

République Algérienne Démocratique et populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE METALLURGIE

Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Métallurgie

Thème :

*Elaboration et caractérisation des multimatériaux
projetés thermiquement à base d'alliages d'aluminium*

Proposé et dirigé par :

Pr. N.MESRATI

Dr .M.E.DJEGHLAL

Réalisé par :

Melle. M.ELBESSEGI

Juin 2007

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Mr. N.Mesrati et Mr. M.E.Djeghlal pour avoir bien voulu me confier un travail aussi intéressant et pour leur suivi attentif, leurs conseils qui m'ont permis d'améliorer mon travail et leur confiance qui m'a été très précieuse.

Que mesdames et messieurs les membres de jury trouvent ici ma haute considération pour avoir accepté d'examiner et de juger mon travail.

Je remercie infiniment Mr. O.Ladjali pour son aide considérable et ses conseils précieux.

Mes remerciements vont également à tous les travailleurs de l'entreprise « Algérie métallisation » de DAR-EL-BEIDA et aussi à toute l'équipe de recherche du « Centre de soudage et de contrôle » de CHERAGA

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères que je possède au monde :

- ❖ *A mon père qui, par ses conseils judicieux ses encouragements et sa tendresse m'a mené sur le chemin de la réussite. Qu'il trouve dans ce travail, une bien mince récompense.*
- ❖ *A ma mère qui, par sa douceur et son amour sans limite, a su m'inculquer le sens du devoir, de la persévérance et des responsabilités. Qu'elle trouve dans ce modeste ouvrage ma reconnaissance et mes vifs remerciements.*
- ❖ *A mon frère pour son soutien moral.*
- ❖ *A toutes les familles El BESSEGHI et SAYAH et à tous mes amis.*



ملخص:

في هذه الدراسة قمنا بتلبيس الحديد الصلب الغير قابل للتأكسد (thermanit) على الخليطين المعدنيين (AU4G) و (AG3) 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 , AG3 , AU4G , الذارمانيت, 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, multimatériaux, 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, Multimaterials, AU4G, AG3, Thermanit, adhesion.

Sommaire :

| | |
|--|----|
| Introduction Générale..... | 1 |
| Partie théorique : Etude bibliographique | |
| Chapitre I : La projection thermique | |
| I. 1 Introduction..... | 2 |
| I.2 Les revêtements..... | 2 |
| I.3 La projection thermique..... | 3 |
| I.3.1 Place de la projection thermique parmi les traitements de surface..... | 3 |
| I.3.2 Définition et principe de la projection thermique..... | 3 |
| I.3.3 La projection à la flamme..... | 4 |
| I.3.3.1 La projection flamme-poudre..... | 4 |
| I.3.3.2 La projection flamme-fil..... | 6 |
| I.3.4 La projection à l'arc électrique..... | 7 |
| I.3.4.1 La projection à arc électrique entre deux fils..... | 7 |
| I.3.4.2 La projection plasma..... | 8 |
| I.4 Les principales caractéristiques des différents procédés..... | 9 |
| I.5 Matériaux utilisés et caractéristiques des matériaux projetés..... | 10 |
| I.5.1 Matériaux utilisés..... | 10 |
| I.5.2 Les différentes caractéristiques des revêtements :..... | 11 |
| I.5.3 Formation et structure d'un revêtement..... | 12 |
| I.5.4 Adhérence..... | 12 |
| I.5.5 Densité..... | 12 |
| I.5.6 Dureté..... | 13 |
| Chapitre II : Les multimatériaux | |
| II.1 Introduction..... | 14 |
| II.2 Les multimatériaux..... | 14 |
| II.2.1 Types des multimatériaux..... | 14 |
| II.2.1.1 Les revêtements monocouches..... | 14 |
| II.2.1.2 Les revêtements bicouches..... | 15 |
| II.2.1.3 Les revêtements appelés « multicouches »..... | 15 |
| II.2.2 Les problèmes des multimatériaux..... | 16 |
| II.3 Adhérence..... | 16 |
| II.3.1. Adhésion et adhérence..... | 16 |
| II.3.1.1 Définition..... | 16 |
| II.3.1.2. Phénomènes à l'origine de l'adhérence..... | 17 |
| II.3.1.3 Méthodes de mesure de l'adhérence..... | 20 |
| Chapitre III : l'aluminium et ses alliages | |
| III.1 Introduction..... | 24 |
| III.2 Principales caractéristiques de l'aluminium pur..... | 24 |
| III.2.1 Caractéristiques physiques..... | 24 |
| III.2.2 Caractéristiques mécaniques..... | 24 |
| III.2.3 Caractéristiques chimiques..... | 24 |
| III.3 Les alliages d'aluminium..... | 25 |
| III.4 Le recyclage de l'aluminium..... | 26 |
| III.5 Les différentes utilisations de l'aluminium..... | 26 |
| Partie expérimentale | |
| Chapitre IV : Techniques expérimentales | |
| IV.1 Introduction..... | 28 |
| IV.2. Matériaux utilisés..... | 28 |
| IV.2.1. Substrat..... | 28 |

| | | |
|--|---|----|
| IV.2.2 | Sous couche d'accrochage..... | 29 |
| IV.2.3 | Le dépôt..... | 29 |
| IV.3 | Equipement utilisé | 29 |
| IV.4 | Procédé de métallisation | 30 |
| IV.4 .1 | Préparation de surface à revêtir | 30 |
| IV.4 .2 | Paramètres de projection | 31 |
| IV.5 | Techniques de caractérisation | 32 |
| IV .5.1 | Introduction..... | 32 |
| IV.5.1.1 | Le contrôle par les courants de Foucault..... | 32 |
| IV.5.1.2 | Le contrôle par balayage..... | 33 |
| IV.5.1.3 | Métallographie..... | 33 |
| IV.5.1.4 | L'étude de microdureté..... | 34 |
| Chapitre V : Résultats et interprétations | | |
| V.1 | Introduction | 36 |
| V.2 | Résultats de contrôle par les courants de Foucault..... | 36 |
| V.3 | Résultats de contrôle par balayage..... | 39 |
| V.4 | Résultats d'examen métallographique | 41 |
| V.5 | Résultats de microdureté..... | 43 |
| | Conclusion Générale | 45 |

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux utilisés en industrie sont confrontés à plusieurs phénomènes tels que la fatigue , la corrosion, le frottement et l'usure, ces derniers peuvent apparaître à la surface ou se propager à l'intérieur de la pièce.

Pour éviter ces dégradations on a fait recours au traitement de surfaces tel que la projection thermique qui a pour but de recharger les matériaux endommagés ou la mise des couches protectrices afin de satisfaire les exigences sévères.

La projection thermique permet d'élaborer des dépôts par empilement de particules accélérées à plus ou moins grande vitesse et chauffées à plus ou moins haute température sur un substrat.

Cette technique est couramment utilisée dans de nombreux secteurs industriels, telle que l'automobile, afin, dans son application la plus en pointe, de revêtir des cylindres de blocs moteurs ; l'aéronautique avec, par exemple, la réalisation de barrières thermiques sur les chambres de combustion ; les biomatériaux pour l'élaboration de prothèses de hanches.

La réalisation de revêtements projetés de haute qualité passe par une bonne cohésion du dépôt et une adhérence élevée des revêtements sur leur substrat. Du fait de leur mode d'élaboration, les microstructures des interfaces dépôt/substrat et particule/particule obtenues par projection thermique sont complexes et les propriétés en dépendant hétérogènes. Afin d'optimiser l'adhérence des revêtements, il est donc nécessaire d'établir des relations entre la microstructure et la résistance de ces interfaces.

Dans le cadre de ce travail, nous avons tenté d'élaborer des dépôts d'un acier inoxydable (thermanit) sur deux alliages d'aluminium. L'objectif principal de ce travail est de caractériser l'interface substrat/dépôt.

Pour ce faire, nous avons réparti cette étude en deux parties :

- Partie théorique : elle est réservée à la recherche bibliographique pour donner des généralités sur les traitements de surface par projection thermique.
- Partie expérimentale : dans laquelle on a exposé nos techniques expérimentales et les résultats obtenus.

Chapitre I

Chapitre I : La projection thermique

I.1 Introduction

Le développement des traitements de surface est un domaine prioritaire dans la mise en œuvre des matériaux, qui a pour objectif d'améliorer la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure et à la fatigue thermique ou encore l'aspect esthétique.

La mise en place des couches protectrices, chimiquement inertes ou mécaniquement résistantes, peut donc, en consommant des faibles quantités de matière éventuellement chère, modifier profondément les caractéristiques de la surface traitée, par conséquent allonger la durée de vie du matériau.

I.2 Les revêtements

Les revêtements sont des traitements superficiels conduisant à la formation de couches épaisses et devant répondre à plusieurs fonctions telles que:

- ◆ Protéger le métal de base contre les hautes températures,
- ◆ L'accroissement de la tenue mécanique, de la résistance à la fatigue et la résistance aux différents types d'usure (abrasion, adhésion, érosion,...etc.),
- ◆ L'amélioration du frottement,
- ◆ L'isolation thermique ou électrique (projection de céramique...) [1].

Les traitements de surface se répartissent en quatre familles distinctes [2] :

a. Les traitements à partir de vapeur ou gaz :

- Dépôt chimique sous vide,
- Dépôt physique sous vide.

b. Les traitements à partir des phases liquides ou semi liquides :

- La projection thermique

c. Les traitements à partir de solution :

- Dépôts électrolytiques,
- Dépôts chimiques,
- Traitements de conversion.

d. Les traitements mécaniques :

- Mathoplastie,
- Explosion.

I.3 La projection thermique**I.3.1 Place de la projection thermique parmi les traitements de surface**

L'utilisation de divers revêtements susceptibles de conférer des propriétés nouvelles aux surfaces qu'ils recouvrent, que l'utilisateur est confronté à divers problèmes tels que :

-Le choix de type de revêtement qui se fait en fonction du type de sollicitations mécaniques et en fonction de l'environnement et des impératifs techniques (agressivité du milieu, maintenance...etc.)

-Le choix du procédé permettant le traitement qui se fait en tenant compte d'une jonction technico-économique.

Parmi les techniques les plus utilisées ; la projection thermique accapare une place primordiale, qui présente le plus de souplesse quant :

- ◆ Au choix du couple substrat-dépôt,
- ◆ Au choix du procédé,
- ◆ A la taille des pièces à traiter [3].

I.3.2 Définition et principe de la projection thermique

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés permettant de transformer un matériau d'apport de l'état solide à l'état fondu ou à l'état plastique grâce à une source de chaleur appropriée (flamme ou arc électrique), puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie(voir fig.I.1). La surface de base ne subit aucune fusion et l'adhérence du dépôt est généralement mécanique [4].

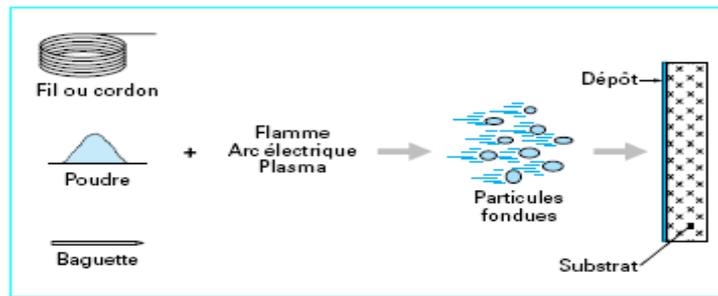


Figure I.1 : Principe fondamental de la projection thermique [4].

II.3.3 La projection à la flamme

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de la projection flamme. Les mélanges les plus utilisés sont : oxypropane, oxyacétylène qui donnent des flammes oxycombustible à des températures de 2800°C, 3100°C respectivement. Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2 800°C, et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme [4].

I.3.3.1 La projection flamme-poudre

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 le gaz de combustion [4].

I.3.3.1.1 Matériels de la projection flamme-poudre

Il existe trois matériels dans la projection flamme-poudre :

- Torche à gaz,
- Pistolet à poudre subsonique,
- Pistolet à poudre hypersonique.

a. Torche à gaz

Il s'agit d'un chalumeau oxygaz équipé 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 assurer la fusion de la poudre.

Les matériaux d'apport sont des alliages dits « autofusibles » à base de Nickel ou cobalt alliés à des éléments tels que le Chrome, tungstène...etc. [4].

b. Pistolet à poudre subsonique

Ces pistolets (Fig.I.2) sont caractérisés par leur puissance calorifique très élevée et par le fait que le substrat n'est pas chauffé par la flamme, ils utilisent un mélange oxy-acétylénique.

Les pistolets à poudre subsonique sont de deux types :

- A réservoir de poudre intégré,
- A réservoir séparé, relié au pistolet par un flexible.

La vitesse de projection des particules est de 30m/s, et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200mm.

Ce procédé permet des dépôts de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 2à3 kg/h sans échauffement important du substrat [4].

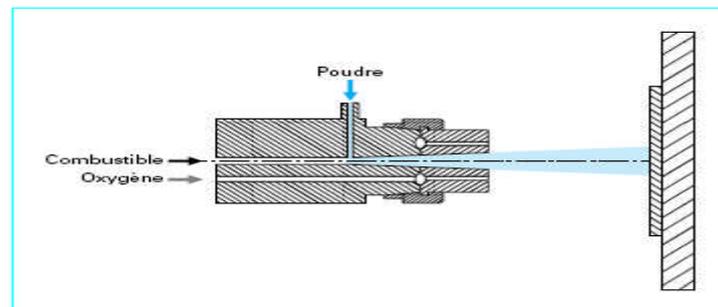


Figure I.2 : Schéma de principe d'un pistolet à poudre subsonique [4].

c. Pistolet à poudre hypersonique :

On trouve dans ce matériel deux types de pistolets :

- Pistolet à tir discontinu ou canon de détonation (voir Fig.I.3), il est monté sur une installation automatique et permet la projection des matériaux à des grandes vitesses (950m/s). Cette projection s'effectue d'une façon discontinue, utilisant l'énergie d'onde qui résulte d'un mélange gazeux oxy-acétylène. Ces pistolets sont considérés parmi ceux qui permettent les meilleurs revêtements du point de vue adhérence et porosité [4].

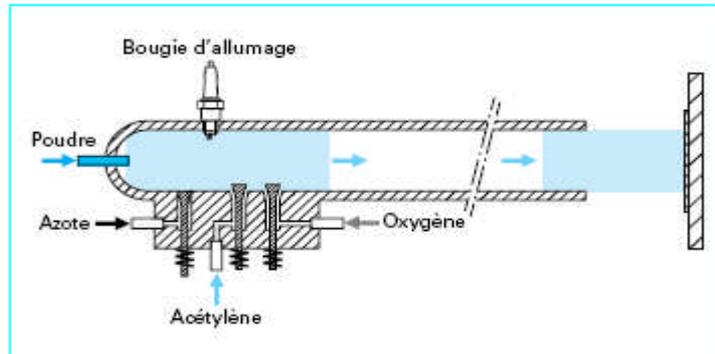


Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation [4].

- Pistolet à tir continu : son principe a été mis au point par une société américaine qui consiste à utiliser un jet à combustion interne (Fig I.4).

Dans la chambre de combustion, les gaz de combustion sont pénétrés puis sous l'effet de la pression élevée (**5 à 7 bars**) les jets du pistolet sont effectués.

Il existe deux types de projection :

- Le procédé HVOF (High Velocity Oxygen Fuel): il utilise comme gaz de combustion le propane, l'éthane ou hydrogène.
- Le procédé HVAF (High Velocity Air Fuel) : il utilise un mélange de kérosène air comprimé pour la combustion [4].

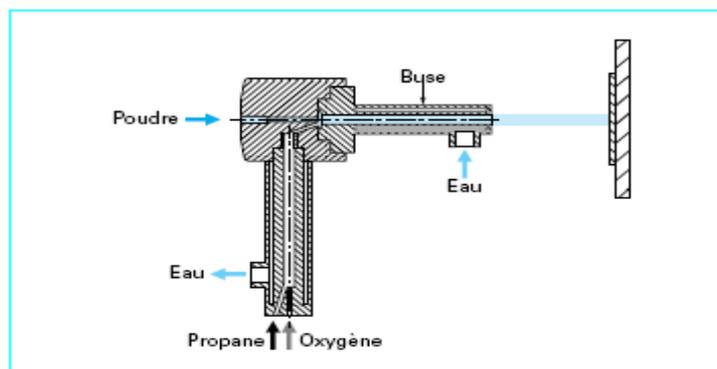


Figure I.4 : Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu [4].

I.3.3.2 La projection flamme-fil

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme ne sert en projection flamme-fil qu'à fondre le métal d'apport, introduit sous forme de fil, de cordon, ou de baguette, en son

centre. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé [4].

I.3.3.2.1 Pistolets flamme-fil

Les pistolets de projection flamme-fil se composent de deux parties (Fig. I.5)

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

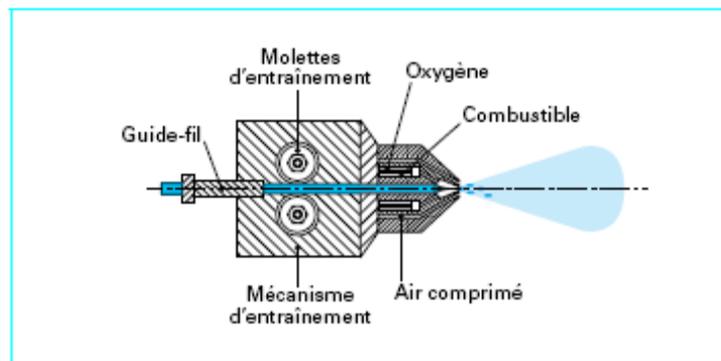


Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [4].

I.3.4 La projection à l'arc électrique

L'arc électrique est une source d'énergie qui permet l'augmentation de la projection thermique, on cite deux types de matériels utilisant cette énergie :

- Le pistolet à l'arc électrique entre deux fils,
- Le pistolet plasma.

I.3.4.1 La projection à arc électrique entre deux fils

Le principe consiste à créer un arc entre deux fils métalliques agissant en tant que deux électrodes. Un jet d'air comprimé, situé dans l'axe du point de création de l'arc, propulse le métal fondu sur le substrat (FigI.6).

L'un des avantages de ce procédé est que les deux fils de nature différente peuvent être utilisés simultanément pour produire un pseudo alliage.

Les principales applications de la technique de projection à l'arc sont les revêtements résistants à la corrosion (zinc, aluminium).

Les propriétés des dépôts obtenus sont meilleures que pour la projection à la flamme, en raison d'une vitesse de particule plus élevée [5].

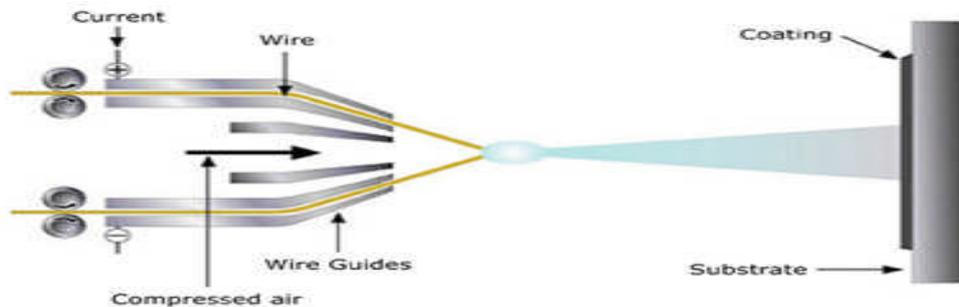


Figure I.6 : Principe de la projection à arc électrique entre deux fils [5].

I.3.4.2 La projection plasma

Le principe de base de la projection plasma est relativement simple. Une torche est constituée de deux électrodes : une cathode conique à l'intérieur d'une anode cylindrique constituant une buse.

Un gaz inerte (habituellement de l'Argon, éventuellement mélangé avec de l'hydrogène ou de l'hélium) circule entre les deux électrodes où il est ionisé pour former un plasma. Un tube introduit, dans le jet de plasma précédemment créé, le matériau à projeter sous forme de poudre, porté lui-même par un gaz neutre. Un réfrigérateur, généralement de l'eau sous pression, refroidit les électrodes pour éviter leur échauffement et leur destruction.

La température du jet de plasma généré, nettement supérieure à celles des autres procédés, permet de projeter une large variété de matériaux, à la seule condition qu'il existe un écart d'au moins 300° C entre la température de fusion et celle d'évaporation ou de dissociation du matériau.

Les particules arrivent sur le "substrat" dans un état de fusion avancée, à des vitesses importantes, de l'ordre de quelques centaines de m/s. Elles s'écrasent sur le dépôt et se refroidissent très rapidement, puis s'empilent les unes sur les autres réalisant ainsi progressivement un dépôt de quelques microns à plusieurs centimètres d'épaisseur.

Soulignons que de nombreux paramètres peuvent influencer la technique de projection plasma ; on en dénombre jusqu'à 60 différents. Certains d'entre eux peuvent être contrôlés par l'opérateur comme l'intensité de courant, les débits ou les compositions des gaz ; d'autres ne sont pas directement maîtrisables : la tension des électrodes, l'efficacité du refroidissement, l'usure des électrodes... autant de paramètres dont dépend la qualité finale du dépôt [6].

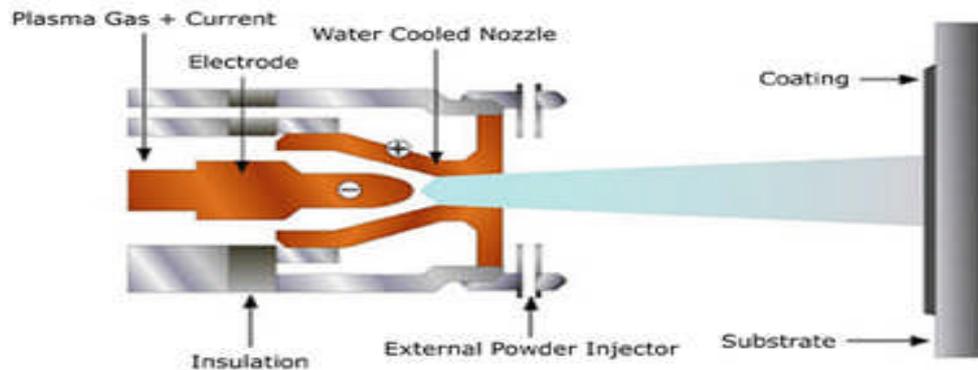


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une torche plasma [5].

I.4 Les principales caractéristiques des différents procédés :

Le tableau suivant représente les principales caractéristiques des différents procédés utilisés en la projection thermique :

| Caractéristiques | Projection flamme-poudre | Projection flamme-fil | Arc électrique | Plasma | HVOF | Canon à détonation |
|------------------------------|--------------------------|------------------------|----------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| Source de chaleur | flamme oxyacétylénique | flamme oxyacétylénique | arc électrique | plasma | flamme oxyacétylénique | flamme oxyacétylénique |
| Température de flamme (°C) | 3 000 | 3 000 | 6 000 | 12 000 | 3 000 | 3 000 |
| Transport des particules | gaz flamme | air comprimé | air comprimé | gaz plasma (Ar/H) | gaz flamme | gaz flamme |
| Vitesse des particules (m/s) | 40 | 150 | 250 | 200 | 700 | 950 |
| Forme du produit d'apport | poudre | fil-cordon | fil | poudre | poudre | poudre |
| Taux horaire de dépôt (kg/h) | 1 à 3 | 1 à 20 | 5 à 30 | 1 à 4 | 3 à 5 | 3 à 5 |
| Rendement moyen | 50 | 70 | 80 | 70 | 70 | 70 |
| Force d'adhérence (MPa) | 20 à 40 | 20 à 40 | 40 | 30 à 70 | 50 à 80 | 50 à 80 |
| Taux de porosité (%) | 10 à 20 | 10 à 20 | 8 à 15 | 1 à 10 | 0,5 à 2 | 0,5 à 2 |
| Épaisseur déposée (mm) | 0,1 à 1,5 | 0,1 à 1,5 | 0,2 à 3 | 0,05 à 1,5 | 0,05 à 1 | 0,05 à 1 |

| | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------|--------------------|------------------------|
| Exemples de matériaux d'apport | métaux céramique carbures | métaux céramique carbures | métaux | métaux céramique carbures | métaux carbures | carbures céramiques |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|---------------------------------|--------------------|------------------------|

Tableau I.1 : Principales caractéristiques des différents procédés [4].

I.5 Matériaux utilisés et caractéristiques des matériaux projetés

I.5.1 Matériaux utilisés

Les matériaux couramment utilisés comme revêtements sont nombreux et leur application ne cesse d'augmenter avec le développement des appareils de projection et des applications.

Ils sont classifiés suivant les normes A81-981 en groupes, chaque alliage étant défini ensuite par un code.

Ces matériaux peuvent être classés comme suit :

- Les aciers alliés et non alliés,
- Les alliages à base de cobalt,
- Les alliages à base de nickel,
- Les alliages à base de cuivre,
- Les alliages à base de zinc,
- Les métaux purs,
- Les carbures,
- Les oxydes,
- Les auto-adhérents (alliages base Ni-Al),
- Nitrure de titane,
- Borure de zirconium ou de titane,
- Siliciure de molybdène,
- Les matériaux Abradables (nickel/graphite et aluminium résine),
- Les matériaux antifriction (Étain/antimoine et Étain/plomb),
- Alliages « M » CrAlY.

Ces différents matériaux ne se présentent pas sous la même forme, car il faut tenir compte de certaines propriétés intrinsèques et également les procédés employés pour la projection.

Les principales formes qu'on peut rencontrer sur le marché sont :

◆ Les Fils

Les fils nus massifs sont les matériaux réservés aux matériels flamme et arc ; ils sont généralement dans les catégories métaux purs et les aciers. Et les fils fourrés sont réservés aux matériaux auto-adhérents. Ces types de produits sont définis par leur diamètre et leur composition chimique.

◆ Les poudres

Les poudres sont tenues de répondre à des critères plus nombreux que les fils, elles sont définies par leurs :

- composition chimique,
- dimension des particules,
- forme des particules : sphérique, lamellaires,...etc.
- type d'élaboration : électro-fondues, frittées, agglomérées, enrobées...etc.
- coulabilité,
- densité : tassée ou non tassée.

◆ Les cordons

Les cordons permettent d'obtenir un produit continu qui peut alimenter des pistolets à fils, ils sont définis par leur composition et leur diamètre.

◆ Les baguettes

Elles sont obtenues par frittage, elles permettent de conditionner des matériaux non tréfilables pour alimenter de manière discontinue des pistolets à fils

I.5.2 Les différentes caractéristiques des revêtements :

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 :

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

I.5.3 Formation et structure d'un revêtement

La formation d'un dépôt est le résultat d'une combinaison du phénomène d'écrasement, de solidification rapide des particules fondues sur le substrat, et du balayage de la surface à traiter.

Les particules projetées en s'écrasant sur le métal de base, elles forment une juxtaposition de couches qui donnent l'allure générale d'un dépôt obtenu par projection thermique (voir Fig.I.8) [4].

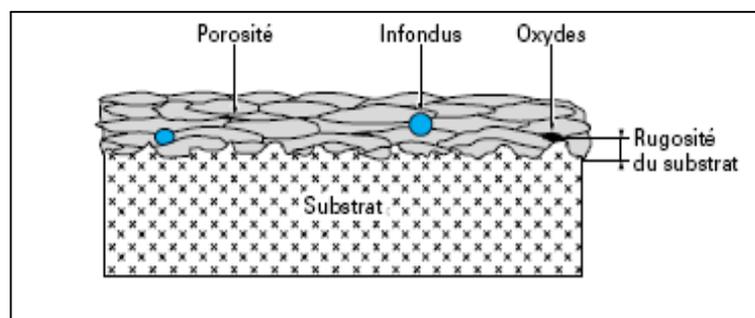


Figure I.8 : Coupe d'un dépôt projeté thermiquement [4].

I.5.4 Adhérence

Les dépôts projetés s'adhèrent au substrat par un phénomène mécanique qui exige une préparation soignée de la surface à revêtir. Les particules en fusion épousent plus ou moins bien la rugosité du substrat.

Dans le cas où l'adhérence est faible et les coefficients de dilatation sont très différents entre le matériau projeté et le substrat, on doit utiliser des sous couches d'accrochage. Parmi lesquelles on peut citer l'aluminure de nickel et le molybdène [4].

I.5.5 Densité

Les dépôts projetés sont poreux, cette porosité est plus ou moins importante, cela dépend du mode de projection. La dimension et la vitesse des particules ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts pour les dépôts métalliques, la densité est également fonction du taux d'oxydes formés au cours de la projection [7].

I.5.6 Dureté

En général, la mesure de la dureté d'un revêtement est une valeur relative, vue la difficulté d'obtenir une valeur exacte dans un matériau hétérogène.

On peut avoir une indication précise de la cohésion des particules entre elles, si on effectue une macro-dureté ou micro-dureté, sous une charge importante, on aura une idée précise de la qualité du dépôt qui craque si la cohésion n'est pas bonne [7].

Chapitre II

Chapitre II : LES MULTIMATERIAUX

II.1 Introduction

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

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

II.2 Les multimatériaux

Selon sa classe, chaque type de matériau possède des propriétés et des caractéristiques qui lui sont propres : les métaux sont en général tenaces et ductiles, mais leur masse volumique est souvent élevée ; les matières plastiques, légères, ont une faible rigidité et des propriétés mécaniques moyennes, et elles sont parfois fragiles. Les céramiques, quant à elles, ont un module d'élasticité et une résistance théorique à la traction très élevée.

Un regroupement de deux ou plusieurs classes de matériaux souvent sous forme de couches donne naissance à ce qu'on appelle « multimatériau » [8].

II.2.1 Types des multimatériaux

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

II.2.1.1 Les revêtements monocouches

Le revêtement est projeté directement sur un substrat. Dans ce cas, il est préférable que les coefficients de dilatation thermique de ces deux matériaux soient les plus proches possibles, sauf si une énergie d'adhésion forte peut être obtenue compte tenu des éléments en présence (fig.II.1) [8].

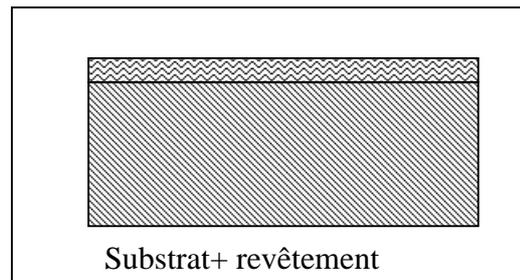


Figure II.1 :1^{er} type de multimatériau [8].

II. 2.1.2 Les revêtements bicouches

Appelés « duplexes », constitués d'un revêtement assurant la protection vis-à-vis du milieu externe, associé à une sous couche d'accrochage qui peut jouer d'une part le rôle de barrière chimique et d'autre part d'accommoder les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux (fig. II.2)[8].

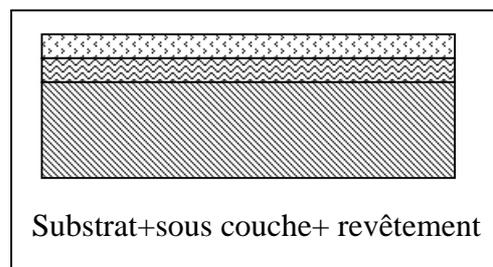


Figure II.2 :2^{ème} type de multimatériau [8].

II.2.1.3 Les revêtements appelés « multicouches »

Ils sont composés d'une sous couche recouverte à son tour d'une couche intermédiaire séparant ainsi le revêtement et la sous couche (fig.II.3) [8].

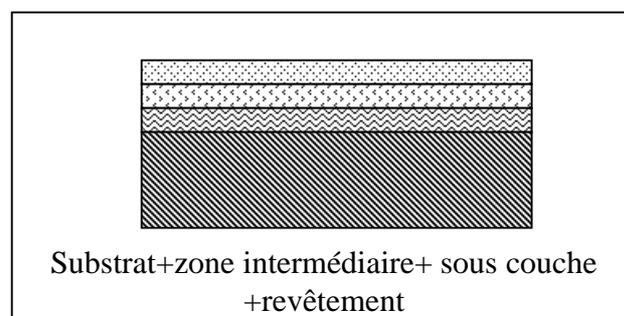


Figure II.3 :3^{ème} type de multimatériau [8]

II.2.2 Les problèmes des multimatériaux

De nombreux problèmes peuvent se rencontrer au cours de la réalisation d'un multi-matériau, le principal est d'ordre adhésif (au niveau de l'interface revêtement/substrat) en raison de la divergence des propriétés (mécaniques, thermiques et l'état de stabilité thermodynamique) entre les différents constituants du nouveau matériau.

II.3 Adhérence

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

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

II.3.1. Adhésion et adhérence

II.3.1.1 Définition

Dans la langue française, il existe deux termes pour désigner deux notions qu'il convient de distinguer : l'adhésion et l'adhérence. Les anglo-saxons n'emploient que le mot "adhesion" dans la langue courante. Toutefois, certains auteurs [9] ont ressenti le besoin d'introduire une nouvelle différenciation en parlant de "basic adhesion" et de "practical adhesion". "L'adhésion basique" correspond à l'adhésion francophone et "l'adhésion pratique" à l'adhérence en français.

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

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

$$W_{adh} = \gamma_D + \gamma_S - \gamma_{DS}$$

avec γ_D et γ_S respectivement les énergies de surface du dépôt et du substrat
 γ_{DS} l'énergie d'interface.

II.3.1.2. Phénomènes à l'origine de l'adhérence

Les différents types de liaisons interatomiques peuvent être établis aux interfaces et conduire à l'adhérence des revêtements. Toutefois, les forces d'attraction correspondant à ces liaisons ne peuvent s'appliquer que si les deux matériaux sont suffisamment proches ($<0,5$ nm) [10]. Pour assurer ce contact, l'étalement de particules liquides sur un substrat est souvent employé, mettant en oeuvre des phénomènes de mouillage.

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

II.3.1.2.1. Liaisons interatomiques

a. Adhérence chimique

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

La liaison covalente, qui correspond à une adhésion de type chimique, est due à une redistribution des électrons périphériques qui se déplacent sur des orbitales communes. Elle concerne des atomes particuliers et forment des liens directionnels. La liaison ionique résulte de l'association d'ions positifs et négatifs. C'est une interaction non orientée car le champ d'attraction des ions a une symétrie sphérique. De nombreuses liaisons, notamment celles des oxydes, sont intermédiaires entre les liens ioniques et covalents. Ils sont dits iono-covalents. Pour les céramiques, ces liaisons mixtes sont décrites par des taux d'ionocité. L'alumine Al₂O₃ est ainsi considérée comme ionique à 63 % [11]. Ce type de liaison correspond à une énergie de 600 à 1000 kJ.mole⁻¹ [10].

b. Adhérence physique

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

c. Liaisons métal/oxyde

Les liaisons entre métaux et oxydes ne sont pas encore bien comprises. Il est en effet difficile de comprendre comment des liaisons peuvent s'établir entre un corps à liaisons métalliques et un autre de type ionique ou covalent [12]. Des liaisons peuvent néanmoins être formées par diffusion.

II.3.1.2.2. Mouillage

Le mouillage regroupe tous les phénomènes qui interviennent lorsqu'un liquide est mis en contact avec un solide, ce qui intervient lors de l'élaboration des interfaces par projection thermique. Une bonne adhésion implique un bon mouillage du substrat par le revêtement à l'état liquide. Une goutte de liquide sur une surface solide parfaitement lisse prend la forme d'une calotte ayant un angle de mouillage θ avec la surface du substrat [13-14]. L'énergie d'adhérence W_{Adh} dépend du mouillage, via la relation :

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

avec γ_L l'énergie libre de surface du liquide.

Le mouillage total, réalisé pour $\theta = 0$, correspond donc au maximum du travail d'adhésion. D'autre part, le mouillage peut être accompagné de transferts de masse à l'interface [13]. L'étalement du liquide peut, en effet, être contrôlé par de la diffusion superficielle.

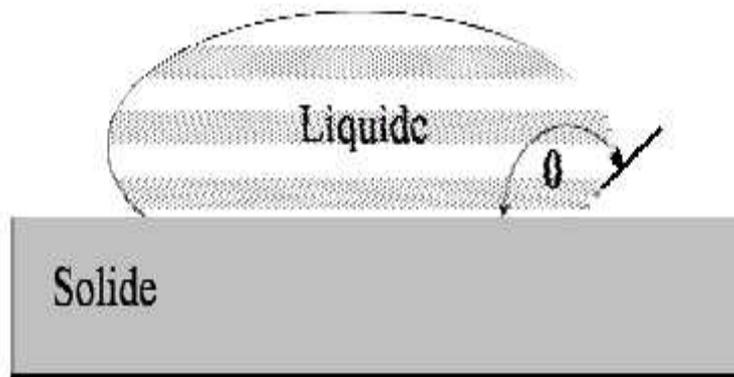


Figure II.4 Goutte de liquide sur un solide lisse - Définition de l'angle de mouillage [13].

II.3.1.2.3. 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 observée. 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 [15]. La formation de phases intermédiaires fragiles aux interfaces peut conduire à une mauvaise adhérence des revêtements [15-16] ou au contraire l'améliorer [17].

II.3.1.2.4. Ancrage mécanique

La rugosité du substrat est considérée comme un paramètre déterminant pour l'adhérence des revêtements. D'une part, son accentuation permet une pénétration du dépôt dans les aspérités du substrat et un emboîtement des deux matériaux. Ce phénomène, qui est souvent désigné par le terme vague d'"ancrage mécanique", conduit à une augmentation de l'adhérence des revêtements [18-20]. L'adhérence par ancrage mécanique peut résulter plus précisément de l'accroissement de l'énergie mécanique dû à la déviation de la rupture sur les irrégularités de l'interface au cours de l'essai d'adhérence. Dans le cas de revêtements obtenus par projection, l'ancrage mécanique peut également résulter de la contraction des particules lors de leur refroidissement.

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



Figure II.5. Illustration de l'accrochage mécanique [19].

La meilleure adhérence des dépôts réalisés sur des substrats rugueux peut également être issue d'une augmentation de l'aire de contact qui permet de multiplier le nombre de sites favorables à la formation de liaisons [12-21].

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

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

II 3.1.3 Méthodes de mesure de l'adhérence

Il existe un grand nombre de dispositifs permettant de déterminer l'adhérence d'un revêtement sur son substrat. Ces techniques peuvent, par exemple, être classées en quatre catégories [22] :

- 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.
- les méthodes non mécaniques, comme des techniques utilisant des ultrasons, les courants de Foucault...etc.

II.3.1.3.1 Essai de plot-collé (le test d'arrachement)

Deux barreaux solides sont collés, l'un au substrat, l'autre au dépôt par un adhésif adapté (fig.II.6). 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.

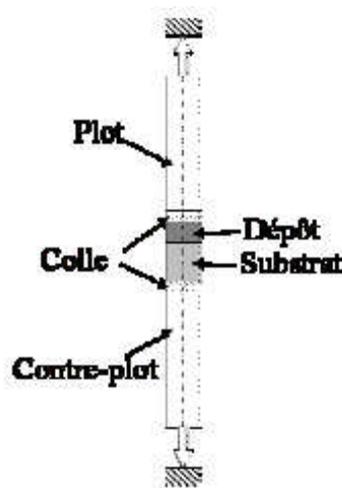


Figure II.6 Principe de l'essai d'adhérence par plot-collé

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

II.3.1.3.2 Gonflement-décollement

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 [23].

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.

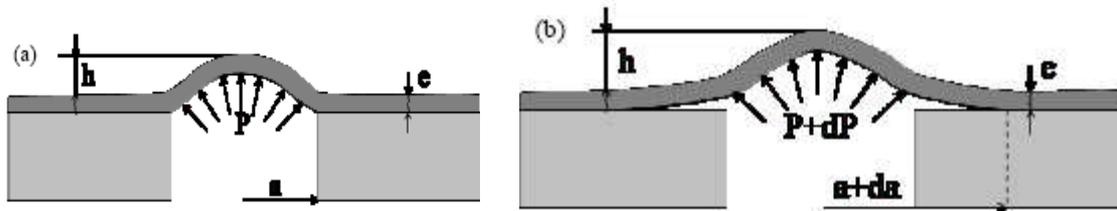


Figure II.7 Schéma des étapes de (a) gonflement et de (b) décollement de l'essai "bulge test"

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

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

E le module d'Young du revêtement

ν son coefficient de Poisson

σ_{Res} les contraintes résiduelles du dépôt

e l'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 biaxiale 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.

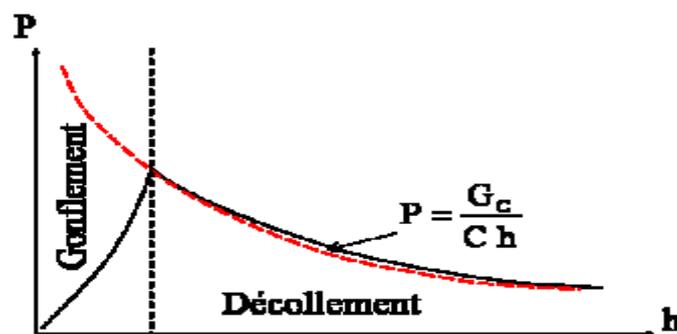


Figure II.8 Allure d'une courbe de gonflement-décollement [24].

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. La courbe (P, h) décroissante pendant le décollement peut être modélisée en écrivant le bilan de l'énergie mécanique apportée au système par le fluide sous pression, consommée d'une part en énergie de déformation de la membrane et d'autre part en croissance de la fissure interfaciale, à raison de G_c par unité d'aire. Toujours dans le cas d'un comportement élastique, cela se traduit par l'équation hyperbolique :

$$P = G_c / 0.5h$$

Un ajustement numérique de la courbe expérimentale de décollement permet donc une mesure directe de G_c , énergie mécanique d'adhérence interfaciale du revêtement sur son substrat

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

Chapitre III

Chapitre III : L'aluminium et ses alliages

III.1 Introduction

L'élément aluminium a été découvert par le savant allemand Wöhler, à l'Université de Göttingen en 1827. C'est l'élément métallique le plus présent à la surface de la terre. En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2 % environ de celle des aciers.

Cependant, ce métal (et ses alliages) arrive 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.

III.2 Principales caractéristiques de l'aluminium pur

III.2.1 Caractéristiques physiques

L'aluminium est un élément du groupe III de la classification de MENDELEEV. Il cristallise dans une structure cubique à faces centrées, fond à 660°C et bout à 2056°C. C'est un métal léger de masse atomique de 26.98 et de densité de 2,7 g/cm³ à 20°C. Il est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité. Sa conductibilité thermique est de 2,2W/Cm.°C et Sa résistivité à l'état pur est de 2,63 μΩ.m ce qui correspond à 65% de celle du cuivre [26].

III.2.2 Caractéristiques mécaniques

L'aluminium pur est très déformable à chaud et à froid, il est donc très ductile. Il a une limite élastique de 30 à 40 Mpa (qui passe à 150 à l'état écroui), une charge de rupture de 70 à 100 Mpa (200 à l'état écroui), un allongement de 10 à 60 % à l'état recuit (env. 5% à l'état écroui) avec une dureté de 15à25 HB. Son coefficient de dilatation thermique à 20°C est de 22,4 .10⁻⁶ /°C [27].

III.2.3 Caractéristiques chimiques

La position de l'aluminium dans la série des potentiels électrochimiques le rend très réactif ($E^{\circ}_{Al/Al^{3+}} = -1,66 \text{ V/ ENH}$), ce qui pourrait faire craindre une grande corrodabilité. Cette grande réactivité implique une très forte affinité pour l'oxygène, ce qui fait que l'aluminium se recouvre d'une pellicule très dure et adhérente d'oxyde Al₂O₃ qui stoppe la réaction d'oxydation en profondeur et permet à l'aluminium de s'autoprotéger en se passivant .Cette couche d'oxyde plus ou moins hydratée a une résistance chimique limitée car elle résiste bien

dans les solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique, et nitrique, par contre, les bases attaquent violemment le métal. Cette protection peut être améliorée par l'anodisation qui est un traitement permettant d'obtenir une couche épaisse d' Al_2O_3 mais poreuse, et qui est ensuite colmatée par un traitement à l'eau chaude [28].

III.3 Les alliages d'aluminium

Il existe environ 310 alliages d'aluminium différents. Certains alliages possèdent des caractéristiques mécaniques qui répondent très bien aux besoins du domaine aéronautique, comme par exemple l'alliage 2024 utilisé dans les structures des avions et le revêtement de leur fuselage. L'aéronautique est donc un grand « consommateur » d'alliages d'aluminium.

Les différents alliages à base d'aluminium sont désignés par un nombre de quatre chiffres et sont classés en 8 séries en fonction des éléments d'alliages principaux.

| Série | Alliage correspondant |
|-------------|----------------------------------|
| 1XXX | Aluminium pur (>99at%) |
| 2XXX | Aluminium / Cuivre |
| 3XXX | Aluminium / Manganèse |
| 4XXX | Aluminium / Silicium |
| 5XXX | Aluminium / Magnésium |
| 6XXX | Aluminium / Magnésium / Silicium |
| 7XXX | Aluminium / Zinc |
| 8XXX | Autres alliages d'aluminium |

Tableau III.1 Dénomination des différents alliages d'aluminium [30].

Parmi ces huit classes, une autre distinction peut être faite entre les alliages non trempants et les alliages trempants. Les alliages non trempants correspondent aux séries 1000, 3000 et 5000 (alliages sans durcissement structural) et les alliages trempants à durcissement structural, aux séries 2000, 6000 et 7000. Selon la classe d'alliages envisagée, différentes méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques peuvent être adoptées.

En effet, en ce qui concerne les alliages non trempants, trois méthodes d'amélioration des propriétés mécaniques existent : le durcissement de solution solide, le durcissement par les précipités ou le durcissement par écrouissage.

Pour les alliages trempants, d'un point de vue général, la principale méthode de durcissement correspond à un traitement thermique, appelé traitement de durcissement structural. Un matériau peut aussi être durci par traitement mécanique : on parle alors de durcissement par écrouissage. Le processus de durcissement structural permet d'améliorer nettement les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium en conduisant à la formation de précipités durcissants. Cette modification de la microstructure du matériau s'accompagne souvent d'une chute de la résistance à la corrosion ce qui amène à travailler, la plupart du temps, en terme de compromis entre bonnes propriétés mécaniques et résistance à la corrosion intéressante [29].

III.4 Le recyclage de l'aluminium

L'aluminium a une excellente recyclabilité. Pour recycler l'aluminium, on le fait simplement fondre. En plus des bénéfices environnementaux, le recyclage de l'aluminium est beaucoup moins coûteux que l'extraction à partir du minerai de bauxite. Il nécessite 95 % d'énergie en moins et une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite. En sautant l'étape de l'électrolyse, qui réclame beaucoup d'énergie, on évite les rejets polluants qui lui sont associés. L'aluminium est quasi recyclable à l'infini sans perdre ses qualités, à condition de ne pas fondre dans un même bain des alliages de composition différente.

Le recyclage de l'aluminium est pratiqué depuis les années 1900 et ne cesse de progresser : dans la consommation d'aluminium en Europe, la part d'origine recyclage est passée de 50 % en 1980 à plus de 70 % en 2000. Il existe différentes filières industrielles de récupération de l'aluminium. En France, l'aluminium ménager est récupéré avec les emballages dans le cadre du tri sélectif. Dans les centres de tri, l'aluminium est trié manuellement ou plus couramment grâce à des machines de tri par courants de Foucault. Il est ensuite broyé avant d'être refondu par des affineurs d'aluminium pour redonner du métal utilisable, appelé aluminium de seconde fusion. L'aluminium de seconde fusion est utilisé essentiellement pour la fabrication de pièces de fonderie pour l'automobile (blocs moteur, culasses, pistons, etc.).

III.5 Les différentes 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 fragile,

mais avec des petites quantités de cuivre, magnésium, manganèse, silicium et d'autres éléments, il peut former des alliages aux propriétés variées.

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

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

Chapitre IV

Chapitre IV : Techniques expérimentales

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente la procédure d'élaboration des multimatériaux par la technique de la projection thermique à l'arc entre deux fils ainsi que les processus relatifs à la préparation des échantillons.

Nous présentons dans cette partie, d'abord le procédé, l'appareil ainsi que les paramètres de projection thermiques utilisés pour la réalisation des dépôts.

Dans le cadre de notre recherche, nous avons tenté de déposer par la technique de projection thermique, par pistolet, de la thermanit sur deux alliages différents d'aluminium.

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

IV.2. Matériaux utilisés

IV.2.1. Substrat

Les substrats utilisés sont des alliages d'aluminium :

- 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".

L'analyse spectrale d'un échantillon de cet alliage sur l'appareil D.V.4 /E.R.M.Aéro, nous a donné la composition chimique suivante :

| Élément | Mn | Cu | Mg | Si | Al |
|-----------------|-----|----|-----|-----|-------|
| Composition (%) | 0,5 | 4 | 0,7 | 0,5 | Reste |

Tableau IV.1 la composition de l'AU4G

- 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.

L'analyse spectrale d'un échantillon de cet alliage sur l'appareil D.V.4 /E.R.M.Aéro, nous a donné la composition chimique suivante :

| Elément | Mn | Mg | Cr | Al |
|-----------------|-----|-----|-----|-------|
| Composition (%) | 0,3 | 3,1 | 0,3 | reste |

Tableau IV.2 la composition de l'AG3

Les éprouvettes sont tirées d'un barreau cylindrique (diamètre de 25mm) coupées sous forme de disques de 5mm d'épaisseur (fig.IV.1).

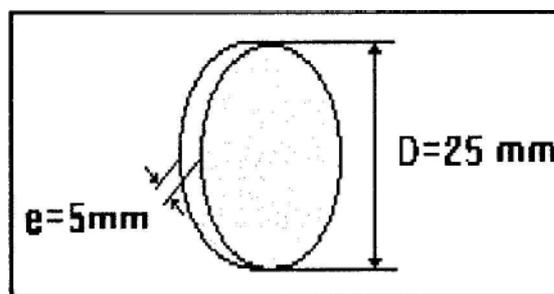


Figure IV .1 Dimensions de l'éprouvette étudiée.

IV.2.2 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 ,son épaisseur est d'ordre de 80 μ

IV.2.3 Le dépôt

Le revêtement utilisé est la thermanit, c'est un acier inoxydable, sa composition chimique est illustrée dans le tableau suivant :

| Elément | C | Fe | Cr | Ni | Al | Si | Cu | Mn | Sn |
|-------------------|-------|------|------|-----|----|----|----|-----|----|
| Concentration (%) | 0,132 | 66,6 | 18,5 | 5,5 | — | — | — | 8,1 | — |

Tableau IV.3 la composition du revêtement

IV.3 Equipement utilisé

Le pistolet de projection utilisé est l'ARC Spray 234, utilisant l'arc électrique comme source d'énergie.

IV.4 Procédé de métallisation

Afin de bien mener l'opération de projection, il est impératif de suivre certaines étapes telles qu'une bonne préparation de la surface et le choix des paramètres de projection.

IV.4.1 Préparation de surface à revêtir

➤ Polissage

On fait un polissage grossier c'est à dire on fait passer les surfaces à revêtir sur un papier abrasif de faible granulométrie (P.100).

➤ Dégraissage :

Les échantillons utilisés sont dégraissés et nettoyés avant la projection thermique avec une solution d'acétone.

➤ Décapage

La technique de préparation de surface connue sous le nom de décapage par zincate utilisant le caractère fortement électro-négatif du zinc. Elle comprend plusieurs étapes :

1. dégraissage à chaud en bain inhibé ;
2. rinçage à l'eau distillée, suivi d'un séchage ;
3. rinçage en bain de $\text{HNO}_3 + \text{HF}$
4. rinçage par l'eau distillée ; attaque de la surface par $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{acide chromatique}$;
5. rinçage à l'eau courante ; mise en bain de zincate de sodium
6. séchage au méthanol.

Après le décapage, les surfaces prennent un aspect grisâtre.

Pour étudier l'influence du décapage sur l'adhérence entre le substrat et le revêtement nous avons fait un autre décapage par nickel pour quelques échantillons d'AU4G et d'AG3.

➤ Sablage :

Parmi les différentes méthodes de rugosification, nous avons utilisé le grenailage qui est recommandé pour les dépôts épais.

Ce traitement qui consiste à cribler la surface par un jet de particules métalliques permet d'obtenir une surface prête pour recevoir le dépôt. Ce prétraitement garantit une bonne adhérence, les particules pénètrent les interstices de la surface rugueuse.

Dans notre cas on a utilisé les particules de corindon (oxyde d'aluminium)

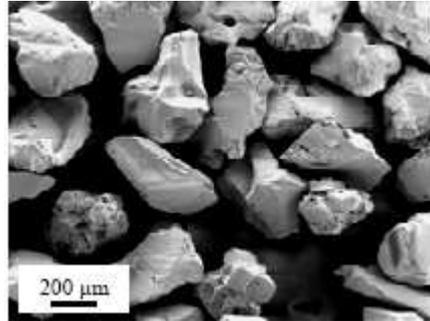


Figure IV.2 Images MEB des grains d'alumine de 300 µm

IV.4.2 Paramètres de projection

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

| | |
|---|----------|
| Pression d'air dans le moteur | 3,7bars |
| Pression d'air dans la buse de projection | 3,5 bars |
| Tension du générateur | 32V |
| Intensité du générateur | 100A |
| Distance de projection | 120 mm |
| Angle de tir | 90° |

Tableau IV.4 les paramètres de projection

La figure suivante montre le pistolet de projection thermique utilisé :

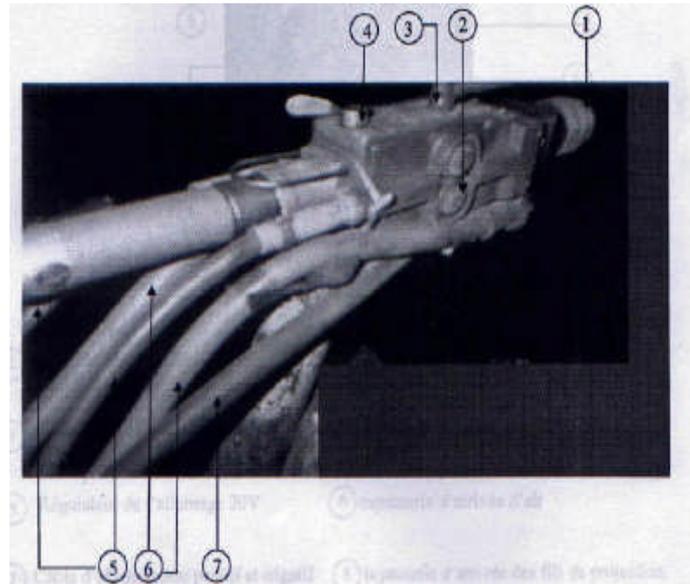


Figure IV.3 Schéma du pistolet ARC SPRAY

- 1 Chalumeau interchangeable
- 2 Molettes
- 3 Commande de démarrage (on, of)
- 4 Commande de molettes
- 5 Tuyauterie portes des fils de projection
- 6 Câble d'alimentation
- 7 Raccord rapide d'air

IV.5 Techniques de caractérisation

IV.5.1 Introduction

Parmi les moyens utilisés pour la caractérisation de l'interface, il y a le microscope optique, les mesures de la microdureté, les mesures d'adhérence et les contrôles par courant de Foucault. Ces techniques permettent d'avoir des informations sur la morphologie ainsi que l'adhérence du dépôt au niveau de l'interface.

IV.5.1.1 Contrôle par les courants de Foucault

Les courants de Foucault sont des courants induits dans un matériau conducteur en présence d'un champ magnétique variable. Ils dépendent des caractéristiques électriques,

magnétiques et structurales du matériau (dimension, conductivité électrique, perméabilité magnétique.)

Les anomalies dans la structure conductrice sont détectées par la variation d'impédance de la sonde d'excitation.

Toute variation ou modification des lignes de courants induits dans la pièce se manifeste par une variation du flux magnétique, ce qui entraîne une variation d'impédance de la sonde.

Le système de mesure par courants de Foucault repose sur la mesure de cette variation d'impédance.

La sonde est fixée sur un point de l'échantillon et la profondeur de pénétration réelle ne peut atteindre 63% du rayon du disque.

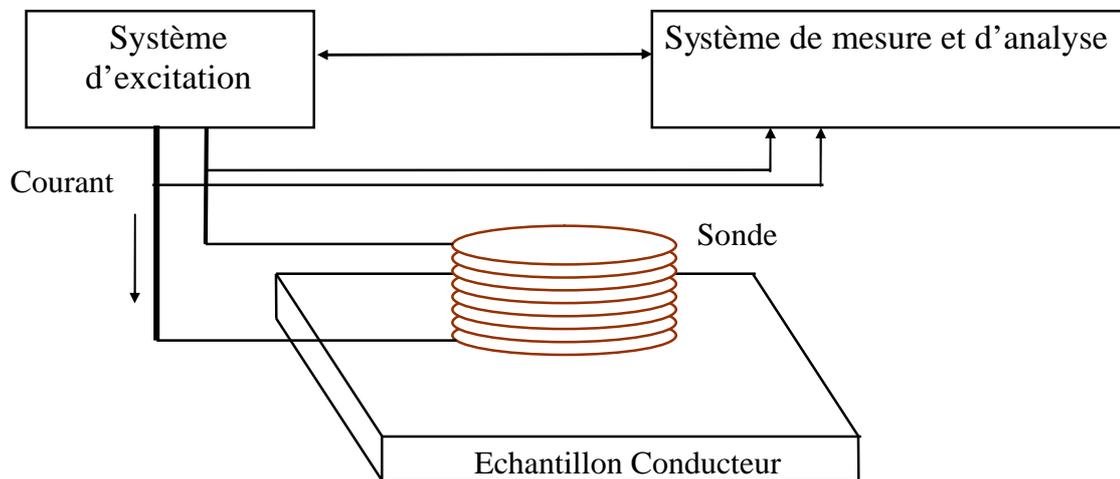


Figure IV.4 Chaîne de contrôle par les courants de Foucault

IV.5.1.2 Contrôle par balayage

Le contrôle par balayage a le même principe que le contrôle par les courants de Foucault, qui consiste à faire passer une sonde sur le revêtement de l'échantillon et grâce à un logiciel qui compte sur le changement de couleur, on peut avoir des informations sur l'adhérence de l'interface.

IV.5.1.3 Métallographie

La métallographie est une technique qui est basée sur l'observation de la microstructure des échantillons en utilisant un microscope optique ou électronique. Avant d'observer les échantillons par le microscope, il faut préparer la surface de ces derniers.

◆ polissage

Avant de faire le polissage, on a fait des coupes transversales pour les échantillons à étudier à l'aide d'une microtrancheuse et un enrobage à froid.

On fait subir aux surfaces à observer des polissages mécaniques dans le but de les rendre planes et exemptes de toutes rayures, graisses ou déformation nuisibles et gênantes. Cette opération consiste à faire passer les surfaces des échantillons à observer sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus faible en commençant avec P.120 puis P.220, P.400, P.600, P.800, P.1000 jusqu'au plus fin P.1200, cela se fait en présence d'un arrosage abondant avec de l'eau pour écarter d'éventuelles risques d'échauffement de la pièce et aussi on doit changer la position de la pièce de 90° en passant d'un papier à un autre.

Après tout ces étapes, les échantillons sont finis à l'aide d'un drap de tissu mouillé de la pâte diamantée sur lequel on pose notre surface, on prolonge son action jusqu'à ce que les raies issues du produit précédent disparaissent. Il faut que cette étape nous permet d'avoir une surface comparable à un miroir.

◆ Analyse micrographique

La micrographie est toute la première méthode utilisée pour contrôler la qualité du dépôt. Cette étude est faite à l'aide d'un microscope métallographique optique AXIOVERT 40 MAT (ZEISS) en lumière directe.

Afin de révéler la structure des couches projetées et de mettre en évidence toute transformation ou interdiffusion possible au niveau de l'interface, on fait une prise de photos sur la coupe transversale. Cette analyse nous a permis de porter les premières remarques concernant la qualité du dépôt.

IV.6 Etude de la microdureté

La détermination de la microdureté à, pour but de caractériser les couches de faibles épaisseurs et mêmes les composants structuraux des alliages.

La machine d'essai est constituée d'un dispositif pour l'enfoncement d'une pyramide en diamant sous une faible charge et un microscope métallographique. Par la mesure des deux

diagonales de l’empreinte laissée sur la surface après l’enlèvement de la charge, on peut avoir les valeurs de la microdureté directement à partir d’un tableau (chaque microduromètre a un tableau de valeurs de microdureté propre à lui).

Dans notre étude, on a appliqué une charge de 200gf sur la surface perpendiculaire au substrat et au revêtement pendant 10 seconde, sans choc ni vibration.

Chapitre V

Chapitre V : Résultats et interprétations

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats issus des différents essais effectués sur les deux échantillons.

V.2 Les résultats de contrôle par les courants de Foucault

Pour pouvoir caractériser l'interface par les courants de Foucault, il nous faut un diagramme de référence pour comparer les résultats obtenus (diagramme qui représente la bonne adhérence).

a. Diagrammes

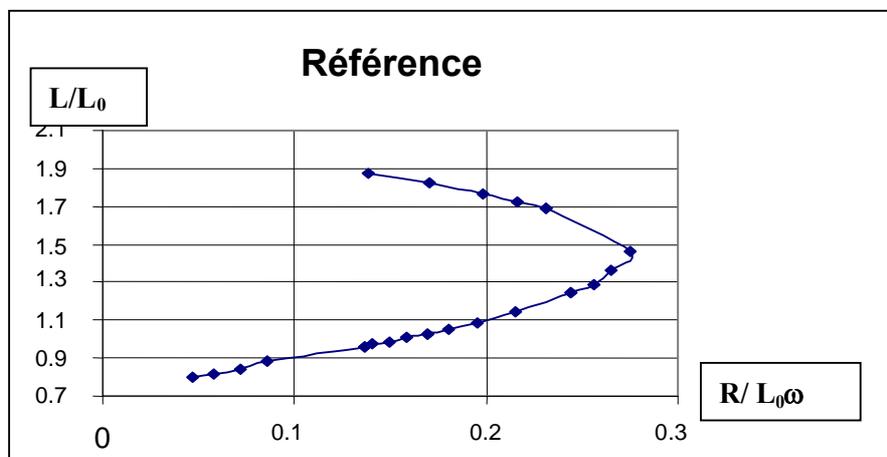


Figure.V.1 Diagramme d'impédance dans le cas d'une bonne adhérence.

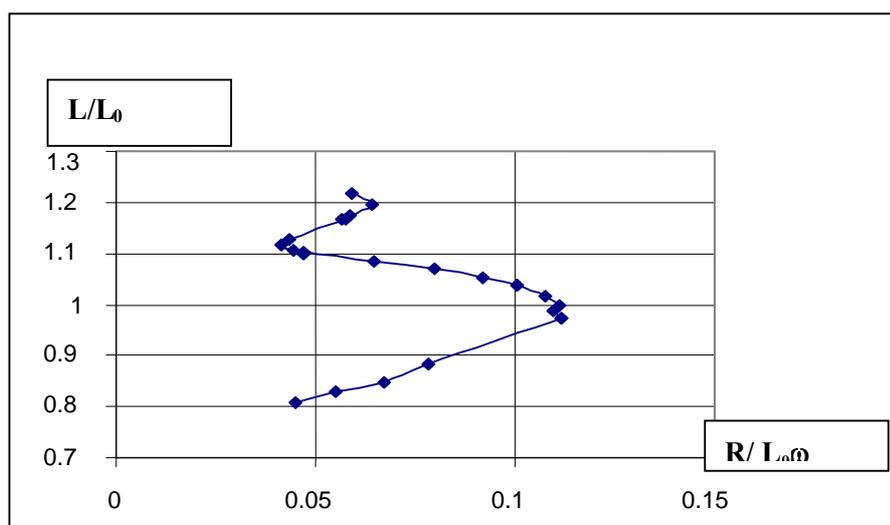


Figure.V.2 Diagramme d'impédance de l'AG3 (décapé par zinc)/75E/thermanit

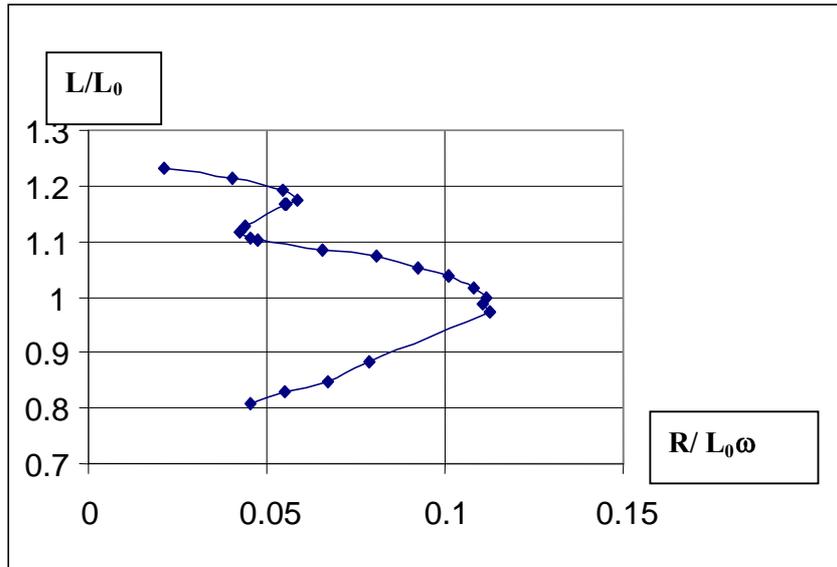


Figure.V.3 Diagramme d'impédance de l'AG3 (décapé par nickel)/75E/thermanit

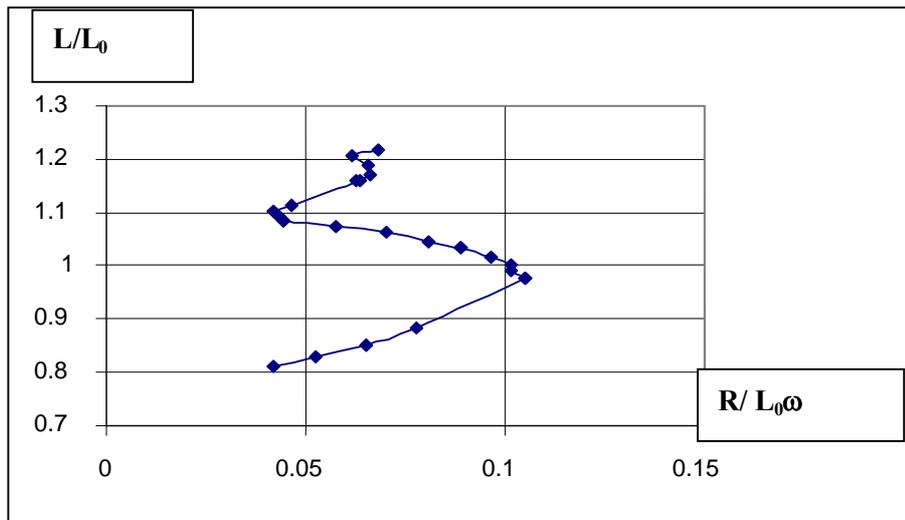


Figure.V.4 Diagramme d'impédance de l'AU4G (décapé par zinc)/75E/thermanit

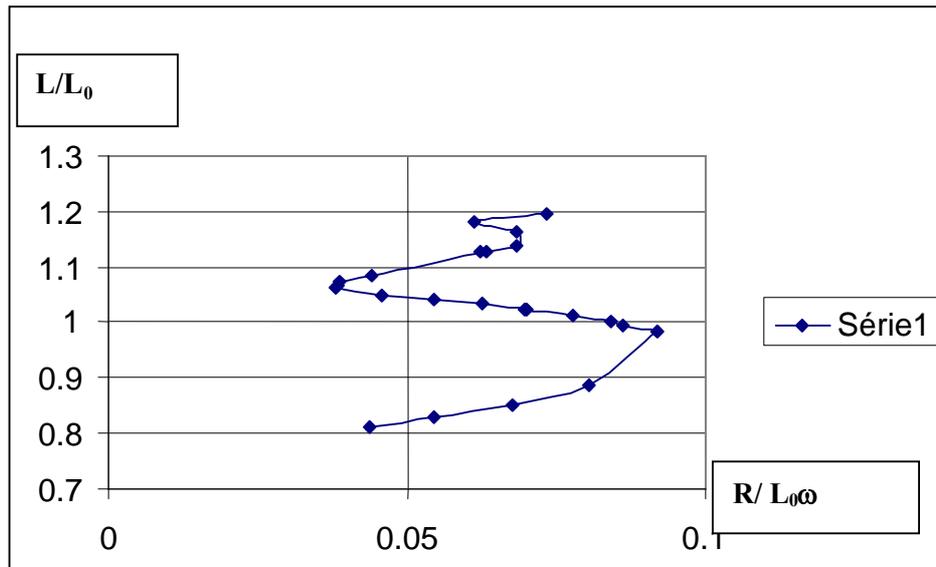


Figure.V.5 Diagramme d'impédance de l'AU4G (décapé par nickel)/75E/thermanit

Avec :

R : résistance de l'impédance

L₀ : l'inductance de l'impédance

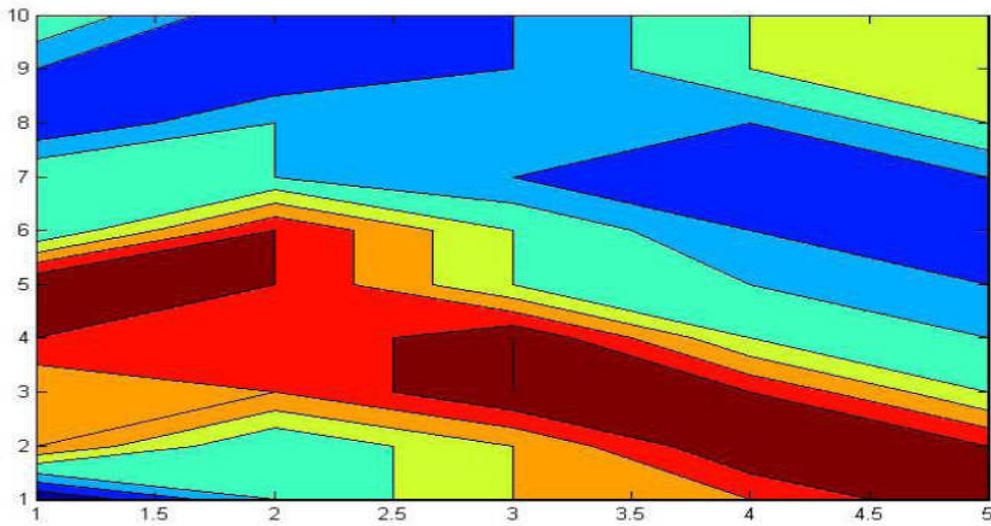
W : pulsation

b. Interprétation

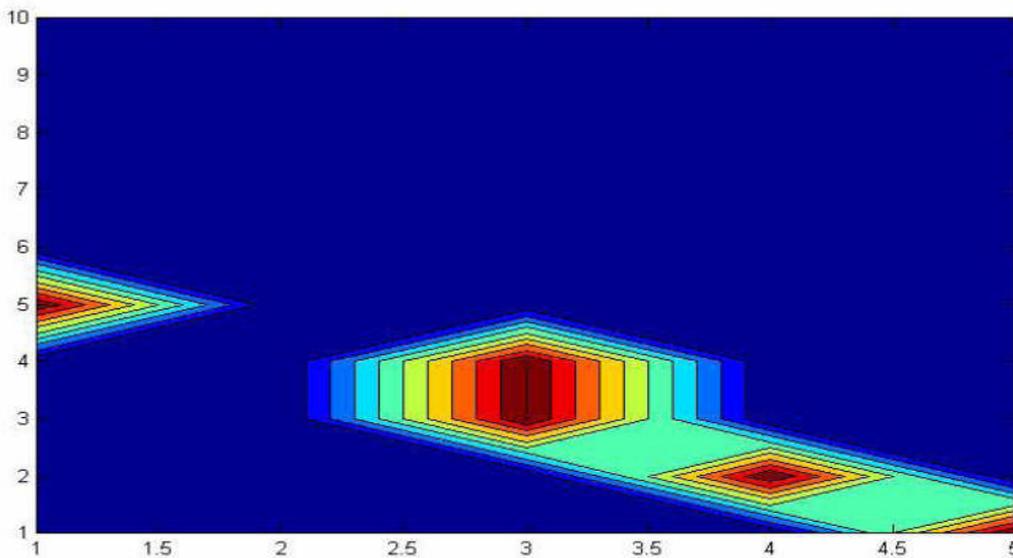
D'après les figures précédentes nous remarquons que les diagrammes d'impédance des quatre échantillons sont différents du diagramme de la **figure V.1** qui représente la bonne adhérence du revêtement sur le substrat, donc nous pouvons conclure que le dépôt n'est pas bien adhérent sur les quatre substrats (AU4G décapé par Zn et Ni, AG3 décapé par Zn et Ni) et que le décapage par nickel ou par zinc donne le même résultat.

V.3 Les résultats de contrôle par balayage

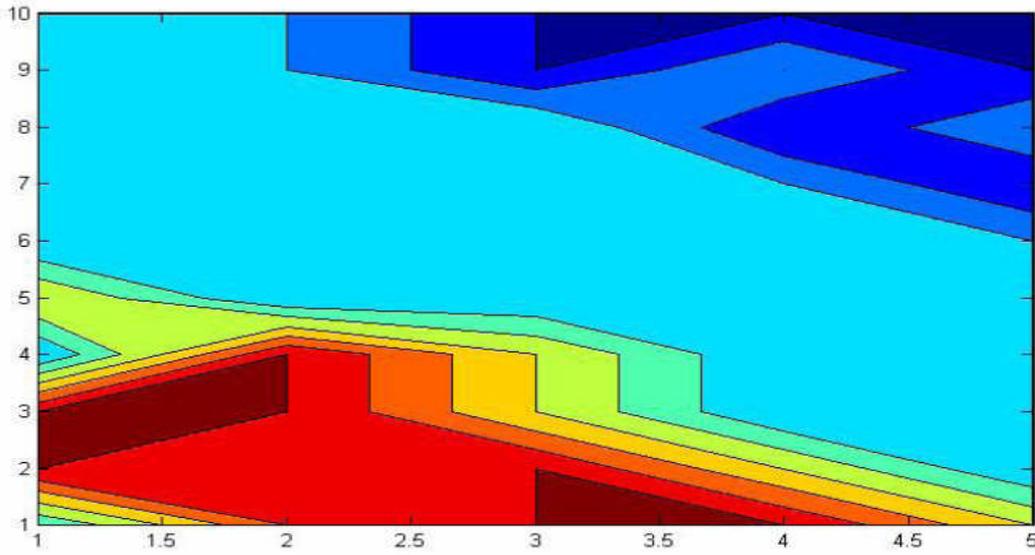
a. figures



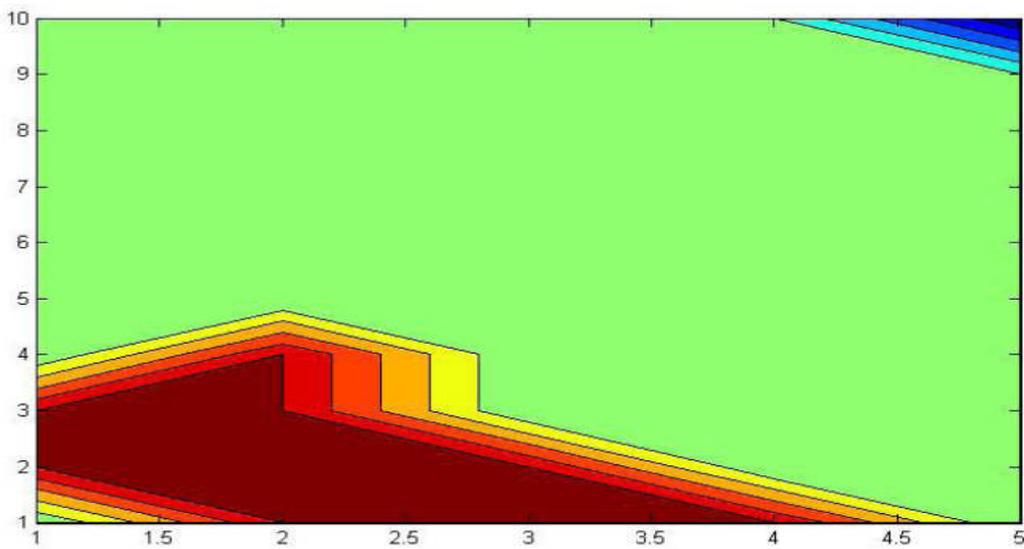
FigureV.6 Résultat du balayage pour l'AG3 (décapé par zinc)/75E/thermanit (f=80 Hz)



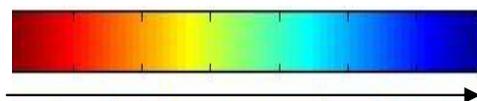
FigureV.7 Résultat du balayage pour l'AG3 (décapé par zinc)/75E/thermanit (f=5Hz)



FigureV.8 Résultat du balayage pour l'AU4G (décapé par zinc)/75E/thermanit (f=80 Hz)



FigureV.9 Résultat du balayage pour l'AU4G (décapé par zinc)/75E/thermanit (f=5Hz)



Diminution de l'impédance

b. interprétation

Sur les quatre figures nous remarquons une différence de couleurs. Cette différence de couleur représente la variation de l'impédance de la sonde.

La variation de l'impédance de la sonde est due aux anomalies de la structure conductrice. L'impédance de la sonde diminue quand il y a un vide qui représente la mauvaise adhérence entre le dépôt et le substrat, et plus la couleur tend vers le bleu, plus l'adhérence entre le substrat et le revêtement est faible. Donc les zones de la couleur rouge ont une très bonne adhérence.

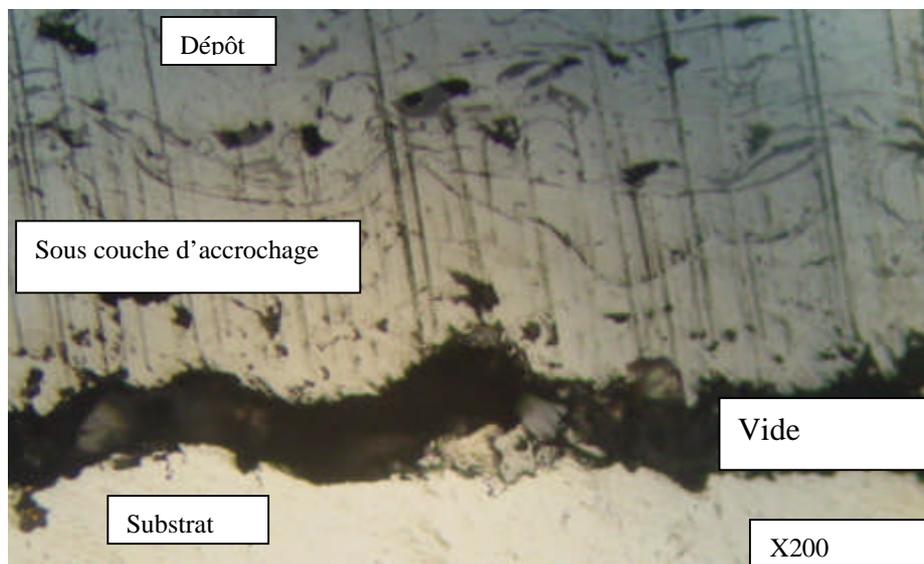
V.4 Résultats de l'examen métallographique**a. Figures**

Figure V.10 Micrographie de l'interface AU4G (décapé par zinc)/75 E/thermanit

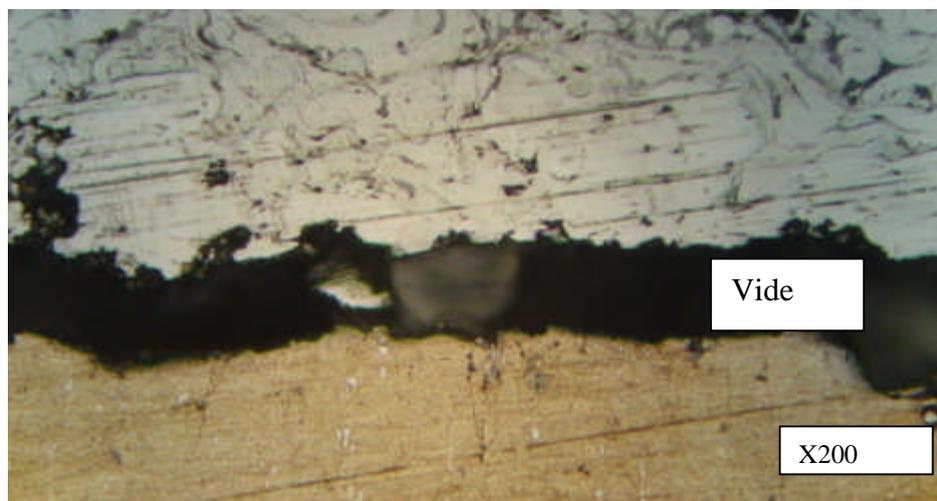
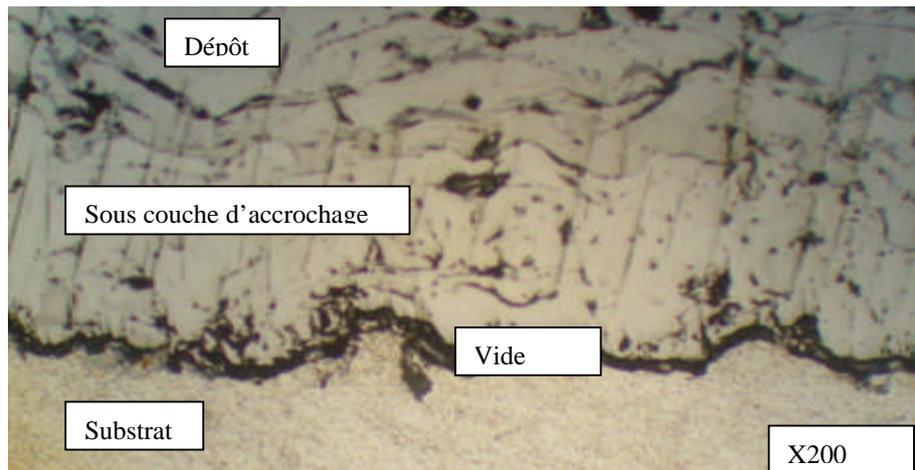
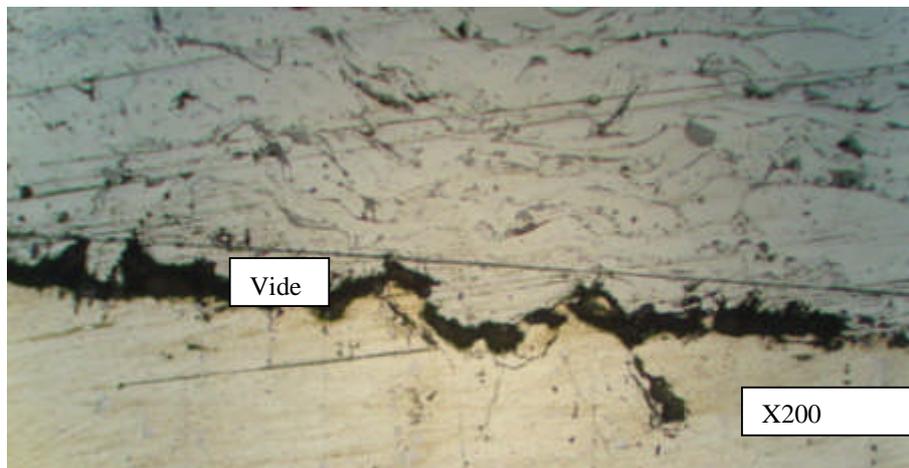


Figure V.11 Micrographie de l'interface AU4G (décapé par nickel)/75E/thermanit



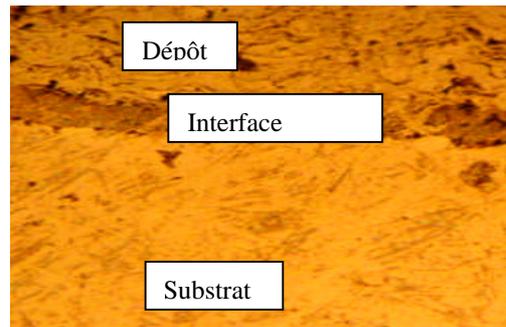
FigureV.12 Micrographie de l'interface AG3 (décapé par zinc)/75E/thermanit



FigureV.13 Micrographie de l'interface AG3 (décapé par nickel)/75E/thermanit

c. Interprétation

D'après les différentes micrographies nous remarquons qu'il n'y a pas une adhérence du dépôt (exactement la sous couche d'accrochage) sur le substrat. Pour connaître la cause qui nous a conduit à ce résultat, nous avons fait une micrographie d'un échantillon d'AU4G qui a subi un préchauffage.



FigureV.14 Micrographie de l'interface AU4G (avec préchauffage)/75E/thermanit

La figure V.14 montre qu'il y a une très bonne adhérence entre le substrat et le dépôt, donc l'échantillon qui a subi un préchauffage donne un meilleur résultat pour l'adhérence. Alors, nous pouvons dire que les revêtements déposés sur les substrats non préchauffés avant la projection thermique, ont subi un choc thermique. Ce choc thermique provoque des macrocontraintes au niveau de l'interface, ces contraintes sont définies généralement par la relation suivante :

$$\sigma_{th} = a \cdot (T_m - T_c) \cdot E$$

a : coefficient de dilatation du matériau projeté

T_m : température de fusion de la particule

T_c : température du substrat

E : module de Young de la particule

V.5 Les résultats de la microdureté

a. valeurs

| Matériau | Hv |
|--------------------------|--------|
| Substrat (AU4G) | 142,6 |
| Sous couche d'accrochage | 237 ,7 |
| Dépôt (thermanit) | 231,8 |

TableauV.1 Résultats des essais de microdureté de l'AU4G (décapé par zinc)/75 E/thermanit

| Matériau | Hv |
|--------------------------|-----------|
| Substrat | 68 ,65 |
| Sous couche d'accrochage | 240,8 |
| Dépôt (thermanit) | 229,4 |

TableauV.2 Résultats des essais de microdureté de l'AG3 (décapé par zinc)/75 E/thermanit

b. Interprétation

D'après les tests de microdureté qui sont réalisés sur les deux multimatériaux, on constate que les valeurs de microdureté du dépôt et de la sous couche d'accrochage sont plus grandes que celles des deux substrats et que la valeur de microdureté de la sous couche d'accrochage est proche de celle du dépôt, ce qui confirme le bon choix de la sous couche d'accrochage.

CONCLUSION GENERALE

La projection thermique s'est développée depuis longtemps dans les secteurs des technologies, comme l'aéronautique et le nucléaire, et aujourd'hui c'est la mécanique automobile qui lui accorde un grand intérêt.

L'importance du revêtement par métallisation est de réaliser des matériaux qui ont des propriétés superficielles importantes.

Des différents essais, analyses et observations, il y a lieu de retenir :

- Le décapage des deux substrats (AU4G et AG3) par zinc ou par nickel donne le même résultat en ce qui concerne l'adhérence entre dépôt et substrat.
- A l'interface, l'adhérence est mauvaise pour les échantillons qui n'ont pas subi un préchauffage, cette constatation met en évidence l'importance du préchauffage des substrats (pour minimiser le choc thermique entre les particules fondues et le substrat) dans l'amélioration de l'adhérence. C'est clair que la différence dans les propriétés des antagonistes composant le multimatériau et en particulier les coefficients de dilatation thermique en est la cause principale.
- Pour résoudre le problème de la mauvaise adhérence à l'interface, un post-traitement de 400 à 500 °C peut être effectué, ce traitement provoque éventuellement la diffusion entre le dépôt et le substrat, ce qui ne peut qu'assurer l'adhérence. Aussi, nous pouvons améliorer cette dernière par l'anodisation.

On peut dire que l'utilisateur, dans le cadre de l'exploitation de la projection thermique est confronté à plusieurs problèmes au niveau de l'interface et pour y remédier et comme recommandations, il faut que certains points soient développés à savoir l'influence :

- des paramètres opératoires (la distance de projection, l'angle de tir) sur les propriétés mécaniques du dépôt,
- des traitements thermiques (post de traitement) après la projection,
- des contraintes internes (coefficients de dilatation, le préchauffage...etc.).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] N. MESRATI, Q. SAIF, D. TREHEUX. Projections plasma de zircone sur différents substrats métalliques. IIème Conférence Franco-Allemande sur les Céramiques Techniques, 4-6 mars 1987, Aachen/Aix-la-Chapelle (RFA).
- [2] N. MESRATI, D. NGUYEN, D. TREHEUX. Rôle du zinc et de l'argent sur l'adhérence de zircone projetée sur un alliage d'aluminium-silicium 12%. Revue de Métallurgie-CIT/Science et Génie des matériaux, N° 12, Décembre 1993, pp. 1673-1680.
- [3] CETIM. Guide pratique de la projection thermique (1989).
- [4] Alain PRONER, technique de l'ingénieur M1645. Revêtement par projection thermique (1999).
- [5] [http:// www.advanced-coating.com](http://www.advanced-coating.com)
- [6] [http:// www.gazettelabo.org](http://www.gazettelabo.org)
- [7] Maurais DUCOS, techniques de l'ingénieur M1645. Revêtement par projection thermique (1988).
- [8] C.DEHMAS. Etude de l'influence des postes de traitement sur l'adhérence et le comportement mécanique d'un multimatériau réalisé par projection thermique. Projet de fin d'études, ENP 1994.
- [9] K.L. MITTAL, Adhesion measurement of thin films, Materials Science and Engineering, Vol.28, Issue 1, April 1977, p. 165
- [10] H. WEISS, Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment, Surface and Coating Technology, 1995.
- [11] PAULING L., The nature of the Chemical Bonding, 3ème ed., Cornell University Press, New-York, 1960.
- [12] E.DARQUE-CERETTI, E. FELDER, Adhésion et adhérence, Sciences et Techniques de l'Ingénieur, CNRS Edition, 2003.
- [13] V.V. SOBOLEV, J.M. GUILMANY, J. et al. NUTTING, Development of substrate coating adhesion in thermal spraying, International Materials Reviews, 1997.
- [14] A. A. VOLINSKI, N.R. MOODY, W.W. GERBERICH, Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Acta Materialia, 2002.
- [15] C.S. RICHARD, G., LU J., et al. BERANGER, The influences of heat treatments and interdiffusion on the adhesion of plasma-sprayed NiCrAlY coatings, Surface and Coatings Technology, 1996.
- [16] SHIN S.Y. , KO M.W., CHO D.C. et al., Microstructure and mechanical properties of Al6061 joints diffusion brazed using Cu interlayer, Journal of Materials Science Letters, 2002.

- [17] F. BAHBOU, P. NYLEN, G. BARBEZAT, A parameter study of the Protal® process to optimise the adhesion of Ni5Al coatings, Advances in Technology and Application, Materials Park, U.S.A., OH, 2004.
- [18] S. HEDACQ, Etude de l'adhérence et de la construction d'un dépôt d'acier inoxydable élaboré par projection plasma sur un substrat polymère, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2000
- [19] 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.
- [20] T. MARUYAMA, T. KOBAYASHI, Influence of substrate surface roughness on adhesive property of sprayed coating, Advances in Technology and Application, Materials Park, U.S.A., OH, 2004.
- [21] S. SIEGMANN, C.A BROWN, Surface texture correlations with tensile adhesive strength of thermally sprayed coatings using area-scale fractal analysis, in: UTSC 99 (United thermal spray conference & exposition), Dusseldorf, 17-19 march 1999.
- [22] E. SILVERI, E .CHASSAING, S.B. GORYACHEV, Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Journal de Physique IV, 2003.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] R.J. HOHLFELDER, J.J. VLASSAK, W.D. et al. NIX, Blister test analysis methods, in: Thin Films: Stresses and Mechanical Properties V, ed. S.P. Baker, C.A. Ross, P.H. Townsend, MRS 356, 1995.
- [26] Ingénieurs du groupe PECHENEY. L'aluminium-tome 1, édition EYROLLS 1964.
- [27] Matériaux métallique, édition OPU 1992
- [28] VARGEL. Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, édition DUNOD, Paris 1979.
- [29] Jonathan IDRAC : Comportement électrochimique d'alliage modèles binaires aluminium-cuivre. Thèse de doctorat, INP Toulouse 2003.
- [30] <http://www.wikipédia.org/aluminium>