

Ministère de la recherche scientifique et de l'enseignement supérieur

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

**PROJET DE FIN D'ETUDES EN VUE DE
L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT
EN METALLURGIE**

THEME

**L'ANALYSE ET L'INFLUENCE DE L'ETAT DE SURFACE
SUR L'ADHESION D'UN MULTI-MATERIAUX
METAL/METAL**

Réalisé par :
KRIM Mohamed

Proposé et Dirigé par :
Pr. N. MESRATI

PROMOTION JUIN 2012
E.N.P, B.P 182, 10 Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger

ملخص:

في هذه الدراسة قمنا بتلبيس الحديد الصلب غير القابل 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.

الكلمات المفتاحية : الشعلة الحرارية، المتعدد المواد، AU4G، AG3، Thermanit ، الالتحام.

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.

Mots clés : projection thermique, multi-matériaux, AU4G, AG3, Thermanit, adhérence.

Abstract:

In the setting of this study, we tempted to elaborate some layers of stainless steel on two aluminium 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 substrate and layer.

Keywords: thermal projection, Multi-materials, AU4G, AG3, Thermanit, adhesion.

Dédicace

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

- *A mes très chers et tendres parents, que Dieu les protège ;*
- *A mon frère Hamid, mes sœurs Lynda, Djedjigga et Amira ;*
- *A toute ma famille ;*
- *A mes chers amis le trio du feu ;*
- *A tous mes amis et collègues du département de métallurgie, de l'Ecole et de la cité BOURAOUÏ;*
- *A tous ceux que j'aime et qui m'aiment, où qu'ils soient.*

Mohamed KRIM

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi, 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 et pour ça gentillesse au cours de ce travail. Soyez assuré de toute mon estime et de mon profond respect.

Je suis honoré que Monsieur SALHI ait accepté de présider mon jury. Je tiens à exprimer ma gratitude à Messieurs M.L. DJEGHLAL, M.CHETROUB qui ont accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

Je remercie le technicien d'Algérie Métallisation Mr. Salah qui n'a ménagé aucun effort lors de la réalisation de la projection thermique.

Enfin, je remercie tous mes amis, sans exception, pour leur présence et leur soutien.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	4
CHAPITRE I : L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	6
I.1 INTRODUCTION	7
I.2 HISTOIRE DE L'ALUMINIUM	7
I.3 DIFFERENTES PROPRIETES DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES.....	8
I.3.1 LEGERETE.....	8
I.3.2 CONDUCTIVITE ELECTRIQUE ET THERMIQUE.....	9
I.3.3 RECYCLAGE	9
I.3.4 TENUE A LA CORROSION	9
I.4 CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM	11
I.4.1 CLASSIFICATION EN FONCTION DE LA DENSITE	11
I.4.2 CLASSIFICATION EN FONCTION DE L'ELEMENT D'ALLIAGE	11
I.4.3 CLASSIFICATION EN FONCTION DU MODE DE TRANSFORMATION ...	12
I.4.3.1 ALLIAGES DE CORROYAGE	12
I.4.3.2 ALLIAGES DE FONDERIE.....	13
I.5 PROPRIETES DES ALLIAGES ETUDIES, FAMILLES 2000 ET 5000.....	13
I.5.1 LA FAMILLE 2000	13
I.5.2 LA FAMILLE 5000	14
I.6 LES DIFFERENTES UTILISATIONS DE L'ALUMINIUM	14
CHAPITRE II : LA PROJECTION THERMIQUE	16
II.1 INTRODUCTION	17
II.2 PRINCIPE DE LA DE PROJECTION THERMIQUE.....	17
II.3 TYPES DE PROJECTIONS THERMIQUES	18
II.3.1 PROJECTION FLAMME-POUDRE	19
II.3.1.1 PRINCIPE	19
II.3.1.2 TORCHES A GAZ.....	19
II.3.1.3 PISTOLETS FLAMME-POUDRE	20
II.3.2 PROJECTION A FLAMME-FIL.....	21
II.3.3 LA PROJECTION PLASMA	22
II.3.4 LA PROJECTION A ARC ELECTRIQUE ENTRE DEUX FILS.....	24
II.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA PROJECTION PAR ARC ELECTRIQUE.....	25

II.5	LES MATERIAUX DE PROJECTION	26
II.5.1	LES GRANDES FAMILLES DE MATERIAUX.....	26
II.5.2	FORMATION DU DEPOT	28
II.5.3	LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DES REVETEMENTS	29
	CHAPITRE III: ADHERENCE DES REVETEMENTS.....	30
III.1	ADHESION FONDAMENTALE	33
III.2	ADHESION THERMODYNAMIQUE	33
III.3	ADHESION PRATIQUE OU ADHERENCE	34
III.4	CARACTERISATION ET MESURE DE L'ADHERENCE.....	35
III.4.1	QUELQUES METHODES DE MESURE DE L'ADHERENCE	37
III.4.1.A	ESSAI DE PLOT-COLLE (LE TEST D'ARRACHEMENT)	38
III.4.1.B	GONFLEMENT-DECOLLEMENT.....	39
	CHAPITRE IV: TECHNIQUES EXPERIMENTALES	41
IV.1	INTRODUCTION	42
IV.2	LES MATERIAUX ETUDIES.....	42
IV.2.1	LES SUBSTRATS	42
IV.2.2	LES DEPOTS.....	43
IV.2.2.1	LA SOUS COUCHE D'ACCROCHAGE	43
IV.2.2.2	LE REVETEMENT	43
IV.3	ELABORATION DES ECHANTILLONS PAR PROJECTION THERMIQUE	44
IV.3.1	PREPARATION DE SURFACE.....	44
IV.3.1.1	DECAPAGE	44
IV.3.2	LES ETATS DE SURFACE CHOISIS POUR LES TESTS DE FLEXION 3 POINTS	45
IV.3.3	LES ETATS DE SURFACE CHOISIS POUR L'ETUDE DE L'INFLUENCE DU POST-TRAITEMENT SUR L'ADHERENCE.....	46
IV.3.4	MESURE DE LA RUGOSITE DES EPROUVETTES	46
IV.3.5	METALLISATION.....	47
IV.3.5.1	PISTOLET DE PROJECTION.....	48
IV.3.5.2	LES PARAMETRES DE PROJECTION.....	49
IV.3.5.3	LES EPROUVETTES APRES PROJECTION.....	50
IV.4	TECHNIQUES DE CARACTERISATION	50
IV.4.1	ANALYSE METALLOGRAPHIQUE	50
IV.4.1.1	POLISSAGE MECANIQUE.....	50

IV.4.1.2	MICROSCOPIE OPTIQUE.....	51
IV.5	ETUDE DE LA MICRO-DURETE.....	51
IV.6	CARACTERISATION DE L'ADHERENCE (TEST DE FLEXION 3 POINTS).....	52
IV.7	POST-TRAITEMENT.....	52
IV.8	CONCLUSION.....	52
	CHAPITRE V: RESULTATS ET INTERPRETATIONS	53
V.1	INTRODUCTION.....	54
V.2	ANALYSE ET CARACTERISATION DES MULTI-MATERIAUX.....	54
V.2.1	DETERMINATION DE LA RUGOSITE DES SUBSTRATS	54
V.2.2	CARACTERISATION METALLOGRAPHIQUE.....	54
V.2.3	CARACTERISATION DE L'ADHERENCE.....	57
V.2.3.1	CARACTERISATION MECANIQUE	57
V.2.3.1.A	ESSAIS DE MICRO-DURETE.....	57
V.2.3.1.B	ESSAIS DE FLEXION 3 POINTS.....	59
V.2.3.2.	INFLUENCE DU POST-TRAITEMENT	65
V.3	COMPORTEMENT EN FROTTEMENT-USURE DU REVETEMENT.....	69
V.3.1	CALCUL DU VOLUME D'USURE DU REVETEMENT	69
	CONCLUSION GENERALE	72
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	75

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie moderne nécessite l'utilisation des matériaux qui confortent à plusieurs phénomènes tels que la fatigue, la corrosion et l'usure. Ces phénomènes peuvent présenter de très grands risques, pour les éviter on fait intervenir les traitements de surface tels que la projection thermique.

Les traitements de surface peuvent protéger les pièces contre certains risques comme ils peuvent récupérer la perte de matière en cas d'usure.

La projection thermique est le domaine de l'ingénierie des matériaux qui connaît une croissance rapide grâce à ses produits hautement performants, qui trouvent leur application dans plus de 35 secteurs de l'industrie moderne. La gamme de matériaux de projection innovants et de différents substrats s'élargissant sans cesse ouvrira à la projection thermique de nouveaux secteurs d'applications, si les strictes exigences pour la stabilité, la reproductibilité et l'efficacité du procédé sont satisfaites.

L'apparition des revêtements par projection thermique a été introduit en 1909, en Suisse par M. U. Shoop alors que les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire.

Le principe général de la projection thermique est de faire fondre un matériau et l'injecter sous une pression élevée sur la surface d'un métal, pour un revêtement de qualité il faut que le dépôt adhère au substrat.

Il existe plusieurs procédés sous le nom de projection thermique, par exemple la projection à l'arc électrique, projection plasma, la projection à la flamme...etc.

Cette technique est couramment utilisée dans de nombreux secteurs industriels, telle que l'automobile afin de revêtir les cylindres de blocs moteurs, l'aéronautique pour réaliser des barrières thermiques sur les chambres de combustion...

Dans le cadre de notre travail, nous avons tenté de d'élaborer des dépôts d'un acier inoxydable (Thermanit) sur deux alliages d'aluminium (AG3 et AU4G) par le procédé d'arc électrique entre deux fils. Cette opération a pour but d'améliorer en particulier, les propriétés surfaciques et mécaniques du substrat. Aussi, de caractériser l'interface dépôt/substrat pour évaluer sa tenue en fonction des sollicitations appliquées.

Pour se faire, nous avons structuré notre travail en deux parties principales:

- Partie théorique: elle est réservée à la recherche bibliographique pour surtout s'informer des généralités et aspects fondamentaux concernant les traitements de surface et la projection thermique, ainsi que les phénomènes à l'origine de l'adhérence.
- Partie expérimentale: dans laquelle on a présenté les techniques expérimentales utilisées et les résultats obtenus.

Chapitre I

L'aluminium et ses alliages

I.1 INTRODUCTION

L'élément aluminium a été découvert par **Sir Humphry Davy** en 1808 [1].

Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position après l'acier lorsque l'on parle de l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable.

L'aluminium est un métal qui a eu un développement rapide et conserve encore aujourd'hui un taux de croissance appréciable (1 à 2 % par an). La production mondiale d'aluminium a évolué comme suit :

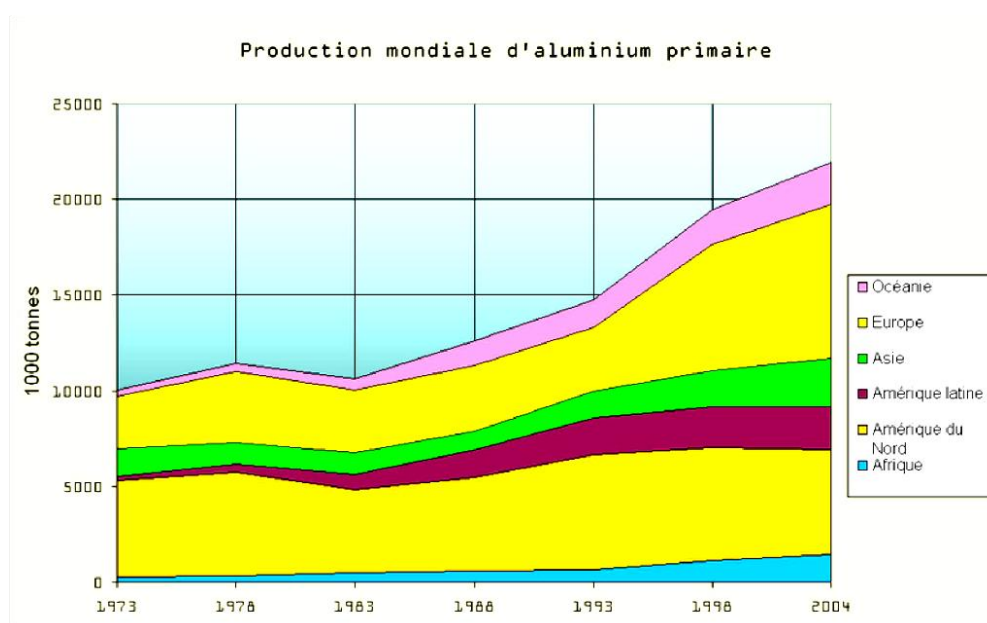


FIGURE I.1- Évolution de la production mondiale de l'aluminium primaire [02].

I.2 HISTOIRE DE L'ALUMINIUM

* En 1808, **Humphry Davy**, après avoir découvert que le sodium et le potassium entraient dans la composition de l'aluminium, il supposa que l'aluminium était un métal à part.

* En 1821, **Pierre Berthier** découvre dans une mine près des Baux-de-Provence, un minerai contenant plus de 50 % d'oxyde d'aluminium. Ce minerai sera appelé la **bauxite**.

* En 1824, le chimiste et physicien danois **Hans Christian Orsted** avait réussi à produire une forme impure du métal.

* En 1827, **Friedrich Wöhler** approfondit les travaux d'Oersted et obtient incontestablement une poudre grise d'aluminium (nom de l'opération). Il parvint à déterminer les propriétés principales telles que densité, conductivité, résistance à la corrosion...

* En 1846, le chimiste français **Henri Sainte-Claire Deville** améliora la méthode de Wöhler en réduisant le minerai par le sodium. Cette méthode est utilisée à travers toute l'Europe pour la fabrication de l'aluminium, mais elle reste extrêmement coûteuse.

1855 : le nouveau métal est présenté à l'exposition universelle de Paris.

* En 1886, de manière indépendante, **Paul Héroult** et **Charles Martin Hall** découvrent une nouvelle méthode de production de l'aluminium en remarquant qu'il est possible de dissoudre l'alumine et de décomposer le mélange par électrolyse pour donner le métal brut en fusion. Ce procédé, permet d'obtenir de l'aluminium de manière relativement économique. La méthode mise au point par Héroult et Hall est toujours utilisée aujourd'hui.

* En 1887, **Karl Josef Bayer** décrit une méthode connue sous le nom de **procédé Bayer** pour obtenir de l'alumine à partir de la bauxite.

1888 : les premières sociétés de production d'aluminium sont fondées en Suisse, France et aux États-Unis [1].

I.3 DIFFERENTES PROPRIETES DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES

L'aluminium et ses alliages se prêtent à beaucoup d'applications technologiques en raison de leur combinaison entre légèreté, rigidité, résistance à la corrosion, conductivité et réflectivité thermique et électrique, et aussi leurs qualités hygiéniques et non-toxiques. La variété de formes dans lesquelles ils sont disponibles augmente également leur utilité [3].

I.3.1 LEGERETE

La faible masse volumique de l'aluminium 2700 kg/m^3 , ainsi que ses remarquables propriétés de mise en forme lui permettent d'être un matériau de premier choix pour de multiples utilisations ; aéronautique, transport et construction [4-5].

La légèreté n'est pas seulement un atout pour l'application elle a aussi des conséquences sur le fonctionnement des ateliers et les conditions de travail. Ainsi, la manutention des demi-produits et des objets en alliages d'aluminium est plus facile [4].

I.3.2 CONDUCTIVITE ELECTRIQUE ET THERMIQUE

L'aluminium est un très bon conducteur thermique, sa conductivité est de 62 % de celle du cuivre. Compte tenu de sa faible masse volumique, il a de multiples avantages dont celui de moins s'échauffer [4-5].

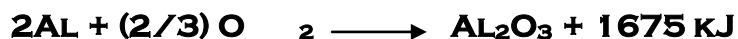
Sa conductivité électrique est de deux tiers de celle du cuivre, qu'il a remplacé dans beaucoup d'applications électriques [4].

I.3.3 RECYCLAGE

Un autre point majeur à considérer, l'aluminium est à 100% recyclable, près de 2/3 du tonnage de métal gris produit depuis le début de siècle serait encore en circulation [5]. C'est l'un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique [4].

I.3.4 TENUE A LA CORROSION

L'aluminium est un métal très électropositif, il possède un potentiel standard de -1,66 V. En contact avec l'oxygène de l'air, il s'oxyde spontanément suivant la réaction



Ainsi, il se couvre d'une couche résistante d'alumine, qui le sépare du milieu environnant et qui empêche la corrosion de gagner des zones en profondeur, il en résulte la passivation du métal. Cette passivation peut être acquise artificiellement par oxydation anodique [4-5].

Le comportement vis-à-vis de la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est régi par le film d'oxyde naturel. Ainsi, dans des milieux neutres, où la couche d'oxyde est insoluble, le métal présente une excellente tenue à la corrosion alors que dans des solutions fortement acides ou alcalines, il est violemment attaqué [4, 6].

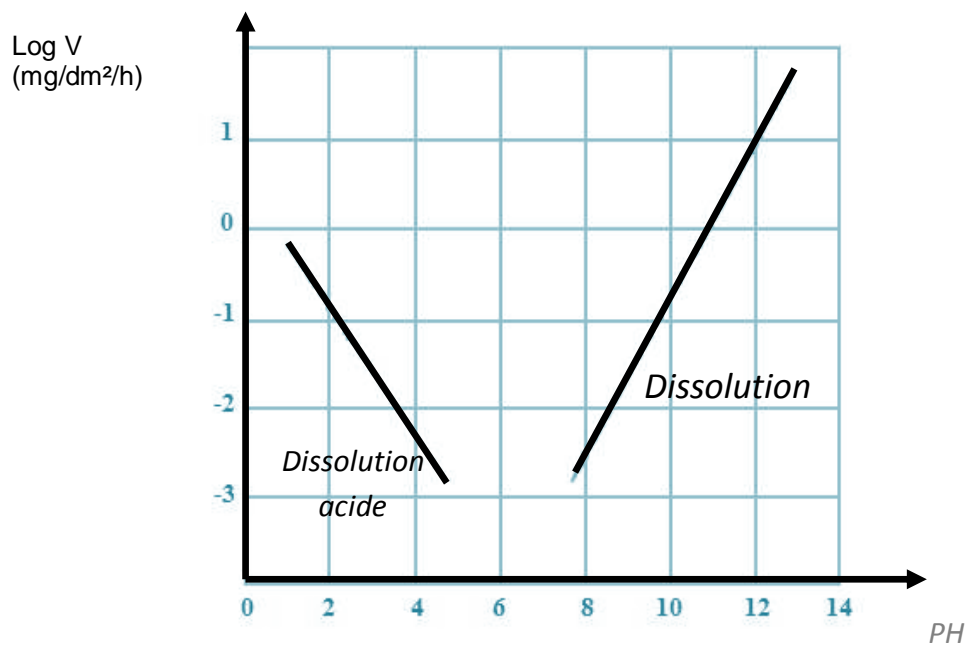


FIGURE I.2- Vitesse de dissolution de l'aluminium en milieux aqueux en fonction du PH d'après Shatalov [4].

Le digramme de POURBAIX illustré par la figure (I.2), rend compte du comportement de l'aluminium vis-à-vis de la corrosion. Il prévoit les domaines de stabilité des différentes formes du métal et les sens des transformations probables [4-6].

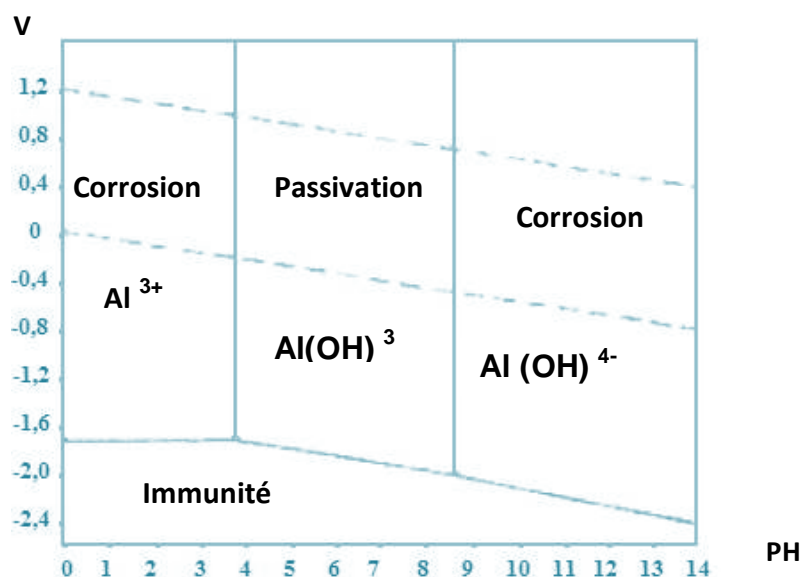


FIGURE I.3- Diagramme de POURBAIX Potentiel-pH de l'aluminium à T 25°C [4].

I.4 CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Les recherches menées dans le secteur de la métallurgie de l'aluminium, portant sur la composition, les gammes de transformation et les conditions de traitement thermique ont abouti à proposer une large palette d'alliages qui peuvent être classés selon trois critères [4] :

I.4.1 CLASSIFICATION EN FONCTION DE LA DENSITE

Les alliages d'aluminium peuvent se diviser en trois catégories, suivant leurs densités à savoir [4] :

- ❖ Les alliages lourds, à faible teneur en aluminium allant de 2% à 25 %, et de densité supérieure à 5. Dans cette catégorie sont concernés le bronze d'aluminium et les alliages au cuivre utilisés dans les câbles électriques.
- ❖ Les alliages de densité moyenne, comprise entre 3 et 5, comme l'aluminium-zinc riche à 90% de zinc qui donnent de bons résultats au moulage sous pression.
- ❖ Les alliages légers, avec des teneurs en aluminium supérieures à 90 %, leurs densités est inférieures ou égales à 3. Ils sont les plus utilisés pour la construction aéronautique.

I.4.2 CLASSIFICATION EN FONCTION DE L'ELEMENT D'ALLIAGE

Les principaux éléments additionnés à l'aluminium se résument généralement dans : le cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium, le zinc et à un moindre degré, le Nickel, le chrome, le cadmium, le bismuth, le fer, le titane, le zirconium, le cobalt, etc... [4-7].

Ainsi, en plus de l'aluminium pur, dont la teneur est de 99,00 %, on reconnaît les sept grandes familles d'alliage suivantes [4-7] :

- ✚ Alliages Aluminium – Cuivre ;
- ✚ Alliages Aluminium – Manganèse ;
- ✚ Alliages Aluminium – Silicium ;
- ✚ Alliages Aluminium – Magnésium ;
- ✚ Alliages Aluminium – Magnésium – Silicium ;
- ✚ Alliages Aluminium – Zinc ;
- ✚ Autres alliages d'aluminium.

Les propriétés communes de base des alliages de la même famille sont déterminées par les éléments d'alliage.

TABLEAU I.1 - Apport du cuivre et du magnésium comme éléments d'alliage [4].

cuivre	Magnésium
Améliore les caractéristiques mécaniques	L'accroissement des caractéristiques mécaniques est fonction de la teneur en Mg
Diminue la résistance à la corrosion	Améliore la tenue à la corrosion
Facilite l'usinage et le soudage	Facilite le soudage
Améliore la tenue au fluage	Bonne aptitude aux traitements de surface
Bonne aptitude aux traitements de surface	

I.4.3 CLASSIFICATION EN FONCTION DU MODE DE TRANSFORMATION

I.4.3.1 ALLIAGES DE CORROYAGE

➤ Alliages aluminium-cuivre

Le cuivre améliore les caractéristiques mécaniques, l'usinabilité, la forgeabilité et la résistance au fluage, mais il réduit la soudabilité et la résistance à la corrosion.

Exemple : Alliage 2618A

➤ Alliages aluminium-manganèse

Le manganèse allié à l'Aluminium permet d'obtenir une bonne résistance à la corrosion et une bonne aptitude à l'emboutissage.

Exemple : Alliage 3003

➤ Alliages aluminium-magnésium

Très bonne résistance à la corrosion, bonne soudabilité et bonne usinabilité, aptitude à l'anodisation.

Exemples : Alliage 5005.

➤ Alliages aluminium-magnésium-silicium (AGS)

Ce sont les alliages de filage par excellence, pour tous les types de profilés d'usage courant avec ou sans anodisation.

Exemple : Alliage 6060

➤ Alliages aluminium-zinc

Ces alliages ont les meilleures caractéristiques mécaniques et sont très employés dans l'aéronautique. Ils doivent être protégés contre la corrosion.

Exemple : Alliage 7075.

Divers

- ✚ L'étain est utilisé dans les alliages pour coussinets (propriétés de frottement) sous forme d'un alliage aluminium-étain à 6 % par exemple.
- ✚ Le nickel améliore la résistance au fluage.
- ✚ Le chrome est, dans certains cas, un complément du manganèse pour réduire le risque de formation de criques [8].

I.4.3.2 ALLIAGES DE FONDERIE

Les alliages de fonderie sont, pour la plupart, des alliages Al-Si ou Al-Si-Cu [8].

ALLIAGES AL-SI: AlSi7Mg ; AlSi10Mg ; AlSi13.

ALLIAGES AL-SI-CU: AlSi12CuNi ; AlSi18CuNi ; AlSi5Cu3 ; AlSi8Cu3 ; AlSi9Cu3
AlSi12Cu2 ; AlSi12Cu.

AUTRES ALLIAGES: AlMg3Ti ; AlMg6 ; AlMg10Si ; AlCu5MgTi ; AlZn5Mg.

TABLEAU. I.2 - Classification des alliages d'aluminium en fonction des éléments d'addition et du mode de transformation.

Éléments d'alliage	Famille des moulés	Famille des corroyés	
Aucun	10000	Alliages à durcissement Structural	1000
Manganèse	3000		3000
Magnésium	50000		5000
Cuivre	20000	Alliages à durcissement par écrouissage	2000
Silicium	40000		4000
Magnésium + silicium	6000		6000
Zinc	70000		7000

I.5 PROPRIETES DES ALLIAGES ETUDIES, FAMILLES 2000 ET 5000

I.5.1 LA FAMILLE 2000

Cette famille caractérisée par l'addition majeure du cuivre et du magnésium, fait partie des alliages de corroyages. Elle est connue par les propriétés suivantes :

- ✚ Une bonne résistance mécanique ;
- ✚ Une faible vitesse de propagation des fissures ;
- ✚ Une grande tenue à chaud ;
- ✚ Une aptitude au décolage.

I.5.2 LA FAMILLE 5000

Fait aussi partie des alliages de corroyage, elle est marquée par l'addition majeure du magnésium. Les éléments de cette famille présentent :

- ✚ Une aptitude au soudage des alliages dont le titre en magnésium n'est pas dans la gamme 1.8% - 2.2% ;
- ✚ Un bon comportement aux basses températures ;
- ✚ Une bonne résistance à la corrosion.

L'addition du magnésium est bénéfique du point de vue accroissement des caractéristiques mécaniques, mais au-delà de 5%, elle altère la stabilité de l'alliage surtout sous l'effet de la température.

I.6 LES DIFFERENTES UTILISATIONS 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 ductile, 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 :

- ✓ les transports (automobiles, avions, camions, trains, bateaux,...etc.);

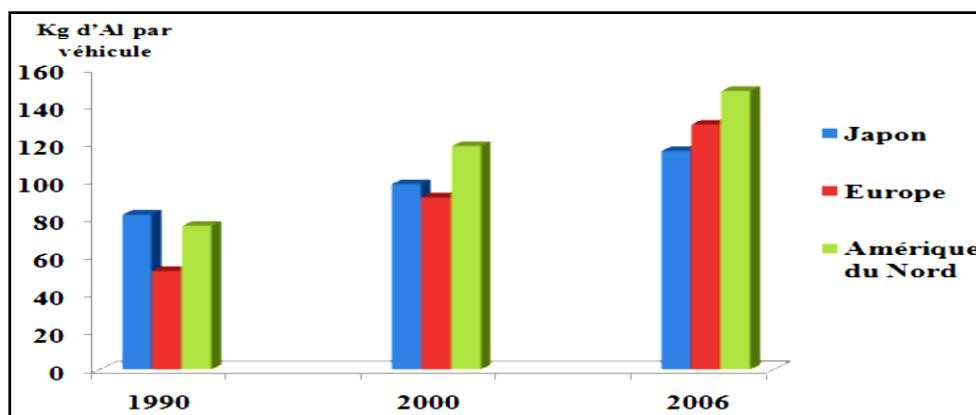


FIGURE I.4 - Contenu d'aluminium dans les véhicules en Amérique du Nord, en Europe et au Japon [9].

- ✓ l'emballage (boîtes de conserve, papier aluminium, canettes, barquettes, aérosols, etc...) et notamment les emballages alimentaires;
- ✓ la construction (fenêtres, portes, etc.) ;
- ✓ les biens de consommation (appareils, ustensiles de cuisine etc.) ;
- ✓ les fils électriques (la conductivité de l'aluminium ne représente que 65 % de celle du cuivre, mais l'aluminium est plus léger et moins cher) ;
- ✓ de l'aluminium très pur (99,980 à 99,999 %) est employé en électronique et pour les CD (Disc Compact).

Chapitre II

La projection thermique

II.1 INTRODUCTION

Différentes technologies de dépôt et traitements de surface permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer les propriétés de surface. Parmi les techniques les plus utilisées nous pouvons citer : l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur (PVD et CVD) et la projection thermique.

En effet, la projection thermique est un traitement de surface par voie sèche visant à améliorer les propriétés du matériau telles que la résistance à l'usure et au frottement, les propriétés thermiques, les propriétés électriques et la protection contre la corrosion.

La projection thermique occupe une place considérable dans le monde des traitements de surface. Son apparition date de 1909 grâce à l'invention de l'ingénieur suisse Schoop, portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme. Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'Aluminium). Dès 1914 des essais de projection par arc électrique furent réalisés [24].

II.2 PRINCIPE DE LA PROJECTION THERMIQUE

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique 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 II.1) [24].

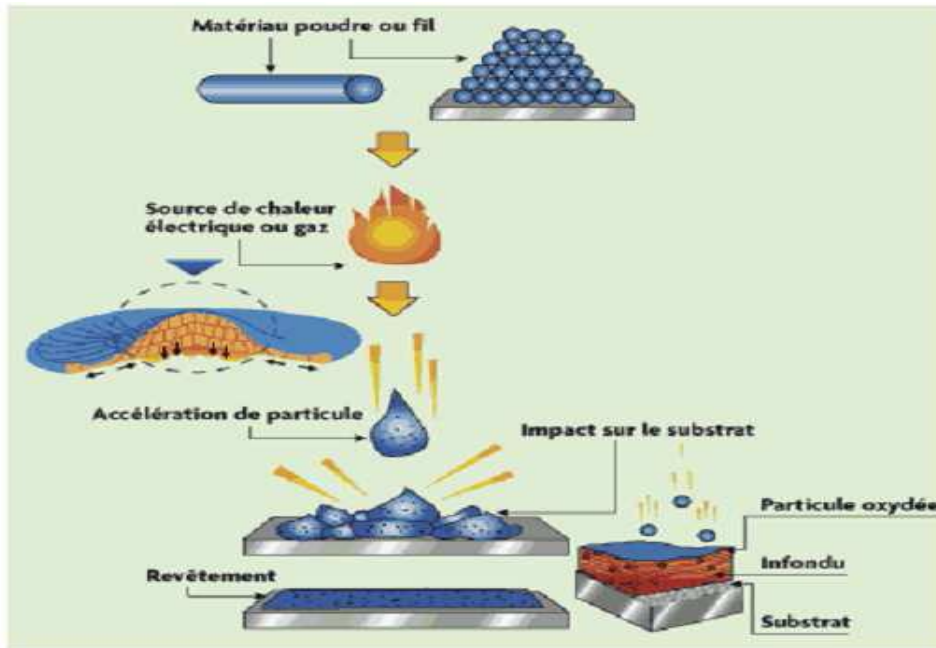


FIGURE II.1 - Le procédé de projection thermique [25].

II.3 TYPES DE PROJECTIONS THERMIQUES

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de projection flamme. La température d'une flamme oxycombustible varie de 2 800 °C (oxypropane) à 3 150 °C (oxyacétylène) (figure 6). Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2 800 °C, et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme [24].

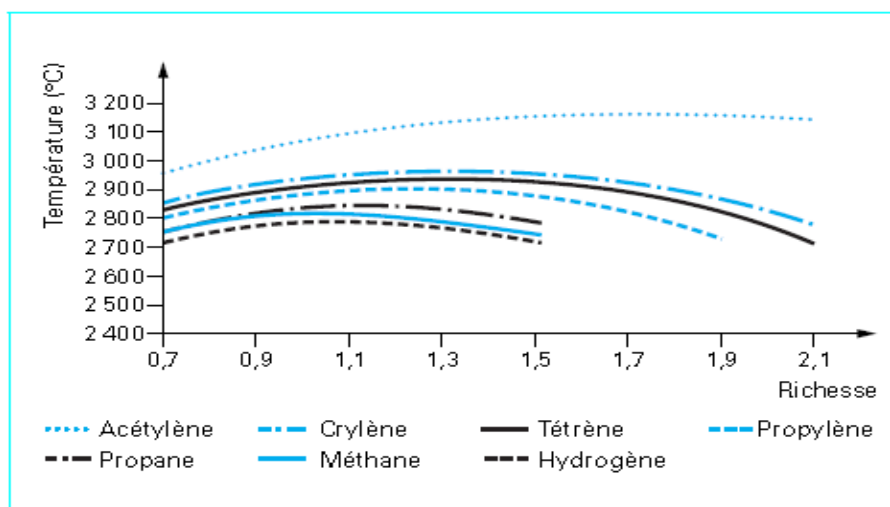


FIGURE II.2 - Température de flamme oxycombustible (doc. Air Liquide) [24].

II.3.1 PROJECTION FLAMME-POUDRE

II.3.1.1 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 oxycombustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (figure II.3) [24].

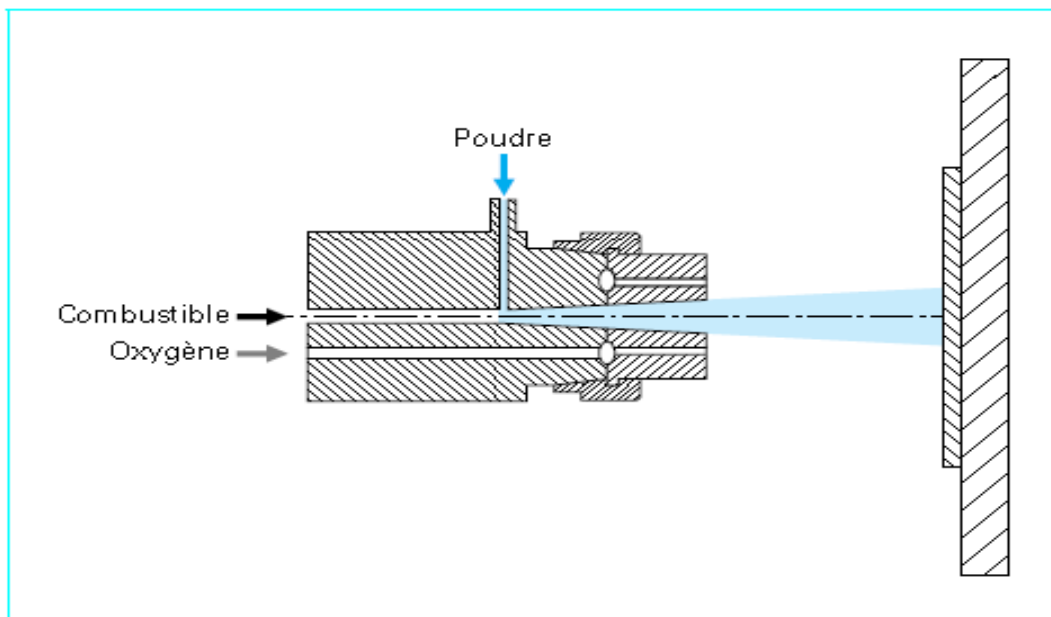


FIGURE II.3 - Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre (doc. AREGA) [24].

II.3.1.2 TORCHES A GAZ

Ces torches sont des chalumeaux oxygaz équipés d'un récipient contenant la poudre. Celle-ci tombe par gravité et est entraînée par un des gaz de combustion, pour être introduite dans la flamme. La vitesse de projection est très faible. La distance de la buse au support est très courte (quelques millimètres). La flamme sert à chauffer le substrat et à assurer la fusion de la poudre. Une liaison de type brasure est ainsi réalisée (figure II.4).

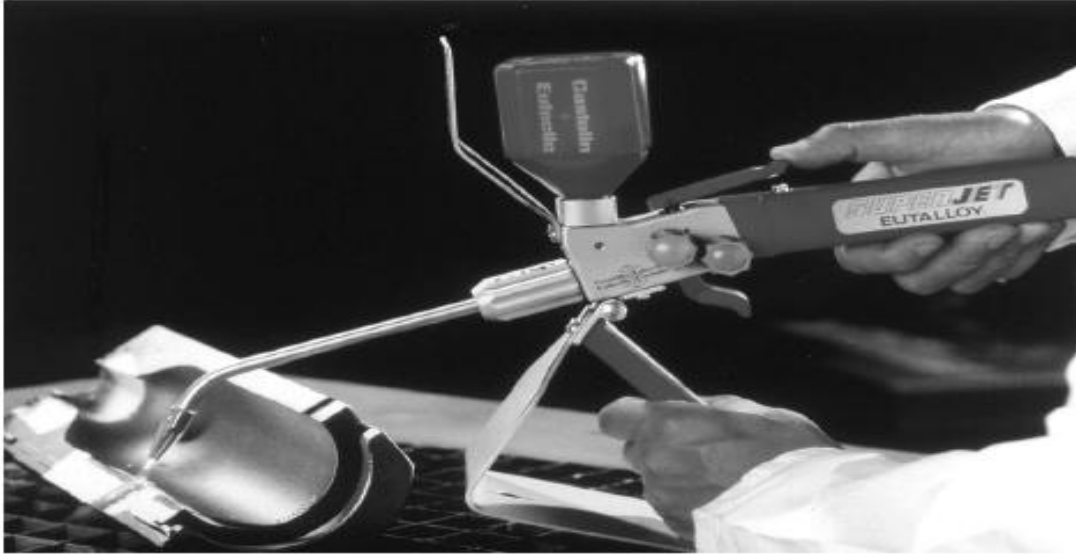


FIGURE II.4 - Projection flamme-poudre sur moule de verrerie (doc. Castolin) [24].

II.3.1.3 PISTOLETS FLAMME-POUDRE

Ces pistolets se différencient des précédents par leur puissance calorifique et par le fait que le substrat n'est pas chauffé par la flamme.

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...).

Ces matériels sont utilisés soit manuellement (ils sont alors couplés avec un tableau de réglage des pressions et débits de gaz), soit sur machines automatiques, la gestion des cycles et des paramètres étant assurée par des consoles programmables.

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).

Ce procédé permet des dépôts de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 2 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat [24].

II.3.2 PROJECTION A FLAMME-FIL

La projection flamme fil, plus connue sous le nom de métallisation ou shoopage a été inventée en 1910 par la suisse Schoop qui a développé le premier pistolet de projection thermique de fils métalliques. L'appareil consistait en un brûleur dans lequel un carburant, acétylène ou hydrogène, était mélangé avec de l'oxygène pour créer une flamme en sortie de tuyère de brûleur. Un jet d'air comprimé entourant la flamme atomisait et propulsait le métal fondu. La continuité du procédé dépendait de l'approvisionnement du fil dans la flamme avec une vitesse contrôlée de façon à le fondre et le projeter avec un flux continu (figure II.5) [26].

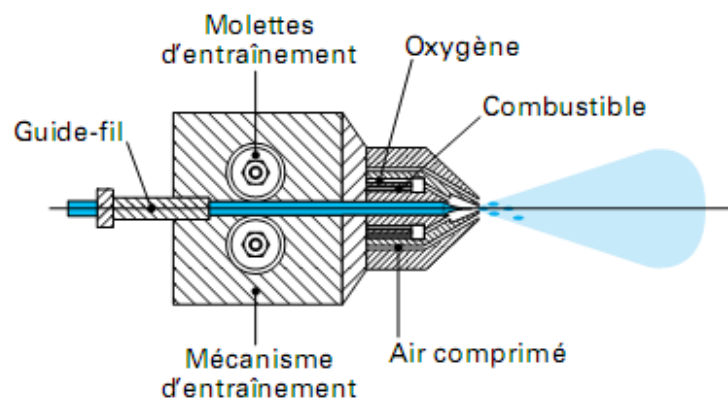


FIGURE II.5 - Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil [24].

Les pistolets de projection flamme-fil se composent de deux parties :

- ✚ une partie chalumeau dans laquelle le matériau d'apport est fondu et pulvérisé.
- ✚ une partie entraînement de fil [24].

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. Des buses à gaz différentes permettent l'utilisation de gaz tels que acétylène, propane ou tétrène par exemple, alors que différentes buses à air modifient l'aspect et les caractéristiques du dépôt. De même, des rallonges, à jet droit ou à jet dévié, autorisent les dépôts dans des alésages ou dans des zones difficilement accessibles (Figure II.6).



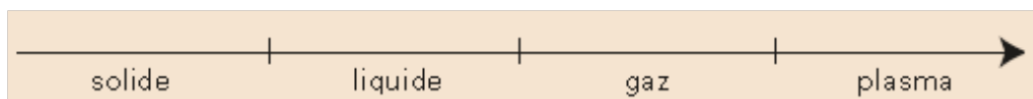
FIGURE II.6 - Pistolet de métallisation [26].

La partie entraînement de fil peut être animée soit par une turbine à air, soit par un moteur électrique. Le système d'entraînement par moteur électrique permet une régularité parfaite de l'avance du fil, en particulier grâce à un couple moteur constant, quelles que soient les variations de traction du fil en amont du pistolet. L'avantage du système d'avance par turbine est le poids et le coût inférieurs de l'appareil [24].

Ses avantages sont qu'il est d'un investissement faible, il est facile d'utilisation en permettant l'obtention de rendements de projection élevés, c'est un système portable qui peut être utilisé en chantier. Ses désavantages sont qu'il est limité à la projection de matériaux existant sous forme de fil et le procédé ne permet pas l'obtention de revêtements à haute densité, avec un taux d'oxyde faible et une grande adhérence [26].

II.3.3 LA PROJECTION PLASMA

Le plasma est considéré comme le 4^{ème} 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/H₂ sera ainsi constitué des espèces suivantes : Ar, H, H⁺, Ar⁺, e⁻. Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont :

- ✚ 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 [24].

Pour la projection thermique, deux propriétés conditionnent vitesse et température des particules projetées:

- ✚ la conductivité thermique qui détermine les transferts plasma particules et donc l'état de fusion des particules lors de leur impact sur le substrat ;
- ✚ la viscosité qui permet de diminuer les entrées d'air dans le jet plasma, d'augmenter la longueur du jet et d'éviter les réactions chimiques des particules (oxydation en particulier) [24].

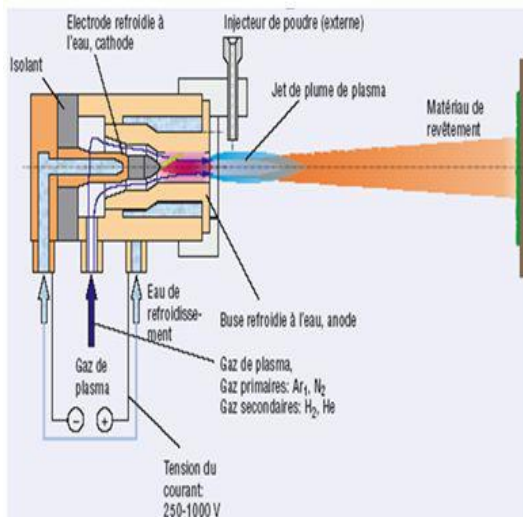


Figure II.7- Principe de fonctionnement plasma [27].

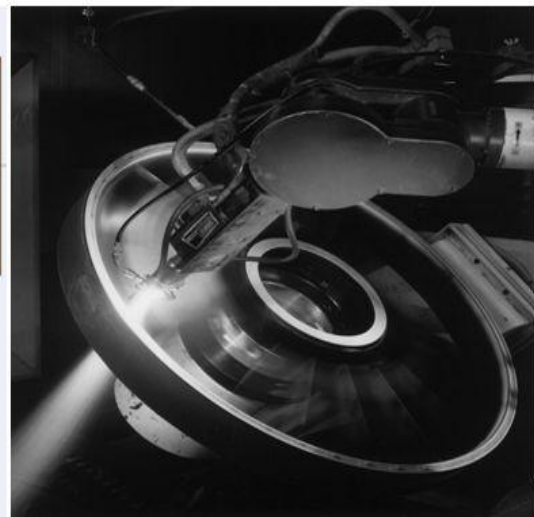


Figure II.8- Appareil de projection d'une torche plasma [24].

Un arc électrique se forme entre une cathode et la buse concentrique du pistolet pulvérisateur (Figure II.7). Un mélange de gaz et de flux élevé le long de l'électrode est ionisé par l'arc, et forme le plasma. Ce jet de plasma est projeté hors de la buse, où la poudre du matériau de revêtement est injectée dans le jet de plasma. La chaleur et la vitesse du jet de plasma fait fondre rapidement et fait accélérer les particules pour les conduire sur le substrat et former un revêtement. Les revêtements par jet de plasma ont une structure plus dense que les revêtements projetés à la flamme [24].

II.3.4 LA PROJECTION A ARC ELECTRIQUE ENTRE DEUX FILS

Le procédé de projection arc-fil ou arc-électrique consiste à créer un arc électrique entre deux électrodes consommables des matériaux du revêtement pour le fondre et ensuite par l'intermédiaire d'un gaz à atomiser (généralement de l'air) et projeter sur le support à revêtir la gouttelette de métal fondu [28].

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 500A. Ils comprennent deux parties :

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

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. Dans le cas de fils très rigides ou de grandes distances entre pistolet et bobines (supérieures à 6 m), il est nécessaire d'adjoindre à l'installation un système entraînement des fils par poussée, à l'entrée des gaines. Ce type d'équipement est communément appelé « push-pull ». À l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes contact permettant, d'une part, le positionnement du fil avant entrée dans la zone de fusion et, d'autre part, la transmission du courant électrique (figure II.9) [24].

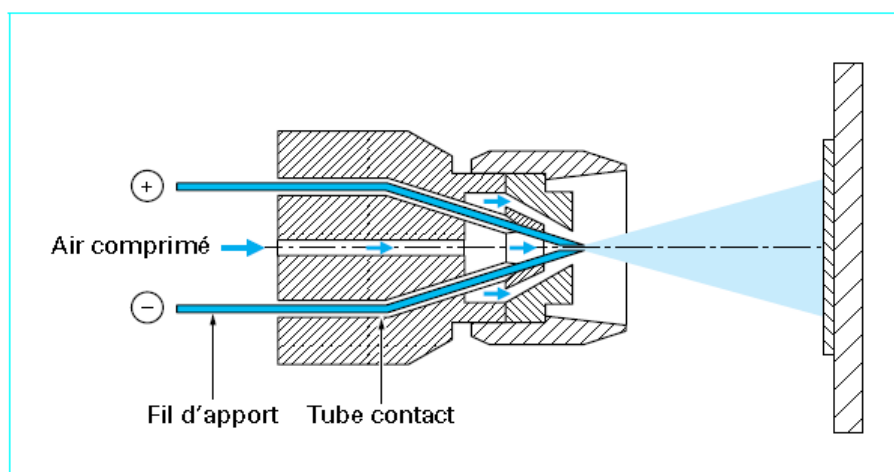


FIGURE II.9 - Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique (doc. AREGA).

La température de l'arc, d'environ 6000K dans l'air à pression ambiante, est largement au-dessus du point de fusion des matériaux projetés, ce qui peut entraîner une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes.

Cependant, ce dernier peut aider à créer des zones d'interaction métallurgique dans le dépôt ou à l'interface dépôt substrat et des zones de diffusion améliorant, ainsi, sensiblement l'adhérence et la cohésion des dépôts [29].

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 de 20 à 40 MPa ;
- ✚ taux horaire de dépôt de 5 à 30 kg/h.

La plupart des matériaux métalliques tels que le zinc, le cuivre, l'aluminium, le bronze, l'acier ainsi que de nombreux alliages peuvent être projetés par cette technique.

En raison d'une température d'arc élevée, la variété des matériaux métalliques déposés n'est limitée que par la fabrication des fils [24].

II.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA PROJECTION PAR ARC ELECTRIQUE

Les principaux avantages du procédé arc-fil sont les suivants [28]:

- ✚ un procédé économique, la puissance électrique est de l'ordre de 5 à 10 kW et le gaz utilise comme gaz d'atomisation est généralement de l'air comprimé ;
- ✚ un taux de dépôt élevé de l'ordre de 5-40 kg/h ;
- ✚ un rendement énergétique important de 60 à 70 % de la puissance électrique fournie est utilisée pour faire fondre les fils ;
- ✚ avec un fil plein, le matériau projeté est complètement fondu ;
- ✚ Il n'est généralement pas nécessaire de refroidir le substrat.

Les principaux inconvénients de du procédé arc-fil sont les suivants [28] :

- ✚ des dépôts présentant une porosité (de l'ordre 10%) et une teneur en oxyde (jusqu'à 25%) relativement élevées par rapport aux dépôts obtenus avec les autres techniques de projection thermique ;
- ✚ une perte des composants les plus volatils du fait que la température de l'extrémité des fils est très haute par rapport à la température de fusion ;

II.5 LES MATERIAUX DE PROJECTION

II.5.1 LES GRANDES FAMILLES DE MATERIAUX

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 [28].

Le tableau 5 présente les principaux groupes utilisables en projection thermique ainsi que les procédés usuels [24].

Groupe	Dénomination	Flamme	Arc	Plasma	HVOF	Canon à détonation (1)	Flamme + refusion
1	Aciers non alliés	X					
2	Aciers alliés	X					
3	Aciers fortement alliés • Inox martensitique • Inox austénitique	X	X				
		X	X				
6	Alliages base cobalt Alliages autoadhérents (base cobalt)				X		
		X					X
7	Alliages base nickel • Nickel • Alliages autoadhérents (NiCrBSi) • Alliages autoadhérents chargés carbures • Inconel • Monel	X				X	
		X				X	X
		X				X	X
		X	X	X		X	
		X	X				
8	Alliages base cuivre	X	X				
9	Alliages base zinc • Zinc • Zn/Al	X	X				
		X	X				
10	Métaux non alliés • Aluminium • Molybdène • Tantale • Étain • Argent	X	X	X			
		X	X	X			
				X			
		X					
		X		X			
11	Carbures (+ liant) • Carbure de tungstène • Carbure de chrome • Carbure de titane • Carbure de bore	X		X	X	X	X
				X	X	X	
				X		X	
				X		X	
12	Oxydes • Al ₂ O ₃ • Al ₂ O ₃ + TiO ₂ • Cr ₂ O ₃ • ZrO ₂	X		X		X	
		X		X		X	
		X		X		X	
		X		X		X	
13	Alliages autoadhérents • Aluminium de nickel • Nickel/chrome/aluminium	X	X	X		X	
		X		X		X	
14	Nitride de titane			X			
15	Borure de zirconium ou de titane			X			
16	Siliciure de molybdène			X			
17	Abradables • Nickel/graphite • Aluminium/résine	X		X			
		X		X			
18	Antifriction • Étain/antimoine • Étain/plomb	X	X				
		X	X				
19	Alliages « M » CrAlY			X		X	

(1) Source : Praxair Surface Technologies

Tableau II.1 - Combinaison habituelles produits d'apport/procédés [24].

II.5.2 FORMATION DU DEPOT

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. La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques:

- ❖ l'écrasement de chaque gouttelette ;
- ❖ la formation d'une couche de matériau, résultant de la cinématique liée au processus (mouvements relatifs torche/pièce).

Ce mécanisme d'écrasement est un mécanisme complexe dépendant d'une part des caractéristiques des particules elles-mêmes (vitesse, composition chimique, température, degré de fusion), et d'autre part de celles du substrat (nature, rugosité, température)

(Figure II.10) [24].

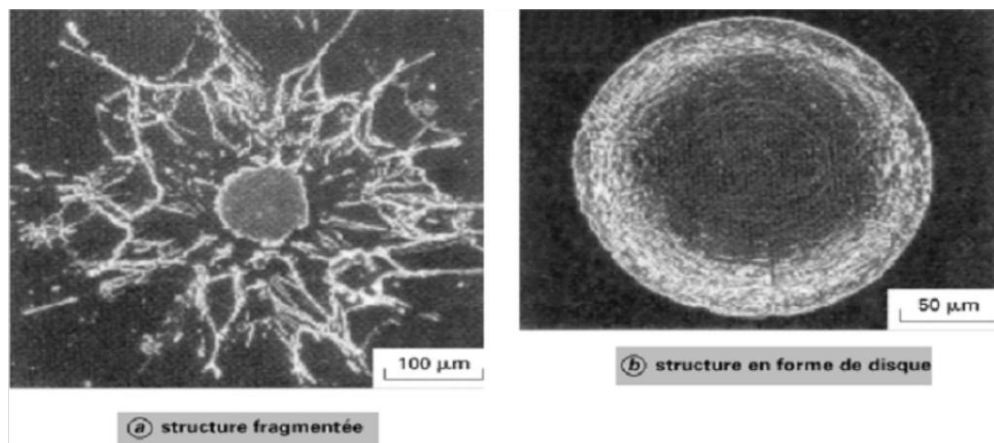


FIGURE II. 10 - Mécanismes d'écrasement des particules [24].

Deux types de structures existent après impact :

- A.** une structure « fragmentée », constituée d'un disque central de faible diamètre et de ramifications dirigées vers l'extérieur, et reliées ou non à celui-ci ;
- B.** une structure en forme de disque, constituée à partir d'un écoulement continu et stable du liquide, allant du point d'impact de la particule vers la périphérie.

La vitesse de refroidissement des particules au contact du métal de base est généralement supérieure à 106 °C/s, le temps de solidification étant compris entre 0,5 et 2,5 ms.

La formation d'un dépôt résulte de la combinaison du phénomène d'écrasement et de solidification rapide de particules fondues sur le substrat et du balayage de la surface traitée. La réaction chimique des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleurs avec le substrat (ou la couche précédemment déposée) vont affecter la qualité du dépôt, et en particulier le taux de porosité, le taux d'impuretés, les contraintes résiduelle et la structure métallurgique [25].

II.5.3 LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DES REVETEMENTS

Les différentes caractéristiques du revêtement dépendent essentiellement de la méthode appliquée pour la projection et les différents paramètres qui régissent cette méthode.

Les principales caractéristiques des revêtements projetés sont :

- ❖ Densité (porosité) ;
- ❖ Dureté ;
- ❖ Adhérence

Chapitre III

Adhérence des revêtements

INTRODUCTION : NOTIONS D'ADHESION ET D'ADHERENCE

D'après la littérature [10], les propriétés d'usage d'un composite revêtement/substrat dépendent des caractéristiques intrinsèques des différentes zones qui le constituent et notamment de l'interface couche-substrat. En effet, cette interface est souvent ressentie comme un point faible dans cette chaîne. Elle conditionne la tenue mécanique du système. Or, la fonctionnalité recherchée dans un tel composite ne peut être assurée que si, sous une sollicitation mécanique externe ou sous l'effet de contraintes résiduelles (σ), le revêtement reste adhérent au substrat qu'il doit recouvrir et protéger. L'adhérence dépend de l'ensemble des phénomènes et des mécanismes qui maintiennent liés les composants macroscopiques et régissent la résistance à la rupture d'une interface.

Une vision plus générale consiste à considérer que tout corps est constitué de l'assemblage de molécules, d'atomes ou d'ions, liés entre eux par des forces de liaison plus ou moins fortes ; ce sont ces diverses forces qui assurent sa cohésion. Roche [11], définit les phénomènes de l'adhésion, d'un dépôt de polymère dans son cas, à partir d'un ensemble de diverses théories:

- **LA THEORIE MECANIQUE** : l'adhésion est engendrée par la pénétration du film dans les porosités du substrat créant un ancrage mécanique à l'interface. La rugosité est un facteur important mais non déterminant car l'adhésion d'un verre sur une surface de faible rugosité est correcte [12].

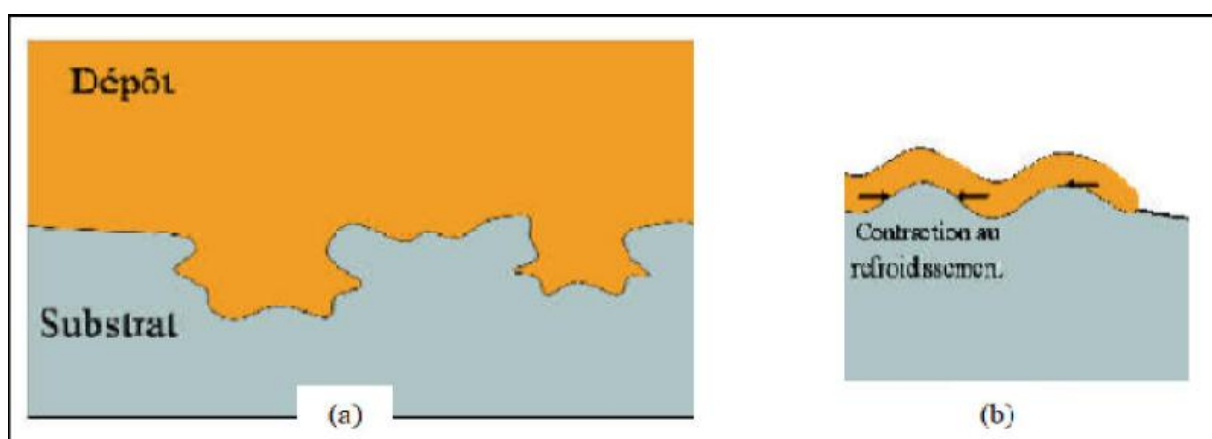


FIGURE III.1 - Illustration de l'ancrage mécanique [22].

- **LA THEORIE THERMODYNAMIQUE** : elle est basée sur la mouillabilité du revêtement sur la surface de l'adhérent. Les tensions superficielles, σ_{LV} et σ_{SV} , du liquide ou

du solide en présence de sa vapeur doivent vérifier la condition nécessaire mais non suffisante :

$$\sigma_{LV} \leq \sigma_{SV}$$

La mesure de l'angle au contact d'une goutte du liquide sur le substrat détermine proportionnellement l'énergie d'adhésion.

• **LA THEORIE DE LA 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 est observé.

Ce phénomène de diffusion, nécessite une solubilité et un apport d'énergie suffisant, notamment sous forme de chaleur. Une interdiffusion 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'interdiffusion est généralement considérée comme bénéfique pour l'adhérence

[13]. La formation de phases intermédiaires fragiles aux interfaces peut conduire à une mauvaise adhérence des revêtements [13,14] ou au contraire l'améliorer [15].

• **LA THEORIE DE L'ADSORPTION** : les molécules du dépôt sont physisorbées et forment un joint adhésif.

• **LA THEORIE CHIMIQUE** : elle est basée sur l'existence de liaisons entre le film et le substrat créées lors du dépôt.

Maugis relayé par Laval et Felder relie l'adhésion et l'adhérence d'un élastomère pour lequel la propagation d'une fissure interfaciale entraîne la rupture entre deux corps. Cette relation non généralisable fait intervenir les énergies d'adhésion, la vitesse de propagation de la fissure, et la température. Rickerby reprend la définition de l'adhésion donnée par l'A.S.T.M. (American Society for Testing and Materials) : « l'état dans lequel deux surfaces sont reliées ensemble par des forces interfaciales comprenant principalement des liaisons de valence, des forces d'ancrage ou bien l'ensemble des deux ». A partir de là, il apparaît évident d'une part que le terme adhésion semble regrouper plusieurs théories qui peuvent être de plus différentes selon les auteurs, et d'autre part que la distinction entre la signification d'adhérence et d'adhésion n'est pas si simple.

Mittal apporte quelques éléments de réponse en définissant la notion d'adhésion sous trois formes : l'adhésion fondamentale, l'adhésion thermodynamique et l'adhésion pratique ou adhérence [16].

III.1 ADHESION FONDAMENTALE

La notion d'adhésion fondamentale se rapporte aux forces d'interaction qui existent entre le revêtement et son substrat. On peut déterminer l'adhésion entre deux corps si on connaît la nature des forces d'interactions et leur répartition à l'interface. Ces forces présentes à la surface des matériaux sont nombreuses. On distingue les forces de Van der Waals, des liaisons chimiques telles que les liaisons hydrogènes, covalentes et ioniques. Ces dernières sont les plus énergétiques. Le schéma de la **FIGURE III.2** résume à la fois les distances d'interactions et les énergies de chaque force d'interaction [17].

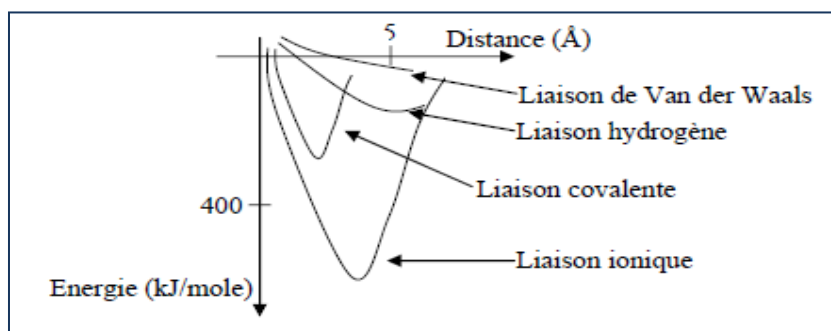


FIGURE III.2 - Ensemble des interactions : zones d'action et énergies correspondantes [23].

III.2 ADHESION THERMODYNAMIQUE

L'adhésion thermodynamique se rapporte au changement d'énergie lors de la création d'une interface. Les forces de liaison en surface de deux corps **A** et **B** ne sont pas saturées et vont donc permettre leur liaison mutuelle. En terme thermodynamique, l'adhésion est donc définie par la diminution de l'énergie libre du système **A+B** lorsque **A** et **B** se lient sur la surface. On note W_{AB} , l'énergie d'adhésion de Dupré (J/m^2) :

$$W_{AB} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB}$$

où γ_A et γ_B sont respectivement l'énergie libre d'excès de la surface de **A** et de **B** et γ_{AB} la dépense d'énergie liée à la modification de position des éléments constitutifs de **A** et **B** lors de

la création de la liaison d'adhésion entre **A** et **B**. La grandeur W_{AB} caractérise donc l'intensité des forces de liaison entre **A** et **B**, mais sa mesure directe est délicate [17].

III.3 ADHESION PRATIQUE OU ADHERENCE

La notion d'adhérence part de la nécessité pratique de caractériser la résistance à la rupture d'une interface **AB**. Pour cela, les deux corps sont séparés mécaniquement à l'aide d'un chargement F (force, couple...) et la valeur F_R de ce chargement provoquant la séparation de **A** et de **B** est mesurée. La caractérisation des forces d'adhésion (d'origine mécanique, thermique, acoustique...) par ce chargement critique F_R ou, ce qui est plus courant, par une contrainte moyenne de rupture σ_R , présente en pratique plusieurs difficultés :

- la rupture peut être cohésive et se produire à l'intérieur de l'un des deux corps;
- la rupture peut être adhésive, le chargement rompt alors non seulement les liaisons entre **A** et **B**, mais aussi déforme de manière irréversible et sur un volume plus ou moins grand l'un ou les deux matériaux : alliages métalliques, matériaux polymériques, céramiques. C'est tout particulièrement le cas lorsque la porosité de l'un des deux corps permet un ancrage mécanique.
- en cas d'interdiffusion des éléments de **A** et **B** sans formation d'un composé défini, la notion de rupture adhésive s'efface au profit du concept de rupture d'un matériau homogène possédant un gradient de concentration. On retombe alors dans le cas précédent, à savoir la rupture cohésive d'une interphase.

En résumé, se posent donc le problème de la localisation de la rupture et celui de la dissipation (mécanique, thermique...) dans les adhérents.

Pour répondre au second problème, la relation entre adhérence et adhésion fondamentale peut être comme telle :

$$\text{ADHÉRENCE} = F (\text{ADHÉSIONS FONDAMENTALE} + \text{AUTRES FACTEURS})$$

En effet, l'adhérence tient compte à la fois du travail nécessaire pour rompre les liaisons d'interactions entre les deux matériaux mais aussi du travail nécessaire pour déformer les deux matériaux voir enfin de l'énergie calorifique dissipée au cours de l'essai.

Les autres facteurs de la relation ci-dessus sont par exemple les contraintes dans le dépôt, les caractéristiques mécaniques de chaque matériau, le mode de rupture, le mode d'application de la charge et les différents paramètres propres à chaque essai.

Il existe un grand nombre de méthodes permettant de mesurer la tenue d'un dépôt sur son substrat. Elles sont décrites par plusieurs documents de synthèse par Hardwick, Rickerby, Felder et Laugier, Laval et Felder, Felder et Al, Mittal. Selon ce dernier ouvrage, il existe un peu plus de 300 essais d'adhérence qui peuvent être qualitatifs ou quantitatifs, plus ou moins sophistiqués et destructifs [17].

III.4 CARACTERISATION ET MESURE DE L'ADHERENCE

L'adhésion d'un revêtement n'est pas une propriété, mais une condition fonctionnelle. Un revêtement qui n'adhère pas suffisamment pour l'emploi prévu ne sert pas à grand-chose. Ainsi, les méthodes pour mesurer l'adhésion sont-elles nombreuses. Or, même dans le cas où l'on pourrait définir une adhésion (les revêtements épais et les revêtements à adhésion faible), on se trouve face à un problème de définition. Il serait en effet utile d'évaluer d'emblée trois définitions :

- ✚ résistance à la rupture à l'interface en traction,
- ✚ résistance à la rupture à l'interface en flexion,
- ✚ résistance au décollement en cisaillement.

Cette dernière définition est préalable puisqu'elle correspond aux sollicitations dans les tribosystèmes.

Dans les trois cas on est confronté avec le problème de l'application de la contrainte (**FIG. III.3**). L'idéale serait d'incorporer le substrat et le revêtement dans un test normalisé des propriétés mécaniques.

Chaque test devient par le biais de la déformation d'un composite un test mixte. Le test de traction devient un test sévère de flexion et de cisaillement et ainsi de suite. La liaison entre le revêtement et la deuxième éprouvette pose un problème difficile, puisqu'elle introduit deux interfaces supplémentaires, qui participent au test [18].

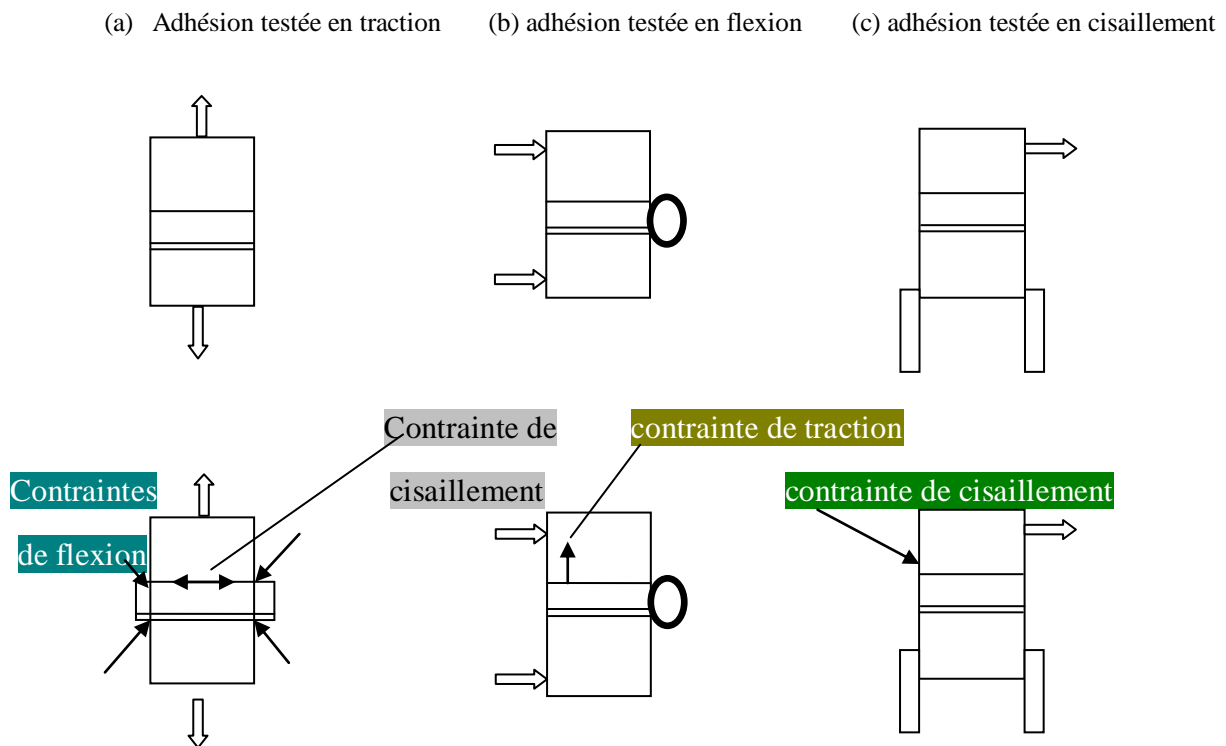


FIGURE III.3 - Schéma des contraintes appliquées et induites par la déformation du composite pour des tests d'adhésion en traction(a), flexion(b) et (c) [18].

La pratique confirme ces problèmes :

- ✚ les résultats des tests en traction sont dominés par les détails d'alignement.
- ✚ le test en cisaillement n'est en fin de compte qu'un test en flexion.
- ✚ la seule liaison envisageable est une colle. Or
 - la résistance de meilleures colles en traction est inférieure à 0.8 MPa,
 - la résistance des colles en flexion est très faible.

Les tests d'adhésion utiles sont donc limités à des adhésions inférieures à 0.5MPa, juste suffisantes pour des laques ou des revêtements optiques.

On utilise des appareils spéciaux avec tiges et colle livrées par le fournisseur.

Une alternative aux tests modèles de l'adhésion sont les tests pragmatiques : on provoque une déformation plastique du composite substrat/revêtement applicable à sa forme : pliage,

torsion, sciage, rectification, coup de marteau. Ensuite on procède à un constat des mécanismes de défaillance. L'apparition de boursouflures, d'éclats et de fissures interfaciales, révèle les limites de l'adhésion. Un composite avec une adhésion parfaite ne montre pas que des dégâts cohésifs [18].

Pour rendre ces tests reproductibles, on a intérêt à utiliser les moyens d'attaque contrôlés du laboratoire :

- + la macrodureté est une déformation plastique contrôlée.
- + la préparation métallographique est une rectification contrôlée.

Le test avec empreinte Rockwell de 1.50 N est le sujet d'une norme.

Le Reve-test® est un test où un diamant Rockwell glisse sur le revêtement avec une charge croissante. Plusieurs méthodes d'identification des défaillances ont été mises au point :

- + émission acoustique ;
- + apparition de délaminations dans le sillon ;
- + apparition de délaminations sur le bourrelet [18].

Leurs résultats ne concordent pas.

III.4.1 QUELQUES METHODES DE MESURE DE L'ADHERENCE

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.

- + les essais de rupture interfaciale, incluant les essais de pelage, d'indentation Interfaciale et de gonflement-décollement, qui mesurent l'énergie nécessaire à la propagation d'une fissure interfaciale.

- + 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 [19].
- ✚ les méthodes non mécaniques, comme des techniques utilisant des ultrasons, les courants de Foucault...etc.

III.4.1.A ESSAI DE PLOT-COLLE (LE TEST D'ARRACHEMENT)

Deux barreaux solides sont collés, l'un au substrat, l'autre au dépôt par un adhésif adapté (**FIGURE III.4**). Une force de traction croissante est appliquée sur les barreaux jusqu'à obtenir la décohésion de l'interface. La contrainte conduisant à la décohésion permet d'évaluer l'adhérence des interfaces [20].

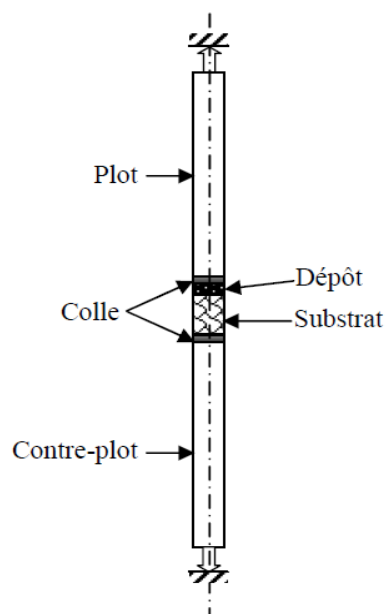


FIGURE III.4 - Principe de l'essai d'adhérence par plot-collé [20].

La contrainte de traction (σ) est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = F/S$$

σ : contrainte de traction.

S : la section de l'éprouvette ou la section de la partie décollée.

F : la charge appliquée.

III.4.1.B GONFLEMENT-DECOLLEMENT

L'essai de gonflement (ou "blister" ou encore "bulge test") permet de déterminer l'énergie d'adhérence interfaciale entre un revêtement ductile et son substrat (**FIGURE III.5**) [20].

La préparation de l'échantillon nécessite l'élimination locale du substrat jusqu'à l'interface sur un cercle de diamètre a . Un liquide est injecté dans la cavité avec une pression P croissante et contrôlée. La flèche h du dépôt, résultant de la pression, est mesurée.

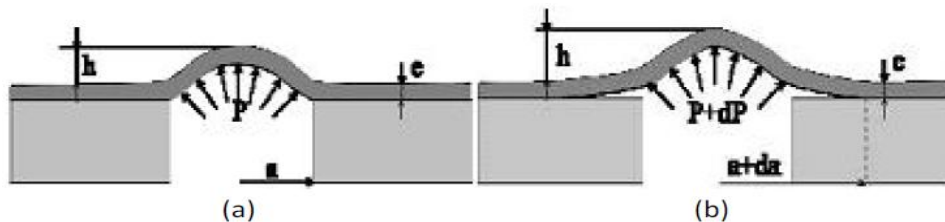


FIGURE III.5 - Schéma des étapes de (a) gonflement et de (b) décollement de l'essai "bulge test" [20].

$$P = c_1 \sigma_{Res} \frac{e}{a^2} h + c_2 \frac{E}{1-\nu} \frac{e}{a^4} h^3 + c_3 \frac{E}{1-\nu^2} \frac{e^3}{a^4} h$$

Avec :

c_1 , c_2 et c_3 : constantes connues à partir de calculs de mécanique des membranes.

E : module d'Young du revêtement.

ν : coefficient de Poisson.

σ_{Res} : contraintes résiduelles du dépôt.

e : épaisseur du dépôt.

Le premier terme rend compte de l'effet des contraintes résiduelles sur le dépôt, le deuxième l'effet de sa rigidité en traction bi-axiale et le troisième l'effet de sa rigidité en flexion. Les valeurs des grandeurs E , ν et σ_{Res} sont identifiées afin de rendre compte des points expérimentaux [20].

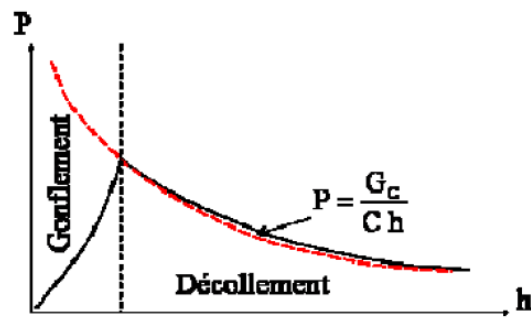


FIGURE III.6 - Allure d'une courbe de gonflement-décollement [21].

Pour une pression supérieure à celle du seuil, le revêtement se décolle. La pression chute alors car la surface sur laquelle elle est appliquée augmente brusquement.

Cet essai est limité aux dépôts ou substrats ductiles (dans le cas du gonflement décollement inversé) et suffisamment minces [21].

Chapitre IV

Techniques Expérimentales

IV.1 INTRODUCTION

Notre étude concerne le suivi de l'adhésion des deux multi-matériaux AU4G/NiAl/thermanit et AG3/NiAl/thermanit en fonction des différents états de surfaces choisis.

Pour se faire, on a structuré notre démarche comme suit :

- ✓ La préparation de surface des échantillons des deux nuances d'alliage d'aluminium étudiées en l'occurrence l'**AU4G** et l'**AG3**.
- ✓ La présentation de la technique de projection thermique, réalisée au sein de l'entreprise privé « **ALGÉRIE MÉTALLISATION** », spécialisée dans la rénovation et la récupération par métallisation des pièces mécaniques usées.

L'analyse de la tenue du revêtement sur les substrats étudiés (fissuration, facteur.....etc.), pour la détermination de la qualité de l'accrochage **MÉTA/NIAL/THERMANIT (MÉTAL : AU4G et AG3 ; NIAL : Sous couche d'accrochage ; THERMANIT : acier inoxydable)**.

Ainsi, différentes techniques de caractérisation physicochimique et mécaniques ont été exploitées :

- ✚ Préparation métallographique ;
- ✚ Observation par microscopie optique ;
- ✚ tests de micro-dureté ;
- ✚ Les essais mécaniques de flexion **3** points ;
- ✚ Post-traitement ;
- ✚ Les tests d'usure du revêtement.

IV.2 LES MATERIAUX ETUDIÉS

IV.2.1 LES SUBSTRATS

On a travaillé sur deux nuances d'alliage d'aluminium, l'**AU4G** de la famille 2000 et l'**AG3** de la famille 5000.

- ✚ AU4G (2017A) qui est un alliage utilisé en aéronautique, il entre dans la construction du fuselage et voilures d'avion. En général, il est utilisé pour des pièces soumises à des contraintes, il fait partie de la famille des Alliages "Durs".

La composition chimique de cet alliage est donnée dans le tableau (IV.1) suivant :

TABLEAU IV.1- La composition de l'AU4G.

Elément	Mn	Cu	Mg	Si	Al
Composition(%)	0.5	4	0.7	0.5	reste

✚ AG3 : c'est un alliage moins dur que l'AU4G, mais cela n'empêche pas son utilisation en carrosserie, car les premiers carrossiers d'automobile ont été en AG3. 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 est donnée dans le tableau (IV.2) suivant :

TABLEAU IV.2- Composition de l'AG3.

Elément	Mn	Mg	Cr	Al
Composition(%)	0.3	3.1	0.3	reste

IV.2.2 LES DEPOTS

IV.2.2.1 LA SOUS COUCHE D'ACCROCHAGE

Pour assurer l'adhérence entre le dépôt et le substrat, nous avons utilisé une sous couche d'accrochage qui est l'aluminure de nickel (**NIAL**) ou **75E**, son épaisseur est d'ordre de **80μ**.

IV.2.2.2 LE REVETEMENT

Le revêtement utilisé est la thermanit désignée par **55 E**, c'est un acier inoxydable réfractaire utilisé comme une barrière thermique qui résiste contre l'usure aux frottements et contre la corrosion. Sa limite élastique et sa résistance maximale à la traction qui sont respectivement de 470 et 620 MPa.

Sa composition chimique est présentée dans le Tableau (IV.3) suivant :

TABLEAU IV.3- Composition chimique de la Thermanit.

Elément	Fe	Cr	Mn	Ni	C	Al	Cu	Si	Sn
Composition(%)	66.6	18.5	8.1	5.5	0.123	-	-	-	-

- Cette composition confirme la nuance d'acier inoxydable : **X12 Cr Mn Ni 18-8-5**.

IV.3 ELABORATION DES ECHANTILLONS PAR PROJECTION THERMIQUE

IV.3.1 PREPARATION DE SURFACE

Pour cette opération, on a choisi quatre états de surfaces différents, Afin de faire une étude sur la qualité et l'adhérence du revêtement en fonction de la rugosité et le décapage chimique des substrats.

IV.3.1.1 DECAPAGE

Il permet d'éliminer les graisses et les impuretés en surface, mais surtout éliminer la couche d'oxyde d'alumine (Al_2O_3) qui s'est formée (une couche protectrice contre la corrosion), et qui joue le rôle d'une barrière de diffusion.

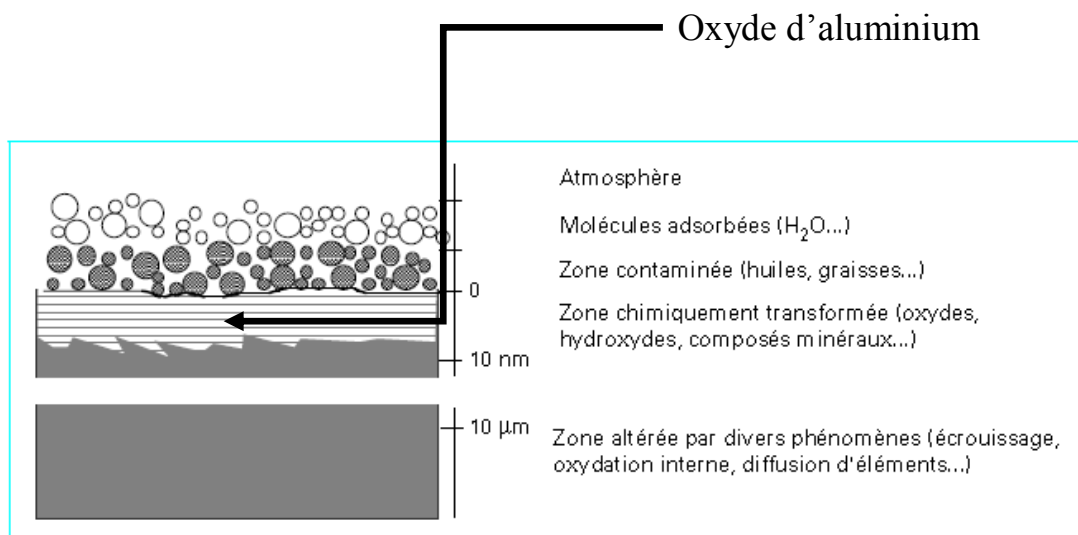


FIGURE IV.1 -Représentation schématique d'une surface métallique industrielle.

Dans notre cas, on a utilisé la technique de décapage par Zincate, qui est adapté aux alliages d'aluminium, utilisant le caractère fortement électronégatif du Zinc, elle comprend les étapes qui sont schématisées dans la **FIGURE (IV.2)** suivante :

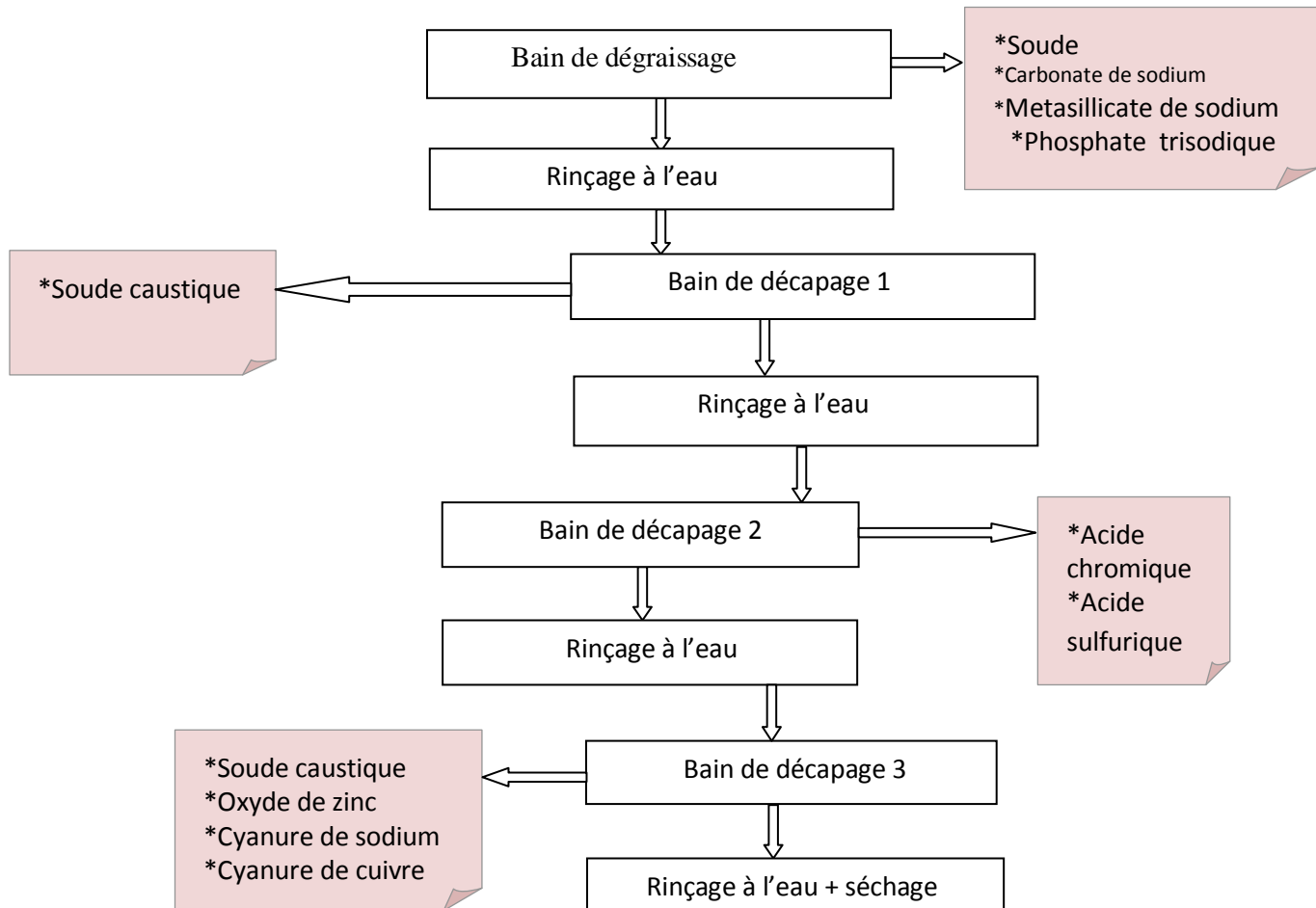


FIGURE IV.2 - Etapes du processus de décapage d'aluminium.

IV.3.2 Les états de surface choisis pour les tests de flexion 3 points

Pour voir l'influence du décapage et la préparation de surface sur l'adhérence de nos deux multi-matériaux, et afin de faire une étude comparative, on a sélectionné ses états de surface qui se différencient entre eux par ces paramètres, qui sont :

- a. Sablage
- b. Décapage

Donc en tout, on va avoir ses états de surface :

- ✚ Eprouvette sablée + projection ;
- ✚ Eprouvette Brut (telles qu'elles sont été livrées par le fournisseur) + décapage + projection ;
- ✚ Eprouvette sablée + décapage + projection.

IV.3.3 Les états de surface choisis pour l'étude de l'influence du post-traitement sur l'adhérence

Les éprouvettes ont été préparées de telle façon à avoir une rugosité croissante. On a choisi trois états de surface qui sont :

- 1- Etat sablé, préparé avec projection par jet de la grenaille de fonte sur la surface de l'éprouvette;
- 2- Etat brut (telles qu'elles sont été livrées par le fournisseur) ;
- 3- Etat 1200, préparé avec un papier abrasif 1200.

Remarque : pour cette étude on a décapé toutes les éprouvettes, on a choisi de travailler sur l'alliage AG3.

IV.3.4 Mesure de la rugosité des éprouvettes

Cette opération a été effectuée au niveau de l'école nationale préparatoire aux études d'ingénierie (ENPI) sur un rugosimètre portable de type **Perthometer Garant H1**.

Le **Perthometer Garant H1** est un appareil de mesure de rugosité très maniable, idéale pour l'utilisation mobile dans des conditions d'atelier. L'étendue de mesure maximale est de 150 μm . L'unité d'avance PFM permet, sans problème, des mesures dans toutes les positions.



FIGURE IV.3 - Rugosimètre portable de type H1.

Les paramètres de la rugosité (ISO 4287) :

- Paramètres d'amplitude
- Moyenne des ordonnées
 - ❖ Ecart moyen arithmétique : (Ra)

Moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées $Z(x)$ évaluée sur une longueur de base. R_a représente la variation moyenne de profil par rapport à la ligne moyenne. C'est le paramètre le plus courant dans l'industrie. Mathématiquement, R_a est calculé comme étant la distance moyenne entre les points du profil de rugosité est la ligne moyenne.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx$$

Les paramètres (ISO4287, 12085, 13565)

Parmi la cinquantaine de paramètres différents permettant de caractériser les états de surface, tous sont pas normalisés, d'autres comme R_z , R_y ou R_m ont disparu et d'autres sont normalisés, mais non utilisés. Devant le choix important, les critères les plus utilisés sont R_a ou R_c ce qui donne beaucoup de cas satisfait plus le dessinateur que la fonction de la surface.

IV.3.5 Métallisation

La métallisation est effectuée par passes successives pour éviter tout échauffement nuisible.

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 **FIGURE (IV.4)**.

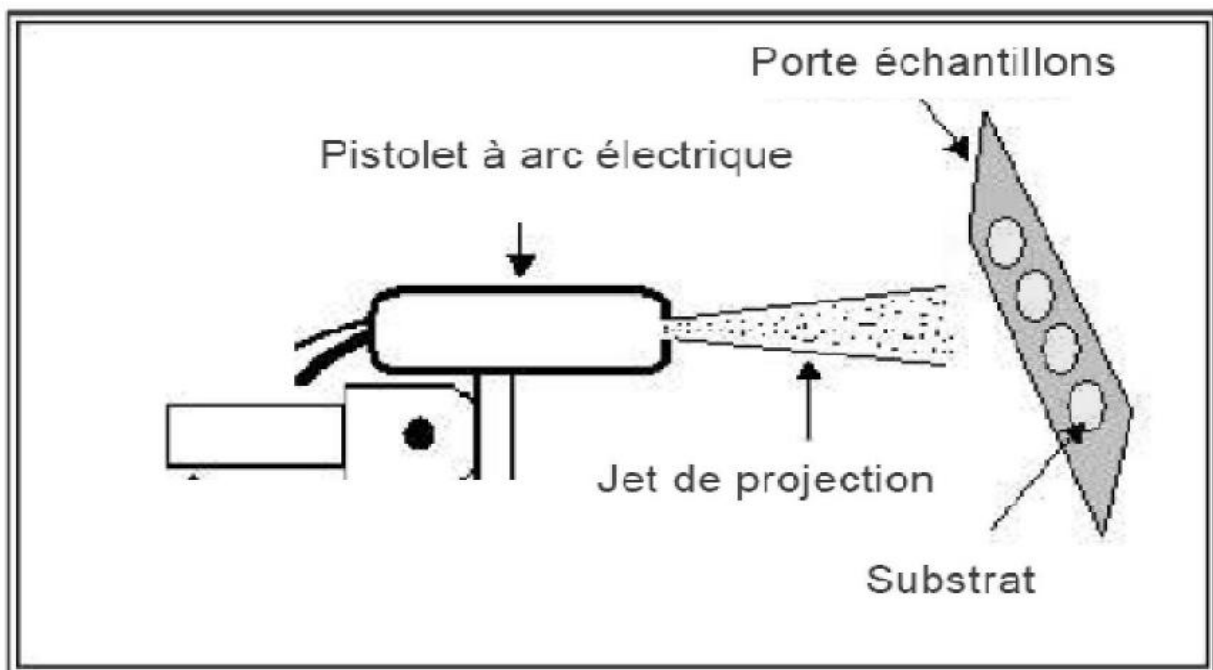


FIGURE IV.4 - Technique de projection par arc électrique.

IV.3.5.1 Pistolet de projection

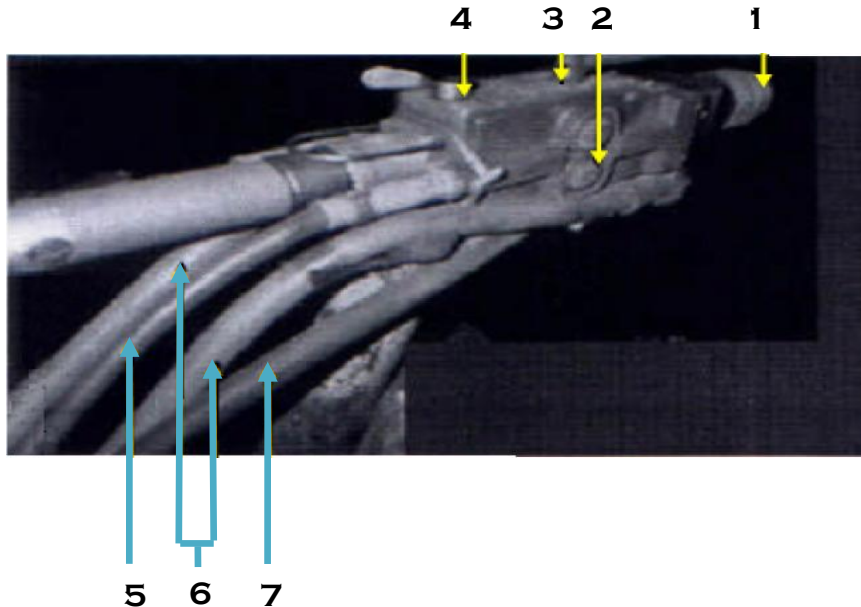


FIGURE IV.5 - Pistolet de projection à l'arc électrique type THRMO-SPRAY 234.

C'est un appareil portatif très maniable, présentant une souplesse et rapidité au travail. 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.5).

- 1**- Chalumeau interchangeable ;
- 2**- Molettes ;
- 3**- Commande de démarrage (on, off) ;
- 4**- Commande de molettes ;
- 5**- Tuyau porte fil de projection ;
- 6**- Câble d'alimentation ;
- 7**- Raccord rapide d'air.

Son principe consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables. Le métal fondu, est ensuite projeté sur le support à revêtir par un jet d'air comprimé.

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. L'application d'un courant électrique sur les fils génère un arc électrique qui permet de les

fondre (température d'environ 6000 °C). Les fils fondus sont alors pulvérisés grâce à un jet d'air comprimé et projetés sur le substrat pour former le dépôt.

IV.3.5.2 Les paramètres de projection

Il est recommandé de respecter certains paramètres préconisés par le constructeur selon les matériaux utilisés, pour que le revêtement s'adhère le mieux possible avec notre substrat, et qui sont données par le **TABLEAU (IV.4)**.

TABLEAU IV.4 - Paramètres de mise en service du pistolet.

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 du générateur	30 V
Intensité du courant	100 A

Certains autres paramètres de projection (distance de projection, vitesse de rotation de la cible, débit de matière projetée, angle de projection...) qui ont une influence sur la qualité du revêtement, sont présentés dans le **TABLEAU (IV.5)**.

TABLEAU IV.5 - Paramètres de projection.

Distance de projection	140 mm
Vitesse de rotation de la cible	16 trs/min
Angle de tir	90°
Vitesse d'avance de la buse	4 mm/tr

IV.3.5.3 Les éprouvettes après projection



Eprouvette destinée pour la préparation métallographique afin d'effectuer des analyses au microscope optique et les tests de microdureté.

FIGURE IV.6 - Image du revêtement finale.

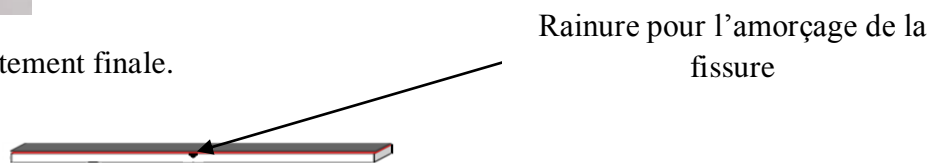


FIGURE IV.7 - Eprouvette destinée à la flexion.

IV.4 Techniques de caractérisation

IV.4.1 Analyse métallographique

L'analyse métallographique est la première opération utilisée pour contrôler la qualité d'un dépôt, a pour objectif de révéler la structure des couches projetées et de mettre en évidence toute transformation ou interdiffusion possibles au niveau de l'interface.

IV.4.1.1 Polissage mécanique

Afin de révéler la structure et la surface du dépôt on a procédé à un polissage avec du papier abrasif de granulométrie croissante qui sont :

1. Papier 120, 600, 1000, 1200.
2. Papier de finition + pâte diamantée.

Un nettoyage à l'acétone 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 et de flexion ont été effectuées.

IV.4.1.2 Microscopie optique

Cette opération est réalisée à l'aide d'un microscope métallographique optique **OLYMPUS BX51M** en lumière directe connecté à un micro-ordinateur. Cette analyse nous a permis de porter les premières remarques concernant la qualité du dépôt.

IV.5 Etude de la micro-dureté

Les mesures de micro-dureté ont été effectuées sur la surface de l'échantillon en faisant une succession de pointés selon une même direction, en allant du dépôt vers le substrat.

La valeur de la micro-dureté obtenue pour une charge de 100g représente la moyenne arithmétique de trois tests linéaires transversalement, en allant du dépôt au substrat.

Dans notre cas on a appliqué une charge de 300gf sur la surface perpendiculaire au substrat et au revêtement pendant 15 seconde, sans choc ni vibration.



FIGURE IV.8 - Microduromètre utilisé.

L'indice de micro-dureté Vickers Hv est donné par le rapport de la force P à une surface caractéristique de l'empreinte résiduelle observée après retrait de l'indenteur.

$$Hv = P/S; Hv = [2P \sin (136/2)]/d^2; Hv = 1.854 P/d^2$$

Avec:

HV: dureté Vickers en kg/mm²;

P : la charge en Kg appliquée par le pénétrateur ;

S : la surface latérale en mm² de l'empreinte pyramide ;

D : la longueur de la diagonale de l'empreinte en micromètre.

IV.6 Caractérisation de l'adhérence (test de flexion 3 points)

Le travail consiste au premier temps, de réaliser des appuis de flexion à trois points compatible avec les dimensions des éprouvettes. L'essai a été effectué sur des éprouvettes AG3/NiAl/Thermanit et AU4G/NiAl/Thermanit. La machine utilisée est une machine de traction INSTRON de type MAB SKF UE40 de capacité de 400 KN, les résultats sont directement affichés sur un ordinateur.

IV.7 Poste traitement

Dans cette expérience, on va étudier l'influence du post-traitement sur la qualité (l'adhérence) du revêtement. Pour cela, on fait subir un traitement thermique (400°C) à trois échantillons du multi-matériau (AG3) pendant des temps de maintien croissants.

Echantillons	sablé	Brut	1200
Temps	25 minutes, 3h4 mn et	et 14h	
	heures		

TABLEAU IV.6 - Post-traitement d'AG3, surface en fonction de du temps de maintien.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné une présentation générale sur les techniques et les procédés expérimentaux mis en œuvre pour élaborer ses multi-matériaux, ainsi que leurs caractérisations métallurgique et mécanique.

Chapitre V

Résultats et Interprétations

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents résultats obtenus et qui concernent la détermination de la rugosité, l'analyse métallographique, les mesures de la microdureté et l'estimation de l'adhérence.

V.2 Analyse et caractérisation des multi-matériaux

V.2.1 Détermination de la rugosité des substrats

Les résultats de la rugosité obtenus pour l'AU4G sont présentés dans le tableau suivant :

TABLEAU V.1 - Rugosité des différents états de surface (Cas de l'AU4G).

Etat de surface	Sablé (S)	Brut (B)	1200 (Poli)
Ra (moyen)	9.959	5.460	2.400

Dans le cas de l'AG3, les résultats de la rugosité sont présentés dans le tableau suivant :

TABLEAU V.2 - Rugosité des différents états de surface (Cas de l'AG3).

Etat de surface	Sablé (S)	Brut (B)	1200 (Poli)
Ra (moyen)	8.217	4.756	2.250

Ces tableaux montrent la rugosité des états de surface imposée, telle que, $Ra_{\text{Sablé}} > Ra_{\text{Brut}} > Ra_{\text{1200}}$ pour les deux multi-matériaux étudiés. On remarque aussi une légère différence des valeurs de Ra entre l'AU4G et l'AG3 telle que, $Ra_{\text{AU4G}}(S, B \text{ et } 1200) > Ra_{\text{AG3}}(S, B \text{ et } 1200)$.

V.2.2 Caractérisation métallographique

La microstructure du dépôt réalisé par projection thermique dépend, d'une part des caractéristiques des particules à l'impact (vitesse, composition chimique, température, état de fusion, taille) et d'autre part, des caractéristiques du substrat (rugosité, température, propriétés physico-chimiques).

Les analyses relatives à la caractérisation métallographique des éprouvettes (avant essais) destinées aux essais de flexion 3 points sont présentées par les figures suivantes.

Remarque : les abréviations S, D et B désignent respectivement le substrat Sablé, Décapé et Brut.

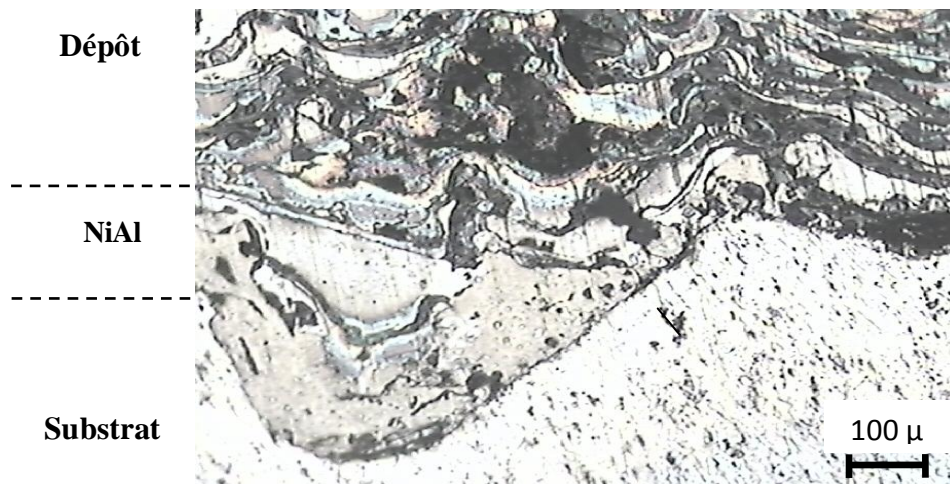


FIGURE V.1 - Métallographie du composite AG3/NiAl/ Thermanit, S+D.

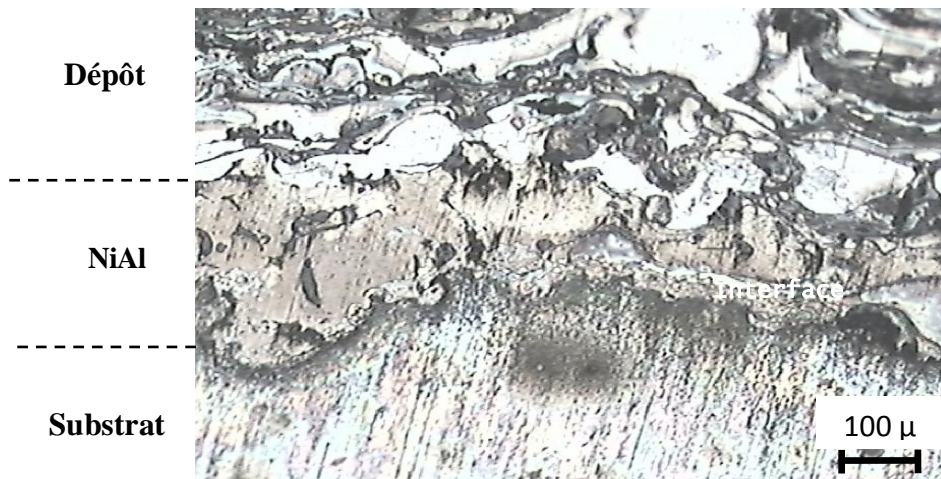


FIGURE V.2 – Métallographie du composite AG3/NiAl/ Thermanit, S.



FIGURE V.3 - Métallographie du composite AG3/NiAl/ Thermanit, B+D.

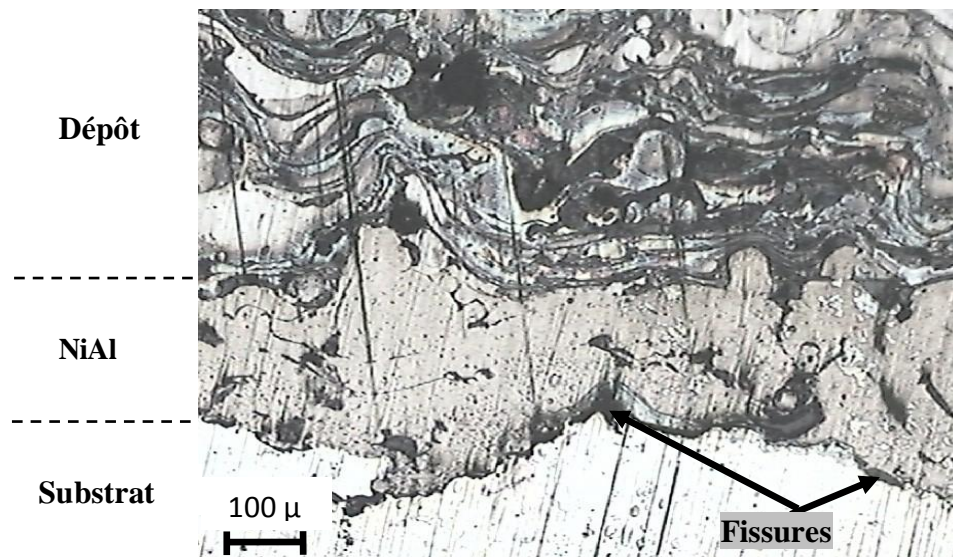


FIGURE V.4 – Métallographie du composite AU4G/NiAl/ Thermanit, S+D.

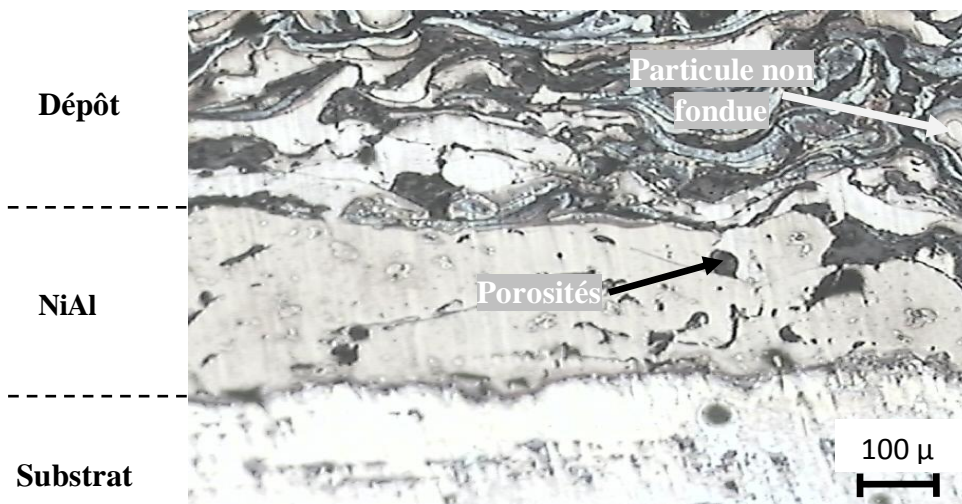


FIGURE V.5 – Métallographie du composite AU4G/NiAl/ Thermanit, S.



FIGURE V.6 - Métallographie du composite AU4G/NiAl/Thermanit, B+D.

• INTERPRÉTATIONS

Les observations réalisées par microscopie optique, effectuées selon une coupe transversale dans le cas des deux composites AG3/75E/Thermanit et AU4G/75E/Thermanit (**FIGURES V.1, V.2, V.3, V.4, V.5 et V.6**) montrent d'une manière générale, une structure lamellaire des dépôts élaborés par projection thermique. Aussi, on note que :

- ✚ les structures blanches et grises indiquent des structures de haute densité avec la présence d'oxydes de projection (plages grises localisées entre les lamelles du dépôt) et de porosités (zones noirs).
- ✚ Les particules sous forme sphérique présentent la matière non fondue.
- ✚ La zone claire (un peu jaunâtre) entre le substrat et le dépôt final est la Sous Couche d'Accrochage NiAl (75E). Celle-ci améliore l'adhérence et joue le rôle de liant de la Thermanit (revêtement finale de protection) sur le substrat.

V.2.3 Caractérisation de l'adhérence

Cette partie est la plus importante dans notre étude car elle révèle l'adhérence des multi-matériaux en relation avec la rugosité et la préparation des surfaces. La caractérisation est d'ordre mécanique et mécanique sous contraintes thermiques (suite à un post-traitement).

V.2.3.1 Caractérisation mécanique

V.2.3.1.A Essais de micro-dureté

Ces essais vont nous montrer l'influence de la rugosité (R_a) ainsi que la préparation de surface (B+D, S+D, S et B) sur l'évolution de la micro-dureté Hv des deux couples élaborés (AU4G/NiAl/ Thermanit) et (AG3/NiAl/Thermanit).

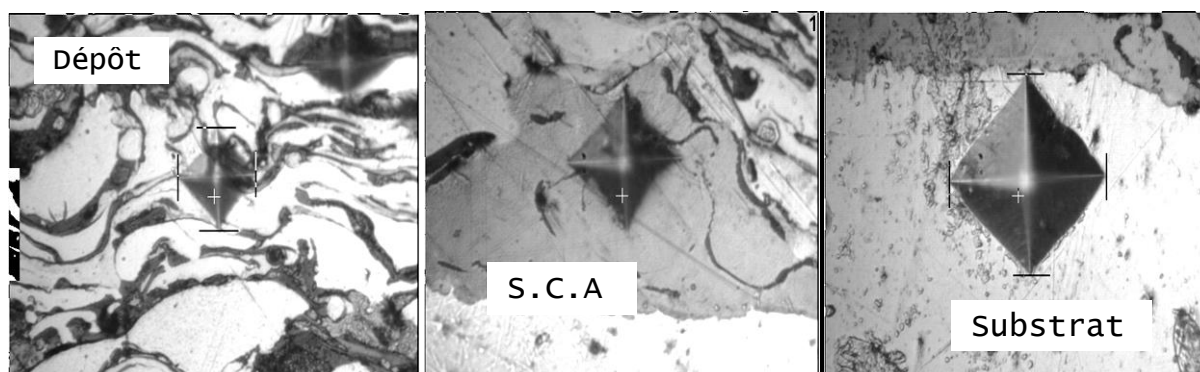


FIGURE V.7 - Empreintes de la micro-dureté Hv, cas du composite AU4G/NiAl/Thermanit.

Pour la même charge appliquée (300g), on remarque que la taille de la pyramide est plus grande dans le substrat, petite dans le dépôt et moyenne pour la Sous Couche d'Accrochage,

ce qui montre la diminution de la dureté Hv du dépôt vers le substrat pour tous les multi-matériaux étudiés

❖ Evolution de la micro-dureté Hv, cas de l'AU4G.

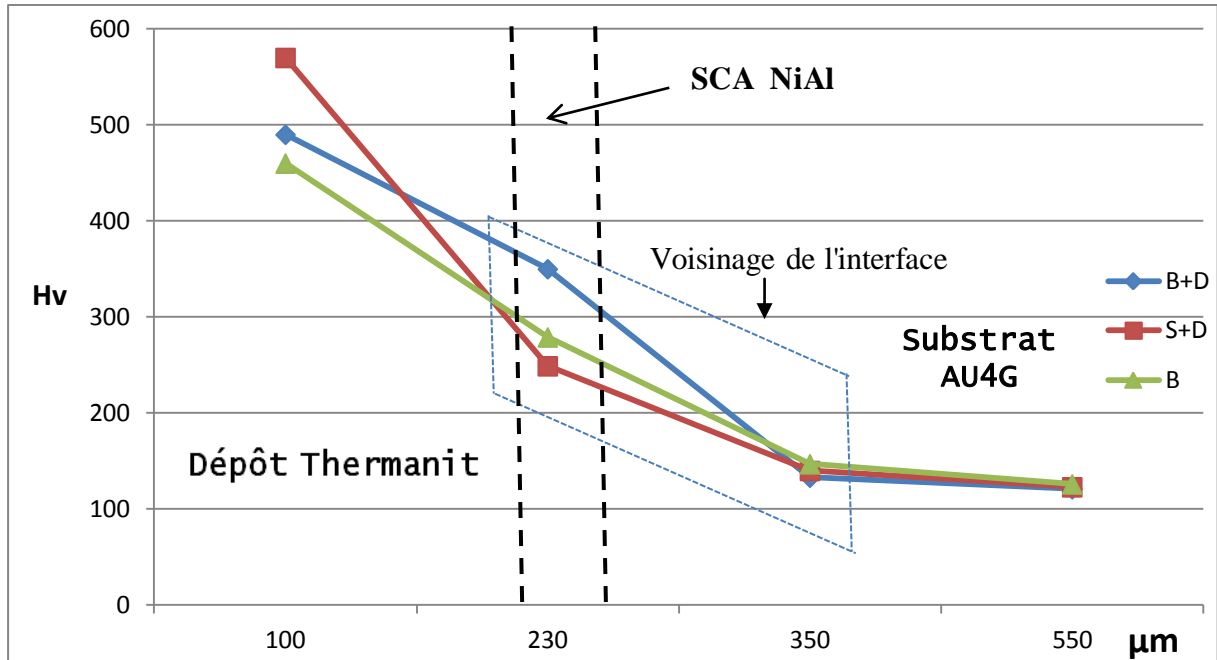


FIGURE V.8 - Profil de la micro-dureté du multi-matériau base d'AU4G.

❖ Evolution de la micro-dureté Hv, cas de l'AG3.

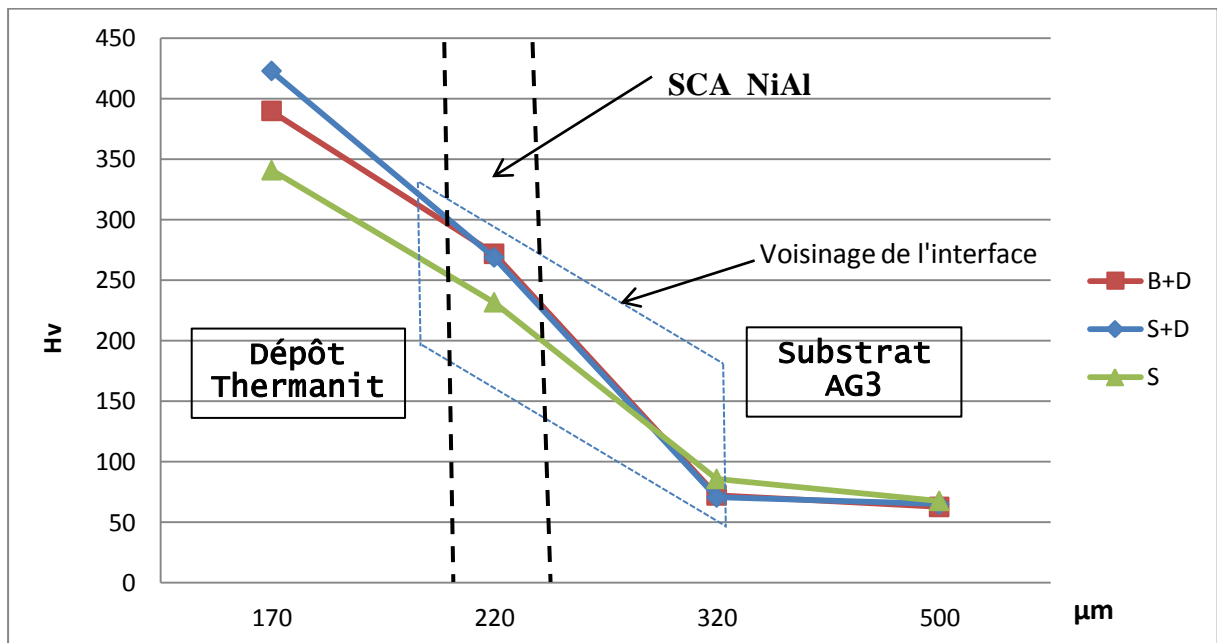


FIGURE V.9 - Profil de la micro-dureté du multi-matériau à base d'AG3.

- **INTERPRÉTATIONS ET DISCUSSIONS**

Ce qui nous intéresse dans cette partie, c'est la zone au voisinage de l'interface. Les figures V.8 et V.9 montrent l'influence de l'état de surface sur l'évolution de la micro-dureté Hv des deux multi-matériaux (AU4G/NiAl/Thermanit) et (AG3/NiAl/Thermanit).

Pour les zones proches de la couche d'accrochage (côté substrat), on relève une microdureté supérieure à celle du substrat dans le cas des deux composites (**FIGURES V.8 ET V.9**). Aussi, on constate que le dépôt (Thermanit) a une dureté bien meilleure que celle du substrat.

AU4G et au voisinage de l'interface (**FIGURE V.8**)

- Les valeurs Hv des 3 courbes sont très proches, la microdureté dans le cas B+D est plus grande que celle du cas S+D. Cette différence se traduit éventuellement par la présence des porosités plus importantes dans le cas sablé par rapport au brut. Le Sablage crée des reliefs qui sont bons pour l'accrochage mécanique mais qui peuvent présenter des porosités au niveau de l'interface, contrairement au Brut avec un faible accrochage mais une surface pleine.
- On remarque aussi que la microdureté dans le cas du B < à celle du cas B+D. Eventuellement à cause de la présence du zinc produit du décapage. On sait aussi que l'alumine (l' Al_2O_3) joue le rôle d'une barrière de diffusion, donc l'adhérence sera plus importante entre substrat/dépôt dans le cas B+D que dans B.

AG3 et au voisinage de l'interface (**FIGURE V.9**)

- On constate que la Hv B et Hv S+D ne sont pas différentes.

Alors que dans le cas de S et S+D on remarque que la Hv S+D > Hv S, ce qui s'explique par la présence de la couche d'alumine dans le S, ce qui joue le rôle d'une barrière thermique contre la diffusion ce qui implique une faible adhérence par rapport à (S+D).

V.2.3.1.B Essais de flexion 3 points

Pour cette étude, on a pris en considération trois conditions différentes (état de surface) pour les deux composites élaborés. Ainsi, on a utilisé les paramètres d'essai mécanique suivants : vitesse de déplacement = 0.40 mm/mn, la charge appliquée = 400 KN.

✚ A. COMPOSITE AG3/NiAl/THERMANIT

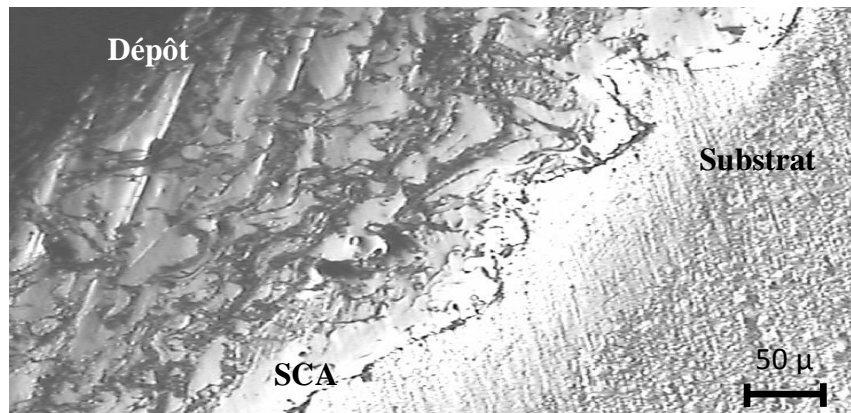


FIGURE V.10 - Métallographie d' AG3-S+D/SCA/Dépôt après flexion.

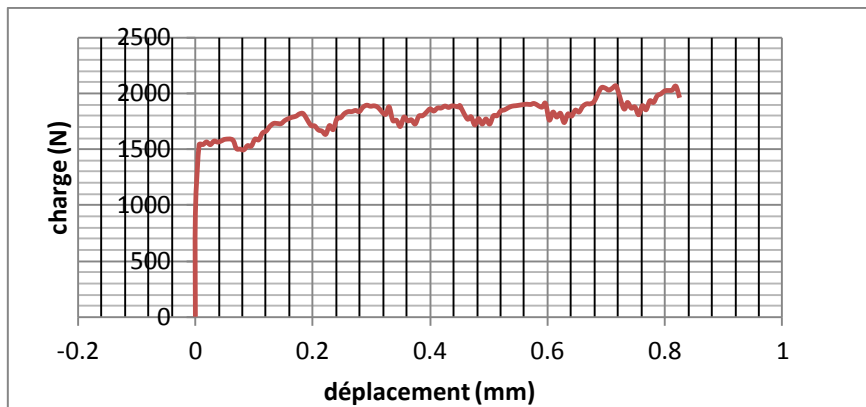


FIGURE V.11 - Courbe de flexion d' AG3-S+D/SCA/Dépôt.

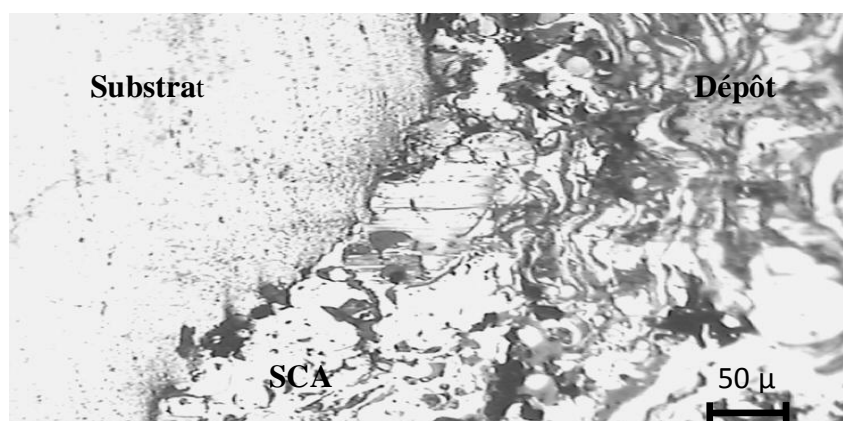


FIGURE V.12 - Métallographie du composite AG3-S/SCA/Dépôt après flexion.

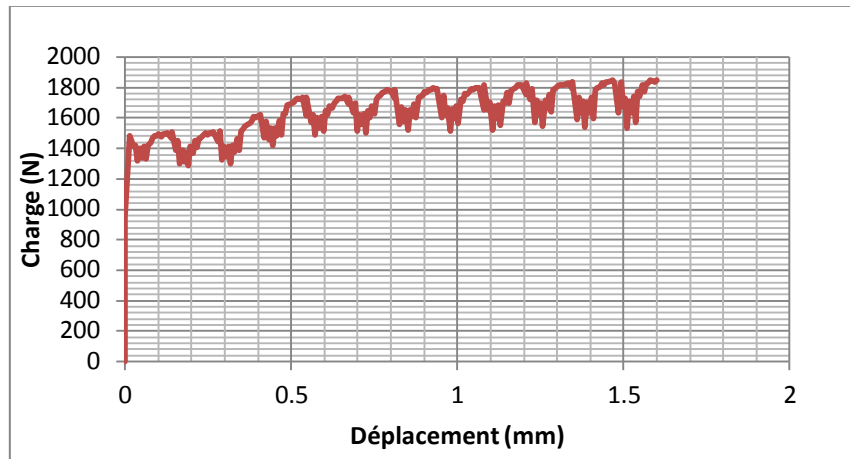


FIGURE V.13 - Courbe de flexion d'AG3-S/SCA/Dépôt.

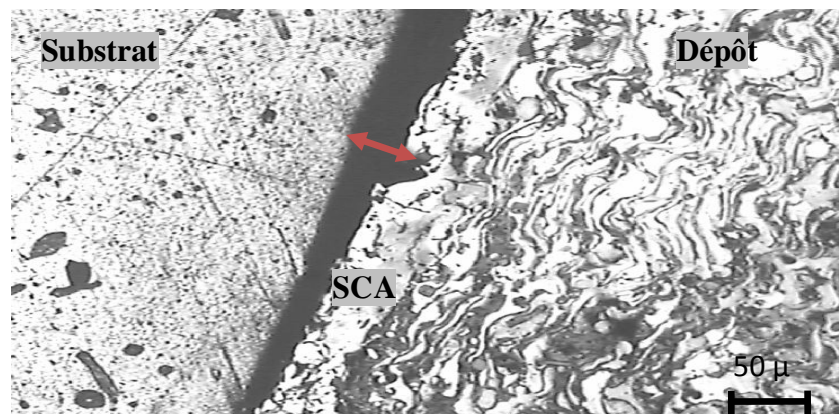


FIGURE V.14 - Métallographie du composite AG3-B+D/SCA/Dépôt après flexion.

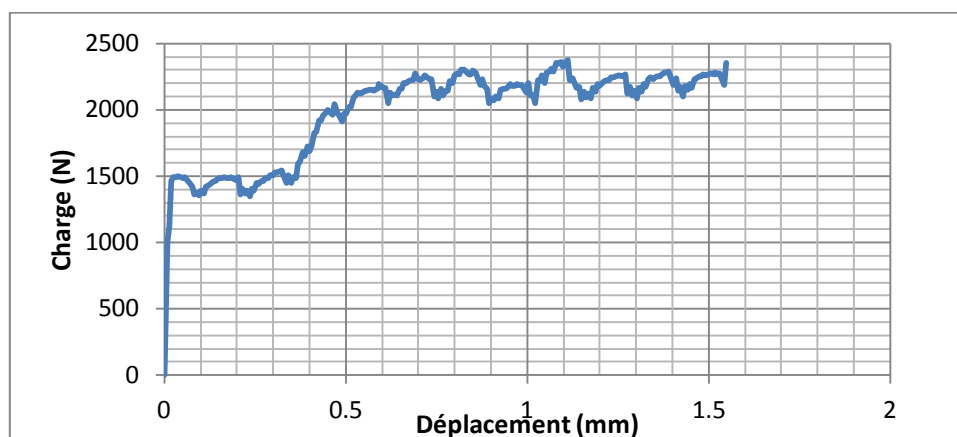


FIGURE V.15 - Courbe de flexion du composite AG3-B+D/SCA/Dépôt.

- On remarque que la fissuration se fait le long de l'interface.

✚ B - COMPOSITE AU4G/SCA/THERMANIT

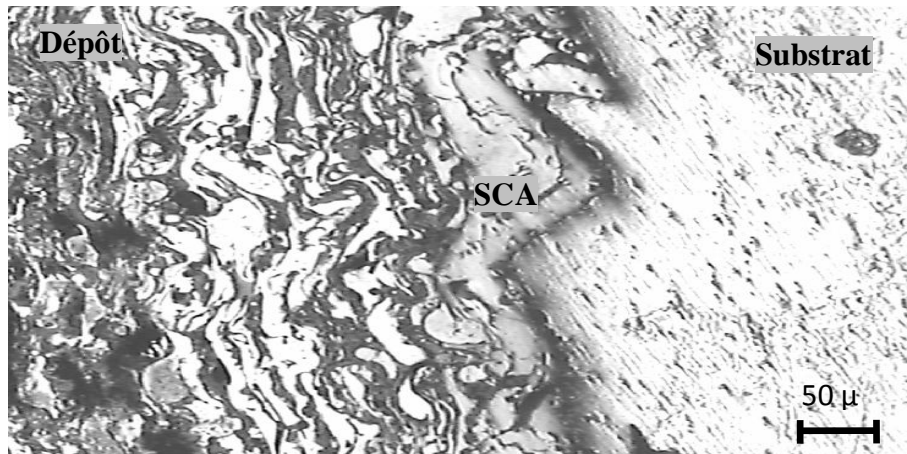


FIGURE V.16 – Métallographie du composite AU4G-S+D/SCA/Dépôt après flexion.

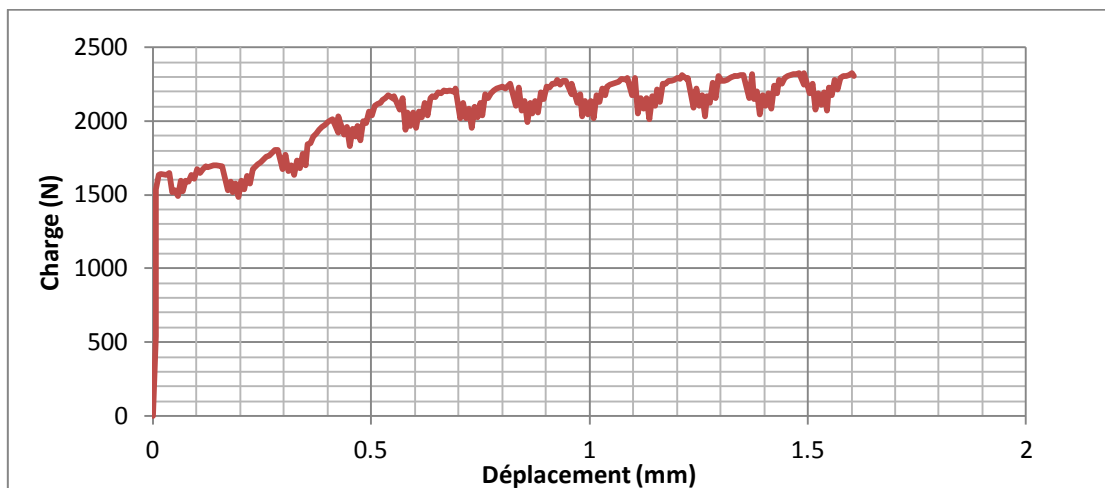


FIGURE V.17 - Courbe de flexion d' AU4G-S+D/SCA/Dépôt.

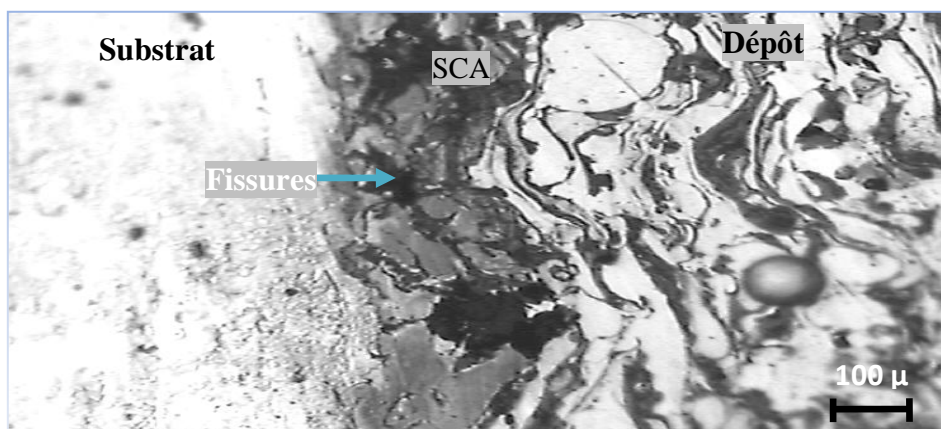


FIGURE V.18 - Métallographie du composite AU4G-S/SCA/Dépôt après flexion.

- La fissuration n'est pas continue et est localisée dans la couche d'accrochage.

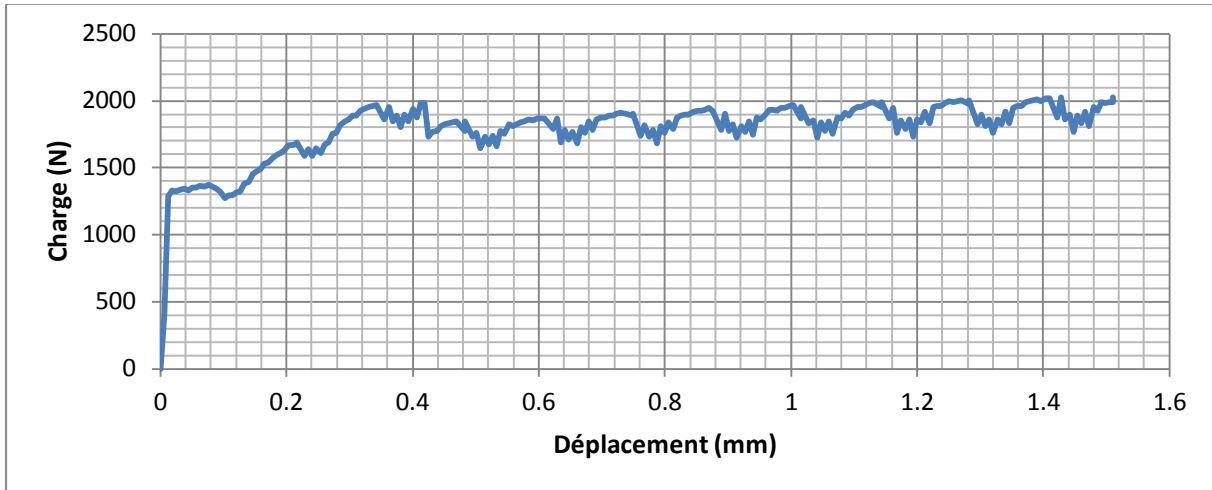


FIGURE V.19 - Courbe de flexion d'AU4G-S/SCA/Dépôt.

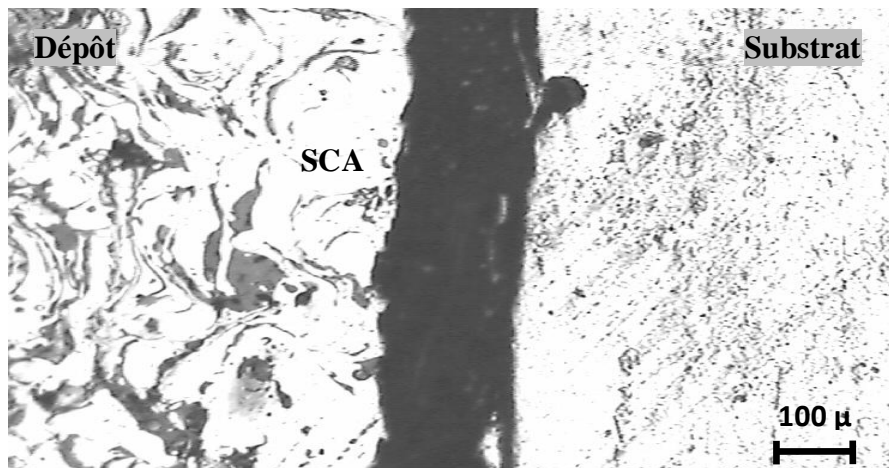


FIGURE V.20 - Métallographie du composite AU4G-B+D/SCA/Dépôt après flexion.

- Dans ce cas aussi, on remarque une délamination complète.

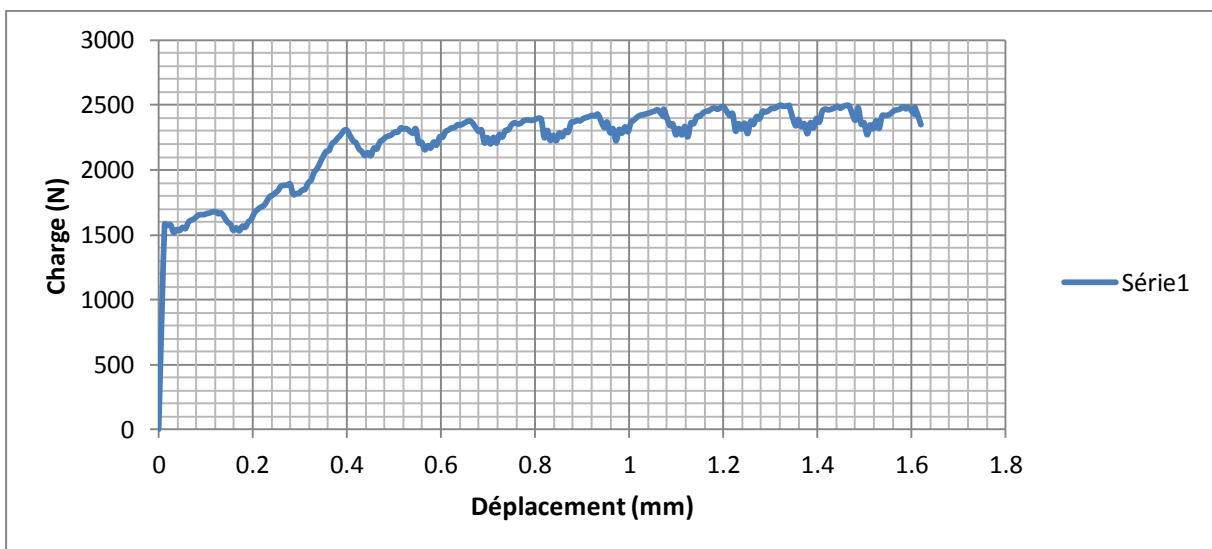


FIGURE V.21 - Courbe de flexion d'AU4G-B+D/SCA/Dépôt.

- **RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

Les figures (V.10, V.12, V.14, V.16, V.18 et V.20), illustrent la propagation des fissures le long de l'interface des différents multi-matériaux à base d'AG3 et d'AU4G et cela après l'essai de flexion 3 points.

La fissuration est faible dans le cas AG3-S+D et AU4G-S+D (figures V.10 et V.16), un peu plus accentuée pour l'AG3+S et l'AU4G-S (figures V.12 et V.18) et assez importante dans le cas de l'AG3-B+D et l'AU4G-B+D (figures V.14 et V.20).

Pour l'AG3-S+D et l'AU4G-S+D, la rugosité de surface préparée avec le sablage favorise un très bon accrochage mécanique entre le dépôt et le substrat. Aussi, l'élimination de la couche d'alumine grâce au décapage a renforcé l'adhésion du dépôt, ce qui est montré par l'observation micrographique (figures V.10 et V.16). Malgré une même rugosité pour les deux composites, on note un taux de fissuration plus important dans le cas non décapé, grâce à l'élimination de la couche d'alumine qui semble jouer un rôle néfaste contre l'adhérence en bloquant la diffusion à l'interface dépôt/substrat (figure V.12 et V.18).

Alors que pour l'AG3-B+D et l'AU4G-B+D, l'influence de la rugosité est très marquante (figures V.14 et V.20), puisqu'on obtient un décollement considérable entre dépôt/substrat malgré la présence du décapage. Ce décollement s'explique par un faible accrochage mécanique substrat/dépôt, car la rugosité est faible ($Ra_{B_{AG3}}=5.460$; $Ra_{B_{AU4G}}=4.756$ et $Ra_{S_{AG3}}=9.959$; $Ra_{S_{AU4G}}=8.217$).

La rugosité diminue aussi les contraintes résiduelles générées au sein du dépôt en empêchant leur addition par la séparation des grains écrasés, notamment pour les contraintes parallèles au substrat qui tendent à provoquer le décollement des dépôts.

Ces interprétations sont renforcées par les résultats tirés des courbes de flexion qui présentent différentes limites élastiques des couples.

TABLEAU V.3 - Limites élastiques des différents couples à base d'AG3 et d'AU4G.

Etat de surface	AG3	AU4G
S+D	1600 N	1650 N
S	1440 N	1350 N
B+D	1500 N	1550 N

Ces valeurs présentent des résultats plus au moins différents mais très proches classés comme suit : $S+D > B+D > S$. Cette étude montre que l'adhérence est meilleure dans le cas $S+D$ pour les deux composites bases de l'AG3 et de l'AU4G.

Composite AU4G/NiAl/Thermanit

Le décapage de la surface a fait augmenter la limite élastique du couple de 300N (S et $S+D$).

Par contre, la rugosité l'a augmenté de 100N ($B+D$ et $S+D$).

Composite AG3/NiAl/Thermanit

Dans ce cas là, le décapage de la surface a fait augmenter la limite élastique du couple de 160N (S et $S+D$) et la rugosité de 100N (B et $S+D$).

Ces résultats renforcent nos hypothèses et nos interprétations avancées par les observations métallographiques précédentes.

V.2.3.2. Influence du post-traitement

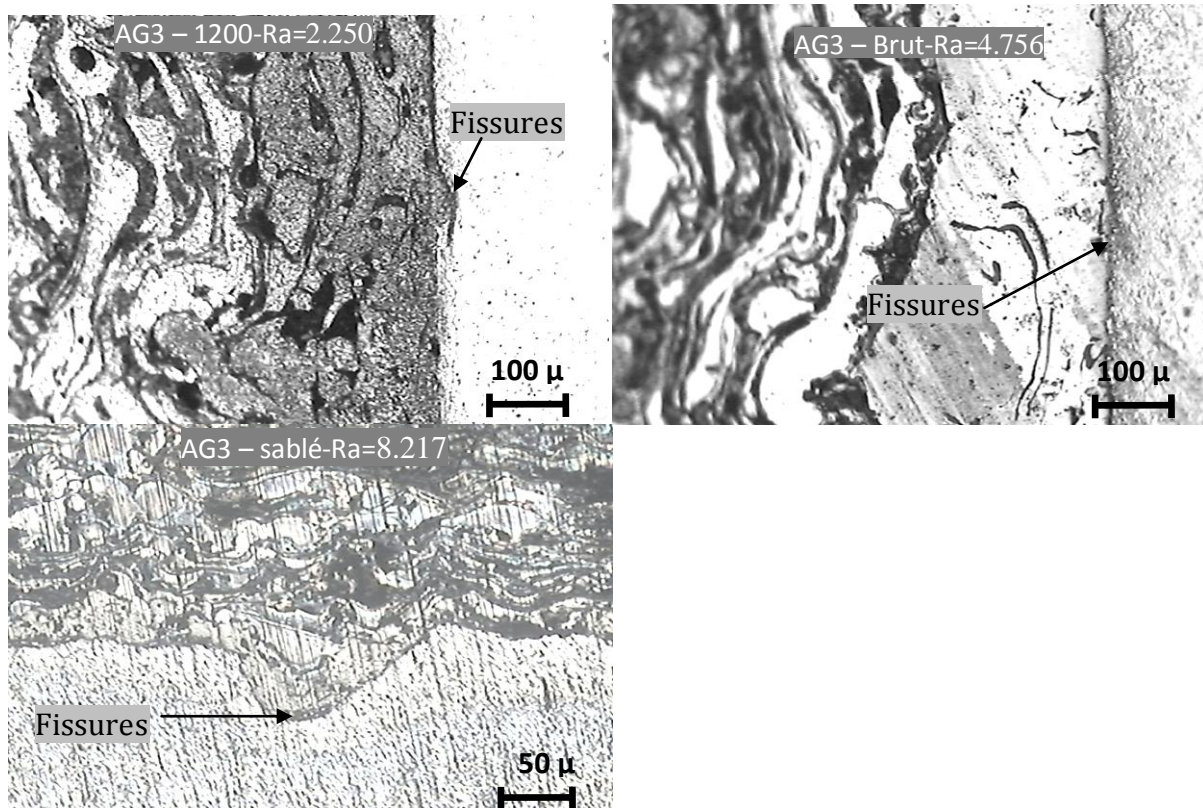


FIGURE V.22 - Composites AG3/NiAl/Thermanit avant traitement thermique.

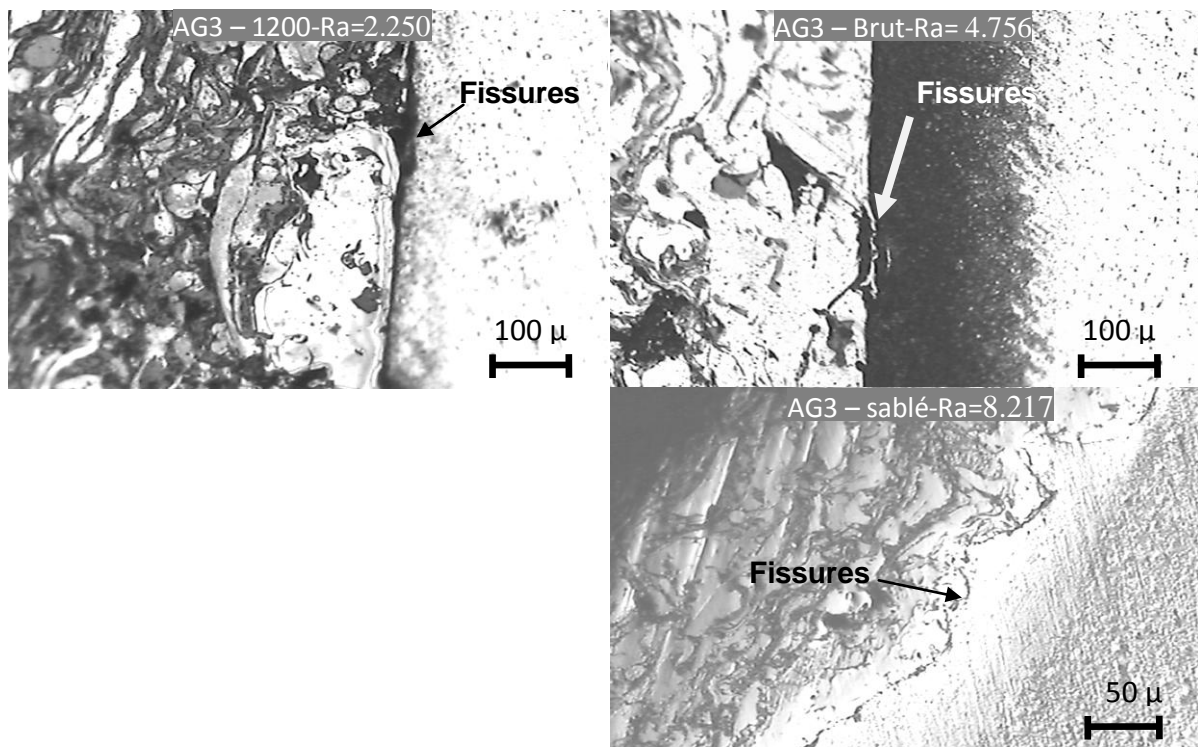


FIGURE V.23 - Composites AG3/NiAl/Thermanit, traitement thermique à l'air de 25 mn.

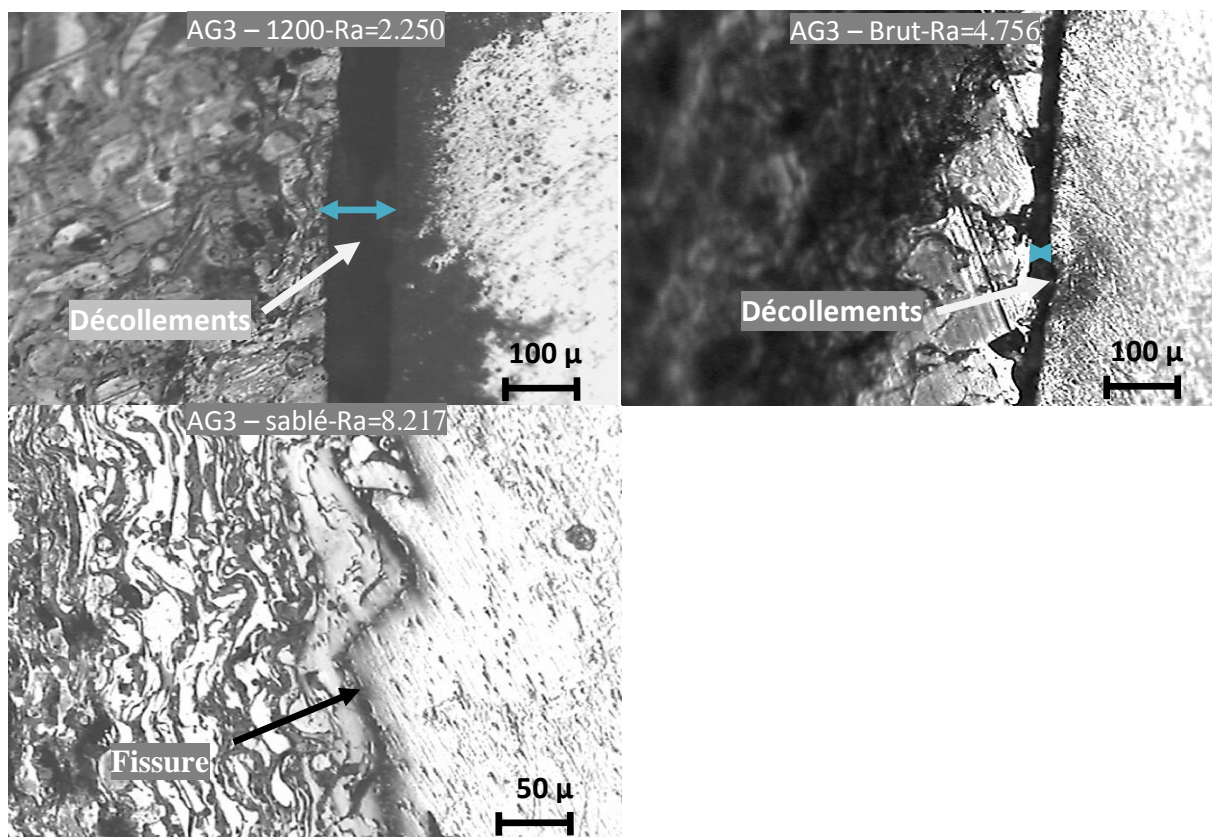


FIGURE V.24 - Composites AG3/NiAl/Thermanit, traitement thermique de 3h40mn.

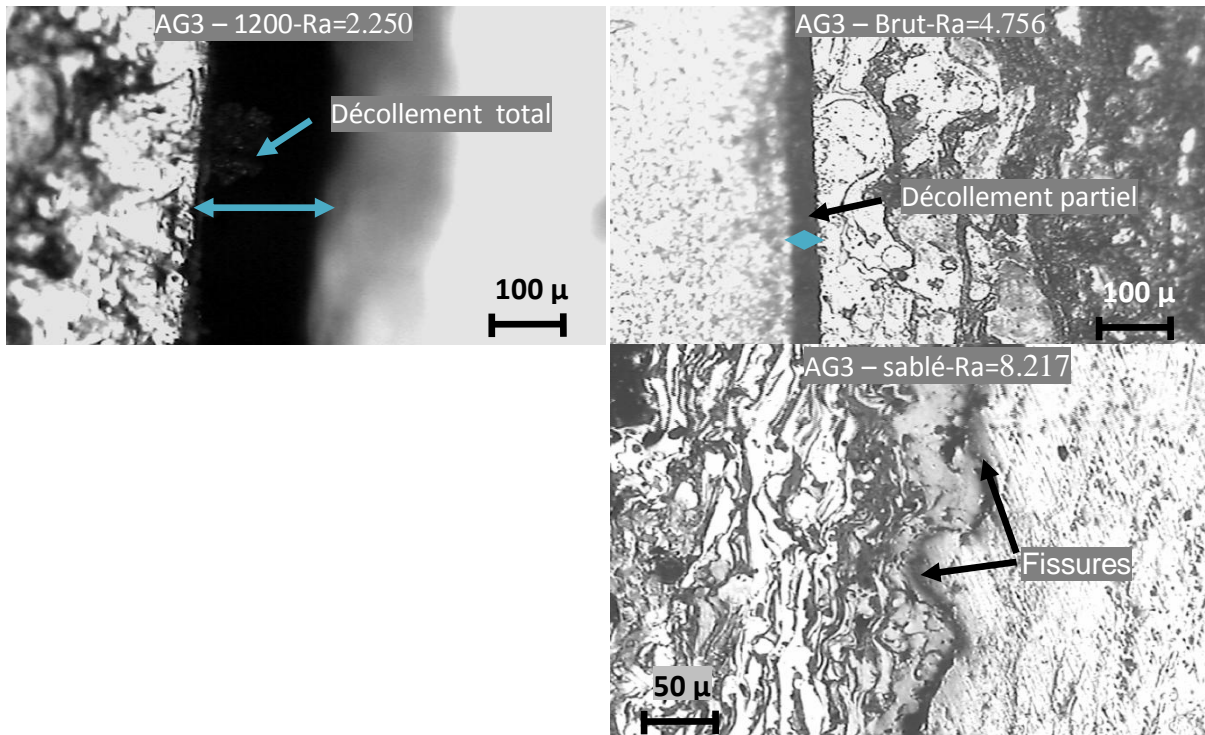


FIGURE V.25 - Composites AG3/NiAl/Thermanit, traitement thermique de 14h.

L'influence du post-traitement sur l'adhérence du dépôt avec l'AG3 en fonction des trois états de surface choisis est montrée par les différentes figures présentées ci-dessus.

On a relevé la propagation de la fissure le long de l'interface et l'estimation est présentée sur les graphes suivants.

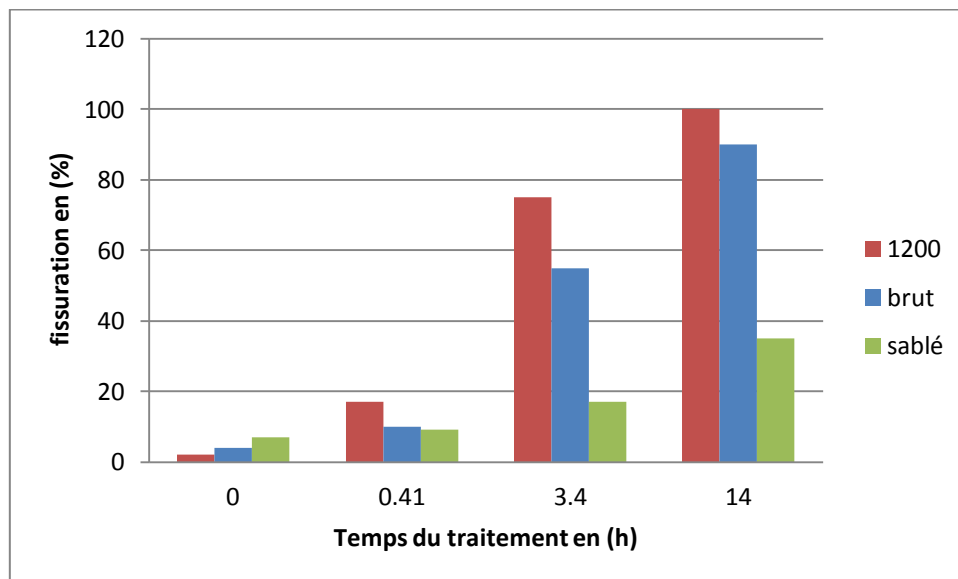


FIGURE V.26 - Taux de fissuration en fonction du temps du traitement et de la rugosité de surface.

- **Interprétations**

Ce diagramme montre clairement l'évolution du taux de fissuration du composé AG3/SCA/Dépôt. Les décollements sont causés au cours des traitements thermiques éventuellement par la différence des coefficients de dilatation thermique des antagonistes (SCA et l'AG3).

Avant traitement, le cas **1200** a le taux de fissuration le plus faible due à l'absence de porosités entre substrat/SCA, car la surface est lisse, donc bon étalement des particules projetées. De même pour le brut, sauf que la surface est moins lisse que le **1200**. Alors que pour le sablé, l'étalement des particules n'est pas facile, ce qui s'explique par la présence de porosités et des fissures à l'interface.

Les observations obtenues à partir des figures **V.22**, **V.23**, **V.24** et **V.25** ainsi que les résultats déduits de l'histogramme (**FIGURE V.26**) illustrent d'une façon claire l'influence de la rugosité sur l'adhérence des différents multi-matériaux élaborés et traités dans les mêmes conditions du post-traitement mis à part le temps de maintien.

Pour des maintiens de **0.41h**, **3h40** et **14h**, la fissuration augmente plus rapidement pour le **1200** et le **Brut**, mais reste faible pour le **Sablé**. Au bout de **14h** de maintien, le dépôt sur l'AG3-1200 s'est complètement décollé par contre, dans le cas du dépôt sur l'AG3-Brut le décollement est partiel avec un taux de 95% de fissurations. Pour le dépôt sur l'AG3-sablé, la fissuration présente un taux de 35%, ce qui s'explique par le fort accrochage mécanique revêtement/AG3-sablé. Cet accrochage reste faible dans les deux autres cas, à savoir AG3-1200 et AG3-Brut.

Ces résultats confirment l'hypothèse de l'influence de la rugosité des surfaces sur l'adhérence dans ce genre de multi-matériaux.

Afin de connaître le type de décollement qui s'est produit entre le dépôt et l'AG3-1200(Délaminage complet), on a effectué une observation des faciès de rupture avec un microscope optique **OLYMPUS BX51M** (figure **V.28**).

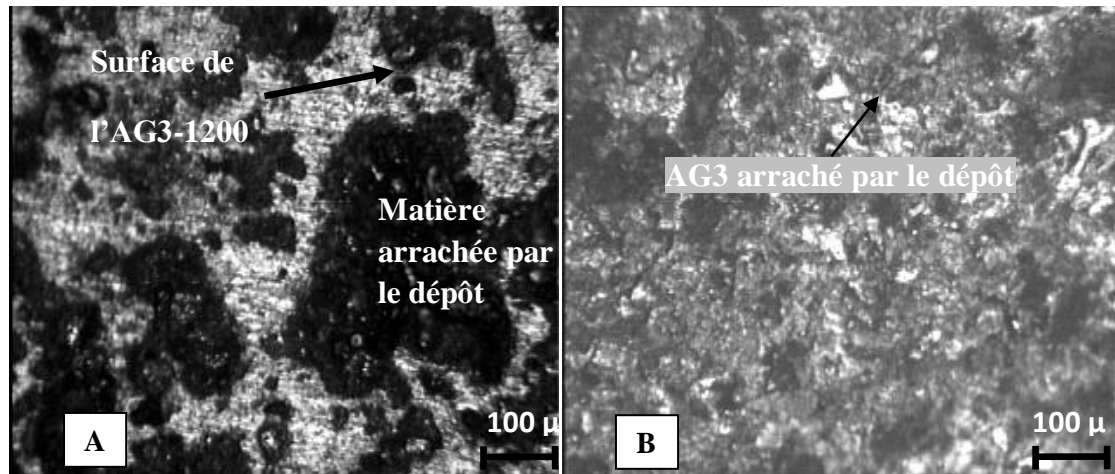


FIGURE V.27 - Faciès de rupture du substrat (AG3-1200) (A) et du dépôt (B).

- ❖ On a obtenu un décollement cohésif car le revêtement a arraché de la matière base AG3. A ce niveau, on explique ce phénomène par la différence de dureté qui existe entre la couche d'accrochage NiAl et l'alliage AG3.

V.3 Comportement en frottement-usure du revêtement

V.3.1 Calcul du volume d'usure du revêtement

L'une des caractéristiques recherchée par l'application des dépôts et les traitements de surfaces est la protection contre l'usure. Dans ce cadre, nous avons repris certains travaux [Réf Oussama] relatifs aux tests d'usure sur le couple AU4G/NiAl/Thermanit effectués par un **tribomètre bille/plan**. Notre objectif consiste à mesurer le volume d'usure obtenu dans le cas de ces composites.

Les paramètres de fonctionnement pour ce test, se résument comme suite :

- le tribomètre utilisé est de type bi-plan ;
- les charges appliquées sont 40N, 70N et 90N;
- la vitesse est de 60 tr/mn ;
- le nombre de cycles est de 2048 cycles ;
- la durée de l'essai est de 34 min 10 s.

La caractérisation physicochimique a été faite par un MEB *QUANTA 600-FEI* dont les images des traces obtenues sont présentées par la **FIGURE V.28**.

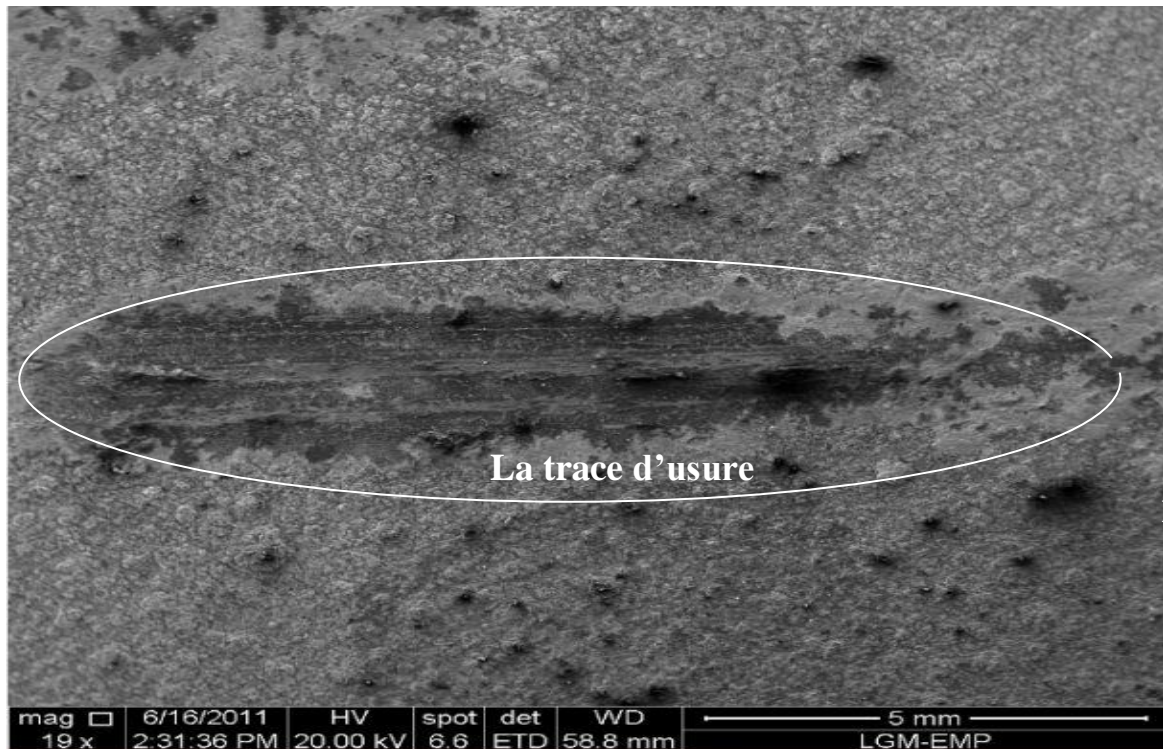


FIGURE V.29 - Images MEB des traces d'usure du couple Thermanit/NiAl/AU4G, F=90N.

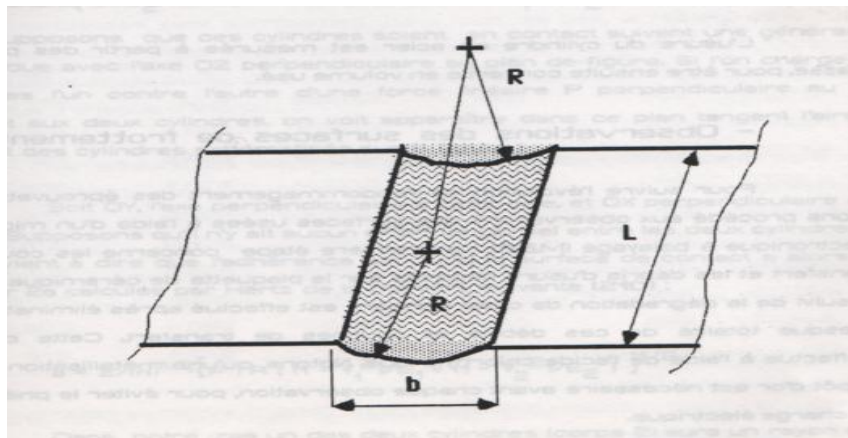


FIGURE V.30 - Représentation schématique de la trace d'usure.

Nous avons opté pour la relation suivante pour calculer le volume d'usure obtenu pour trois charges différentes (charges):

$$V = L (R^2 \sin^{-1} (b/2R) - b/4 (4R^2 - b^2)^{1/2})$$

V: volume d'usure;

L: longueur de la trace;

R : profondeur de la trace ;

b : largeur.

Calcul du volume d'usure des traces A, B et C.

TABLEAU V.4 - Volume usé en fonction de la charge appliquée, AU4G/NiAl/Thermanit.

Charge (N)	40	70	90
L (mm)	12	15	15
R (mm)	0.2	0.4	0.5
b (mm)	3	4	4.5
V (mm ³)	2.558	12.566	15.698

- **INTERPRÉTATIONS**

LE TABLEAU V.4 montre clairement l'influence de la variation de la charge appliquée sur le volume d'usure du dépôt.

On remarque que l'augmentation du volume d'usure évalué à cinq fois plus grand entre la charge de 40N et celle de 70N. Par contre, entre 70 et 90 N le volume d'usure n'a varié que de 3.132 mm³. Ceci peut s'expliquer par le fort taux d'écrouissage engendré par l'élévation de la charge à 90 N. L'écrouissage a augmenté la dureté de la surface du dépôt, ce qui rend le revêtement plus résistant au frottement et donc l'arrachement plus difficile de la matière.

Conclusion générale

A cause du mauvais comportement des alliages d'aluminium aéronautiques face à la fatigue thermique, les chercheurs font appel aux solutions appropriées, qui donnent à la surface spécifique de nouvelles propriétés adéquates aux sollicitations thermiques.

Les revêtements métalliques, en particulier ceux réalisés par projection, apportent des solutions efficaces aux problèmes d'usure par fatigue thermique, corrosion, la dégradation...etc. Ainsi, les couches projetées constituent une barrière protectrice du matériau de base. L'adhérence entre le matériau protecteur et le métal de base reste un problème pour les multi-matériaux. Néanmoins, on ne trouve pas beaucoup de travaux qui ont été réalisés pour montrer l'évolution de l'adhérence de ces composites en fonction de la rugosité et la préparation de leurs surfaces. C'est dans ce contexte qu'on a défini notre démarche en choisissant en particulier plusieurs états de surface et une préparation spécifique afin de faire ensuite une comparaison qualitative et quantitative de l'adhérence pour les différents multi-matériaux élaborés. Les analyses en microscopie optique nous ont permis de constater que :

- le revêtement comporte des pores, des particules non fondues, des microfissures et des oxydes.
- la porosité provient soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification.
- les surfaces rugueuses augmentent l'ancrage mécanique substrat/dépôt par la croissance de l'aire de contact.
- Les surfaces lisses telles que le Brut et le poli avec un papier 1200 présentent un mauvais ancrage mécanique, néanmoins l'interface Métal/dépôt présente un bon remplissage de la surface par le revêtement.
- Les surfaces sur lesquelles on a appliqué le décapage, montrent une adhérence beaucoup plus importante que celles non décapées, pour les différentes surfaces choisies et dans le cas des deux composites élaborés à bases des alliages d'aluminium AG3 et AU4G.

Du point de vue mécanique, on a noté une microdureté du dépôt supérieure à celle des matériaux de base à savoir l'AU4G et l'AG3. Le dépôt réalisé par la projection thermique a amélioré cette propriété mécanique au niveau de la surface de nos matériaux.

On constate aussi que l'état de surface a une influence directe sur les valeurs de cette microdureté au niveau de l'interface Métal/revêtement.

Aussi, les limites élastiques relevées au cours de l'essai de flexion 03 points montrent d'une façon claire que cette caractéristique mécanique augmente avec l'augmentation de l'adhérence à l'interface Métal/dépôt. La limite élastique des couples à base d'AG3 et d'AU4G ayant subi un sablage et un décapage (S+D) sont les plus importantes par rapport aux cas (S) et (B+D). Le dépôt a bien amélioré la limite élastique de nos matériaux.

Pour le Post-traitement effectué, on a considéré trois états de surfaces préparées dans les mêmes conditions du décapage qui se différencient entre elles par la rugosité de surface Ra.

Les résultats montrent bien l'influence du traitement thermique sur l'adhérence des différents couples réalisés à base surtout de l'alliage AG3. Ce test a bien révélé l'intérêt de la rugosité pour l'adhérence des composites élaborés. Ainsi, au bout de 14 heures de maintien dans le four, le dépôt sur l'AG3-1200 s'est complètement décollé, et pour l'AG3-Brut un décollement partiel est observé avec un taux de fissuration = 95%, contrairement au cas de l'AG3-Sablé où l'effet de la rugosité a eu un effet positif contre l'écaillage du dépôt avec seulement 35% de fissuration.

L'observation des faciès du composite AG3-1200/NiAl/Thermanit, a montré que la rupture était cohésive. Enfin, on signale que du point de vue liaison mécanique, la mauvaise tenue de l'interface NiAl/substrat est atteinte sous les conditions du traitement thermique à savoir à 400°C.

L'une des caractéristiques recherchée par l'application des revêtements est la protection contre l'usure. Dans cette partie de l'étude, on a calculé le volume usé en fonction des charges appliquées. Les résultats montrent bien qu'en augmentant la charge, le volume usé croît d'une façon moins rapide que pour les petites charges, évolution due éventuellement à l'écrasement de la surface du dépôt qui résiste plus à l'arrachement de la matière.

Perspectives

Afin de compléter nos hypothèses du point de vue interprétations et mieux comprendre les différents phénomènes qui gèrent l'adhérence et la tenue des différentes interfaces obtenues dans le cas des composites réalisés, des analyses plus poussées s'avèrent nécessaires.

Une caractérisation mécanique et morphologique s'impose pour le choix de la rugosité adéquate qui permettra d'avoir un très bon accrochage mécanique entre Métal/dépôt.

En ce qui concerne le dépôt, un traitement ultérieur de sa surface est préconisé pour améliorer ses caractéristiques de surface, telle que la résistance à l'usure et à la corrosion.

Le calcul du facteur d'intensité **KIc** s'impose aussi pour mieux comprendre le comportement mécanique de nos composites.

Références bibliographiques

- [1] **G. E. TOTTEN**. Handbook of aluminum, volume 1, Physical metallurgy and processes. Marcel Dekker, Inc. New York, USA 2003.
- [2] International Aluminium Institute (IAI) <http://www.worldaluminium.org/iai/stats/index.asp>.
- [3] **L. SHREIR, R.A JARMAN ET G.T BURSTEIN**, « Corrosion, Volume 1: édition, 1994.
- [4] **CHRISTIAN VARGEL**, Corrosion de l'aluminium», DUNOD, 1999.
- [5] **G. DÉVORÉ**, « Chimie Descriptive Minérale Et Organique », VUIBERT, 1980
- [6] **LARIBI MALIKA**, « Mémoire de Magistère en Génie Chimique : étude de l'oxydation anodique dure d'un alliage d'aluminium type AG3 en milieu sulfurique- acétique », EMP, 2000
- [7] **S. AUDISIO, M. L CAILLET, A. GALERIE, H. MAZILLE**, « revêtements et traitements de surface : fonctionnalités, durabilité, procédés », presses polytechniques et universitaires romandes, 1999.
- [8] **F. HERBULOT**. Récupération et recyclage de l'aluminium, Techniques de l'Ingénieur M 2345, 2001.
- [9] Association de l'aluminium du Canada, Février 2008.
- [10] **E. FELDER, C. ANGELELIS, M. DUCARROIR, M. IGNAT, P. MAZOT**, Propriétés mécaniques de films minces : problématiques et moyens de mesure, Annales de Chimie Science des Matériaux, volume 23, Issues 5-6, Septembre (1998).
- [11] **A. ROCHE**, Les théories de l'adhésion et mesure de l'adhérence des couches minces, Le Vide, les couches minces, volume 257, (1991).

- [12] **R. BIGOT**, Caractérisation des surfaces et interfaces à l'aide de l'essai de dureté Vickers, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille1, (1995).
- [13] **C.S. RICHARD, J. LU, J.F. FLAVENOT, G. BERANGER**. Revêtements NiCrAlY projetés par plasma. Effet des contraintes résiduelles sur la ténacité à l'interface. CETIM- Information, N°120 (1991).
- [14] **S.Y SHIN, M.W KO, D.C CHO**. Microstructure and mechanical properties of Al6061 joints diffusion brazed using Cu interlayer, Journal of Materials Science Letters, (2002).
- [15] **F. BAHBOU, P. NYLEN, G. BARBEZAT**. A parameter study of the Protal process to optimize the adhesion of Ni5Al coatings. Advances in Technology and Application, Materials Park; U.S.A, OH (2004).
- [16] **D. MAUGIS**, Review subcritical crack growth, surface energy, fracture toughness, stickslip and embrittlement, Journal of Materials Science, volume 20, (1985).
- [17] **ETCHEVERRY Bernard**, Adhérence mécanique et tribologie des revêtements composites NiP – Talc multifonctionnels à empreinte écologique réduite, thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2006.
- [18] **Hans Jorg Mathieu, E. Bergmann, R. Gras**. 4. Analyse et technologie des surfaces. Première édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 2003.
- [19] **E. SILVERI, E. CHASSAING, S. B. GORYACHEV**. Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Journal de Physique IV, 2003.

- [20] **M. DUPEUX, P. E. DUBOIS, J. C. JOUD**. Détermination de l'énergie d'adhérence résine époxyde/acier inoxydable par la technique de gonflement-décollement, Revue de Métallurgie, Journées d'Automne 2001.
- [21] **M. DUPEUX, A. BOSSEBOEUF**. Application of the blister test to adhesion energy measurements in metal/ceramic film-on-substrate systems, in: Interfacial Science in Ceramic Joining, ed. A. Bellosi, Kluwer 1998.
- [22] **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).
- [23] **P. COUVRAT**, Le collage structural moderne, Ed. Lavoisier Tec&Doc, (1992).
- [24] **A. PRONER**. Revêtements par projection thermique. Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M1645, (2005).
- [25] www.unilim.fr.
- [26] Techniques des traitements de surface,
www.tcpp.fr/images/schemaprojection.gif.
- [27] **A. PRONER**. Revêtement par projection thermique. Techniques de l'ingénieur, M1645, 1999.
- [28] **S. NOUROUZI** "Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation des dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive". Thèse de doctorat, L'UNIVERSITE DE LIMOGES, novembre 2004.
- [29] Gordon England Nature of thermal spray coatings www.advanced-coating.com.

- [30] R. TRABELSI, D. TREHEUX, G. ORANGE, G. FANTOZZI, P. MOMERIN, F. THEVENOT. Relationships between mechanical properties and wear resistance of alumina-zirconia ceramic composite. J. EUR. Ceram. Soc., Lubrication engineers tribology Trans.32, pp.7784, 1989.