés, ce comportement est bien sûr lié aux conditions de préparation de ces derniers. Les essais de traction ont montré de grands changements de caractéristiques mécaniques des alliages de base après revêtement, ces changements sont liés éventuellement à la nature très différente des matériaux assemblés et aux conditions d'applications, mais plusieurs points sont encore à reprendre, surtout en ce qui concerne l'adhérence des revêtements.

Lors des essais de traction, et lorsqu'on compare entre l'AU4G et l'AG3 revêtu, on trouve que l'AG3 est beaucoup plus influencé par la projection que l'AU4G, ce qui revient à sa ductilité et sa soumission aux lois de comportement du revêtement, une analyse métallographique comparative entre les structures des deux matériaux avant et après projection peut très bien expliquer les phénomènes observés, ce qui peut être effectué lors des prochains travaux.

Les principaux points à retenir de cette étude sont :

- ✓ Un traitement de décapage par zinc ou nickel est nécessaire sur les pièces à projeter en alliages d'aluminium, ce qui afin d'éliminer d'éventuelles couches de graisses et d'impuretés et surtout afin d'éliminer la couche d'alumine ( $Al_2O_3$ ), qui se trouve être à l'origine de plusieurs problèmes concernant l'adhérence du revêtement, ceci car l'alumine joue le rôle de barrière de diffusion ce qui amoindrit fortement l'adhérence.
- ✓ Un traitement de préchauffage (300-400°C) est nécessaire afin d'augmenter le pouvoir de diffusion, ce traitement va notamment diminuer de l'effet de tremp que subit le métal projeté, qui se trouve en effet, à l'origine des problèmes de dureté excessive du revêtement en raison des contraintes thermique et structurale qui s'y introduisent.
- ✓ Un traitement thermique après projection est quant à lui au choix, celui-ci dépendra de la qualité du revêtement recherché, il contribuera à diminuer de l'hétérogénéité du dépôt, les porosités quant à eux nécessitent d'autres traitements mécaniques, le colmatage ou encore l'imprégnation.

## REFERANCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Ingénieurs du groupe PECHENEY**. L'aluminium-tome 1, édition EYROLLS 1964.
- [2] **K.L. MITTAL**, Adhesion measurement of thin films, Materials Science and Engineering, Vol.28, Issue 1, April 1977, p. 165
- [3] **C.DEHMAS**. Etude de l'influence des postes de traitement sur l'adhérence et le comportement mécanique d'un multimatériau réalisé par projection thermique. Projet de fin d'études, ENP 1994.
- [4] **H. WEISS**, Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment, Surface and Coating Technology, 1995.
- [5] **PAULING L.**, The nature of the Chemical Bonding, 3ème ed., Cornell University Press, New-York, 1960.
- [6] **E.DARQUE-CERETTI, E. FELDER**, Adhésion et adhérence, Sciences et Techniques de l'Ingénieur, CNRS Edition, 2003.
- [7] **V.V. SOBOLEV, J.M. GULEMANY, J. et al. NUTTING**, Development of substrate coating adhesion in thermal spraying, International Materials Reviews, 1997.
- [8] **A. A. VOLINSKI, N.R. MOODY, W.W. GERBERICH**, Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Acta Materialia, 2002.
- [9] **C.S. RICHARD, G., LU J., et al. BERANGER**, The influences of heat treatments and inter-diffusion on the adhesion of plasma-sprayed NiCrAlY coatings, Surface and Coatings Technology, 1996.
- [10] **SHIN S.Y., KO M.W., CHO D.C. et al.**, Microstructure and mechanical properties of Al6061 joints diffusion brazed using Cu interlayer, Journal of Materials Science Letters, 2002.
- [11] **F. BAHBOU, P. NYLEN, G. BARBEZAT**, A parameter study of the Protal® process to optimise the adhesion of Ni5Al coatings, Advances in Technology and Application, Materials Park, U.S.A., OH, 2004.
- [12] **S. HEDACQ**, Etude de l'adhérence et de la construction d'un dépôt d'acier inoxydable élaboré par projection plasma sur un substrat polymère, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2000
- [13] **L.BIANCHI**, Projection par plasma d'arc et plasma inductif de dépôts céramiques : mécanismes de formation de la première couche et relation avec les propriétés mécaniques des dépôts, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 1995.
- [14] **T. MARUYAMA, T. KOBAYASHI**. Influence of substrate surface roughness on adhesive property of sprayed coating, Advances in Technology and Application, Materials Park, U.S.A., OH, 2004.

- [15] **S. SIEGMANN, C.A BROWN.** Surface texture correlations with tensile adhesive strength of thermally sprayed coatings using area-scale fractal analysis, in: UTSC 99 (United thermal spray conference & exposition), Dusseldorf, 17-19 march 1999.
- [16] **VARGEL.** Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, édition DUNOD, Paris 1979.
- [17] **E. SILVERI, E .CHASSAING, S.B. GORYACHEV.** Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Journal de Physique IV, 2003.
- [18] **J.R.Davis.** Aluminium and aluminium alloys, ASM Specialty handbook, ASM international Materials Park, OH, U.S.A, 1993.
- [19] **Christian Vargel Dunod.** Corrosion de l'Aluminium, Paris, 1999.
- [20] **Raymond Loewy.** L'Aluminium, Série de technologie, 2009
- [21] **Maurais DUCOS.** L'aluminium. Techniques de l'ingénieur, TBA1066, 1988
- [22] **Christian BERGEL.** Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages, Techniques de l'ingénieur M 4661, 2008
- [23] **Michel Colombie et Coll.** Matériaux industriels : Matériaux métallurgiques, (Collection Dunod – Paris septembre 2000, N°= 1058). ISBN210004575X. de l'ingénieur M 4661, 2008.
- [24] **M.ELBESSGHI.** Elaboration et caractérisation des multimatériaux projetés Thermiquement à base d'alliage d'aluminium, projet fin d'étude, École Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [25] **Schoop M.U. Guenther H.** Das Schoppsche Metallspritzverfahren. Franckh Verlag, Stuttgart, Germany, 1917.
- [26] **Association de l'aluminium du Canada,** Février 2008.
- [27] **L. Kaba.** Etude des paramètres du soudage TIG Pulsé sur l'alliage d'Aluminium 2024 T3. Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Alger, 2009.
- [28] **FUKUMOTO (M.) et HUANG (Y.).** Proceedings of 15th international thermal spray conference.p. 401-406, mai 1998.
- [29] **LÉGER (J-M.), REMY (F.) et PESME (F.).** Influence des gaz en projection plasma. Revue Surfaces no 262, mai-juin 1996.
- [30] **Alain PRONER.** Revêtements par projection thermique, technique de l'ingénieur,M1645, 1999.