

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE

Projet Fin d'Études pour l'obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'État en Métallurgie

ADHÉRENCE ET CARACTÉRISATION
DE
MULTIMATERIAUX
ALUMINIUM/DÉPÔT MÉTALLIQUE

Proposé et encadré par :

Pr. N. MESRATI

Réalisé par :

DJELLABI OUSSAMA

Promotion Juin 2011

ENP10, Hacem-Badi, El-Harrach, 16200 Alger

Tel: 021.52.53.01-03, Fax: 021.52.29.73 www.enp.edu.dz

ملخص:

في هذه الدراسة قمنا بتليبس 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 التليبس.

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

Résumé :

Dans le cadre de cette étude, nous avons 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 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.

Dédicaces

A mes parents qui me sont les plus chers au monde, que Dieu les protège,

A mes frères et ma sœur chacun à son nom ;

A tous les membres de la famille DJELLAÏ, GHAÏÏ ;

A tous mes amis spécialement Bilal ;

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment, où qu'ils soient ;

A tous ceux qui comptent pour moi ;

A tous ceux qui m'ont aidée de loin et de près ;

..... Je dédie ce modeste travail

Remerciements

Tout d'abord je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience de mener à bien mon projet de fin d'études.

A Monsieur le Professeur N .MESRATI, Mon promoteur Recevez Monsieur, mes plus sincères remerciements pour votre rigueur scientifique, votre enthousiasme et vos précieux conseils qui ont fait progresser ce travail. La confiance que vous m'avez accordée pendant ces trois mois m'a permis de progresser. Soyez assuré de toute mon estime et de mon profond respect.

Je voudrais particulièrement remercier les membres du jury dont Mme KECHOUD pour avoir accepté la présidence du jury ainsi que les examinateurs Mr M. CHITROUB et Mr M. LARIBI pour m'avoir honoré d'être membre de mon jury de soutenance.

Je souhaiterai également remercier tous mes enseignants du département de métallurgie de l'ENP, pour avoir participé à ma formation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
 CHAPITRE I : L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	
I.1. INTRODUCTION	2
I.2. HISTOIRE DE L'ALUMINIUM.....	2
I.3. L'ÉLABORATION DE L'ALUMINIUM	3
I.3.A. FABRICATION DE L'ALUMINE	3
I.3.B. FABRICATION DE L'ALUMINIUM	4
I.4. PROPRIÉTÉS PRINCIPALES DE L'ALUMINIUM	6
I.4.A. PROPRIÉTÉS ATOMIQUES	6
I.4.B. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	6
I.4.C. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	6
I.4.D. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	6
I.5. ALLIAGES D'ALUMINIUM	7
I.5.A. ALLIAGES DE CORROYAGE	7
I.5.B. ALLIAGES DE FONDERIE	8
I.6. TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM	8
I.6.A. TRAITEMENT D'HOMOGENÉISATION.....	8
I.6.B. TRAITEMENT D'ADOUCCISSEMENT	9
I.6.C. TRAITEMENTS DE DURCISSEMENT STRUCTURAL	9
I.7. APPLICATION DE L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES	9
I.7.A. AUTOMOBILE	9
I.7.B. TRANSPORTS AÉROSPATIAUX	10
I.7.C. L'ALUMINIUM DANS L'ARMEMENT ET LES ÉQUIPEMENTS MILITAIRES	10
I.7.D. ALUMINIUM AU CŒUR DE LA VIE QUOTIDIENNE	11

CHAPITRE II : LA PROJECTION THERMIQUE

II.1. INTRODUCTION	12
II.2. DIFFÉRENTES TRAITEMENTS DE SURFACE	12
II.3. HISTORIQUE DE LA PROJECTION THERMIQUE	13
II.4. PLACE DE LA PROJECTION THERMIQUE PARMIS LES TRAITEMENTS DE SURFACE	14
II.5. PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA PROJECTION THERMIQUE	14
II.6. PRINCIPE DE FORMATION DES COUCHES	15
II.7. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES DÉPÔTS	16
II.7.A. ADHÉRENCE	16
II.7.B. DENSITÉ	17
II.7.C. DURETÉ	17
II.8. TYPES DE PROJECTION THERMIQUE	17
II.8.A. LA PROJECTION À LA FLAMME	17
II.8.B. LA PROJECTION À L'ARC ÉLECTRIQUE ENTRE DEUX FILS	20
II.8.C. LA PROJECTION PLASMA	21
II.9. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA PROJECTION PAR ARC ÉLECTRIQUES	23
II.10. MATÉRIAUX PROJÉTÉS	23
II.10.A. MATÉRIAUX UTILISÉS.....	23
II.10.B. DOMAINE D'UTILISATION DES DÉFÉRENTS MATÉRIAUX DE PROJECTION	24

CHAPITRE III : LES MULTI-MATÉRIAUX

III.1. INTRODUCTION	25
III.2. DÉFINITION	25
III.3. TYPES DE MULTI MATÉRIAUX	25
III.3.A. REVÊTEMENTS MONOCOUCHE	25
III.3.B. REVÊTEMENTS BICOUCHE	26
III.3.C. REVÊTEMENTS MULTICOUCHE	26
III.4. PROPRIÉTÉS DES MULTI-MATÉRIAUX	26
III.4.A. MOUILLABILITÉ ET ÉNERGIE DE D'ADHÉSION	27

III.4.B. DIFFUSION	28
III.4.C. ANCRAGE MÉCANIQUE	28
III.4.D. LIAISONS INTERATOMIQUES	29
III.4.E. LES CONTRAINTES RÉSIDUELLES.....	29
III.5. QUELQUES MÉTHODES DE MESURE DE L'ADHÉRENCE	30
III.5.A. ESSAI DE PLOT-COLLÉ (LE TEST D'ARRACHEMENT)	30
III.5.B. GONFLEMENT-DÉCOLLEMENT	31
III.6. RÔLES DES REVÊTEMENTS	32
III.6.A. PROTECTION CONTRE LA CORROSION	32
III.6.B. PROTECTION CONTRE L'USURE	32

CHAPITRE IV : TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

III.1. INTRODUCTION	34
IV.2. MATÉRIAUX UTILISÉS	34
IV.2.A. SUBSTRATS	34
IV.2.B. DÉPÔTS	35
IV.3. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS.....	35
IV.3.A. DÉCAPAGE	35
IV.3.B. SABLAGE	36
IV.4. LA PROJECTION	36
IV.4.A. PARAMÈTRES DE PROJECTION	36
IV.4.B. PISTOLET DE PROJECTION	36
IV.4.C. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	37
IV.5. PROCÉDURE ET TECHNIQUES D'ANALYSES	38
IV.5.A MÉTALLOGRAPHIE	38
IV.5.B. ÉTUDE DE LA MICRODURETÉ	39
IV.6.B. ESSAI DE FLEXION	40
IV.6.C. ESSAI D'USURE	40
IV.6.D. POST-TRAITEMENT	42

CHAPITRE V : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

V.1. ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES DES DIFFÉRENTS COUPLES ÉTUDIÉS.....	43
V.1.A MICROSTRUCTURES DE L'ÉTAT BRUT DE PROJECTION.....	43
V.1.B. DÉTERMINATION DES FRACTIONS DES OXYDES	45
V.1. C. RÉSULTATS DU POST-TRAITEMENT	46
V.2. CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES COUPLES THERMANIT /NIAL/AU4G ET THERMANIT/NIAL/AG3.....	50
V.2. A. RÉSULTATS DE LA MICRODURETÉ	50
V.2.B. FLEXION TROIS POINTS DU COMPOSITE THERMANIT/NIAL/AG3	52
V.2.C. RÉSULTATS D'USURE.....	55
CONCLUSION GÉNÉRALE	58

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1. <i>Évolution de production mondiale d'aluminium.....</i>	2
Figure I. 2. <i>Fabrication de l'alumine.....</i>	4
Figure I. 3. <i>Cuves d'électrolyse pour l'obtention d'aluminium.....</i>	5
Figure I. 4. <i>Les réserves mondiales connues de minerais bauxite</i>	5
Figure I. 5. <i>Production mondiale de l'aluminium</i>	5
Figure I. 6. <i>Traitement d'homogénéisation</i>	8
Figure I. 7. <i>Traitement de durcissement structural.....</i>	9
Figure I. 8. <i>Contenu d'aluminium dans les véhicules en Amérique du Nord, en Europe et au Japon.....</i>	10
Figure II. 1. <i>Principales techniques utilisées en traitement de surface.....</i>	13
Figure II. 2. <i>Principe fondamental de la projection thermique.....</i>	15
Figure II. 3. <i>Principe de formation des couches.....</i>	16
Figure II. 4. <i>Schéma représentant la coupe d'un dépôt projeté.....</i>	16
Figure II. 5. <i>Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre.....</i>	18
Figure II. 6. <i>Appareil de projection flamme-poudre.....</i>	18
Figure II. 7. <i>Principe de fonctionnement d'un canon à détonation.....</i>	19
Figure II. 8. <i>Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu.....</i>	19
Figure II. 9. <i>Appareil de projection hypersonique.....</i>	19
Figure II. 10. <i>Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil.....</i>	20
Figure II. 11. <i>Appareil de projection flamme-fil.....</i>	20
Figure II. 12. <i>Principe de la projection à arc électrique entre deux fils.....</i>	20
Figure II. 13. <i>Principe de fonctionnement d'une torche plasma.....</i>	21
Figure II. 14. <i>Appareil de projection plasma</i>	21
Figure III. 1. <i>Revêtement monocouche.....</i>	25
Figure III. 2. <i>Revêtement bicouche.....</i>	26
Figure III. 3. <i>Revêtement multicouche.....</i>	26

Figure III. 4. <i>Goutte de métal liquide sur une surface plane.....</i>	27
Figure III. 5. <i>Illustration de l'accrochage mécanique.....</i>	29
Figure III. 6. <i>Principe de l'essai d'adhérence par plot-collé.....</i>	30
Figure III. 7. <i>Schéma des étapes de (a) gonflement et de (b) décollement de l'essai "bulge test".....</i>	31
Figure III. 8. <i>Allure d'une courbe de gonflement-décollement.....</i>	32
Figure IV. 1. <i>Pistolet de projection à arc entre deux fils « ARC SPRAY 234»</i>	37
Figure IV. 2. <i>Éprouvette de flexion.</i>	37
Figure IV. 3. <i>Éprouvette utilisée en micrographie et en post-traitement.....</i>	38
Figure IV. 4. <i>Éprouvette utilisée en usure.</i>	38
Figure IV. 5. <i>Microduromètre utilisé.....</i>	39
Figure IV. 6. <i>Machine de traction utilisée</i>	40
Figure IV. 7. <i>Tribomètre Utilisé</i>	41
Figure IV. 8. <i>Microscope électronique à balayage QUANTA 600-FEI</i>	41
Figure V. 1. <i>Échantillons élaborés.....</i>	43
Figure V. 2. <i>Micrographie des interfaces de composite Thermanit/NiAl/AG3.Photos prise par microscope SHIMADZO MMI006.....</i>	43
Figure V. 3. <i>Micrographie des interfaces du composite Thermanit/NiAl/AG3.Photos prise par microscope OLYMPUS BX51M.</i>	44
Figure V. 4. <i>Micrographie des interfaces du composite Thermanit/NiAl/AU4G. Photos prise par microscope SHIMADZO MMI006.</i>	44
Figure V. 5. <i>Micrographie des interfaces de composite Thermanit/NiAl/AU4G. Photos prise par microscope OLYMPUS BX51M.</i>	45
Figure V. 6. <i>Composite Thermanit/NiAl/AG3 brut.....</i>	46
Figure V. 7. <i>Composite Thermanit/NiAl/AG3 ayant subi un traitement de 15 minutes.....</i>	46
Figure V. 8. <i>Composite Thermanit/NiAl/AG3 ayant subi un traitement de 4 heures.....</i>	47
Figure V. 9. <i>Composite Thermanit/NiAl/AG3 ayant subi un traitement de 24 heures.....</i>	47
Figure V. 10. <i>Composite Thermanit/NiAl/AU4G brut.....</i>	47
Figure V. 11. <i>Composite Thermanit/NiAl/AU4G ayant subi un traitement de 15 minutes.....</i>	48
Figure V. 12. <i>Composite Thermanit/NiAl/AU4G ayant subi un traitement 4 heures.....</i>	48

Figure V. 13. Composite Thermanit/NiAl/AU4G ayant subit un traitement de 24 heures.....	48
Figure V. 14. : Evolution de la fissure en fonction du temps, cas du composite Thermanit/NiAl/AG3.....	49
Figure V. 15. Evolution de la fissure en fonction du temps, cas du composite Thermanit /NiAl/AU4G.....	49
Figure V. 16. Microdureté du composite Thermanit/NiAl/AG3.....	50
Figure V. 17. Microdureté du composite Thermanit/NiAl/AG3.....	50
Figure V. 18. Profil de la microdureté du multi-matériau à base de l'AG3.....	51
Figure V. 19. Microdureté du composite Thermanit/NiAl/AU4G.....	51
Figure V. 20. Microdureté du composite Thermanit/NiAl/AU4G.....	51
Figure V. 21. Profil de la microdureté du multi-matériau à base de l'AU4G.....	52
Figure V. 22. Éprouvette de flexion du multimatériau Thermanit/NiAl/AG3.....	52
Figure V. 23. Fissure longitudinale observée sous microscope optique.....	53
Figure V. 24. Fissure transversale observée sous microscope optique.....	53
Figure V. 25. Courbe de flexion du composite Thermanit/NiAl/AG3.....	51
Figure V. 26. Image MEB de la trace d'usure du couple Thermanit/NiAl/AU4G et analyse en EDAX. $F=40N$; $V= 60$ tr/min.....	55
Figure V. 27. Image MEB de la trace d'usure du couple Thermanit/NiAl/AU4G et analyse en EDAX. $F=70N$; $V= 60$ tr/min.....	56
Figure V. 28. Image MEB de la trace d'usure du couple Thermanit/NiAl/AU4G et analyse en EDAX. $F=90N$; $V= 60$ tr/min.....	57

LISTE DES TABLEAU

Tableau I. 1. <i>Domaine d'utilisation de l'aluminium dans la vie quotidienne.....</i>	11
Tableau II. 1. <i>Comparaison entre les différents procédés.....</i>	22
Tableau II. 2. <i>Domaine d'utilisation des différents matériaux de projection.....</i>	24
Tableau IV. 1. <i>Composition de l'AU4G</i>	34
Tableau IV. 2. <i>Composition de l'AG3.....</i>	34
Tableau IV. 3. <i>Composition de la Thermanit</i>	35
Tableau IV. 7. <i>Les paramètres de projection.....</i>	36

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie moderne nécessite l'utilisation des matériaux qui résistent 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 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 le projeter 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 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 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 ce 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 par projection thermique.
- ✓ 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 le montre la figure I.1.

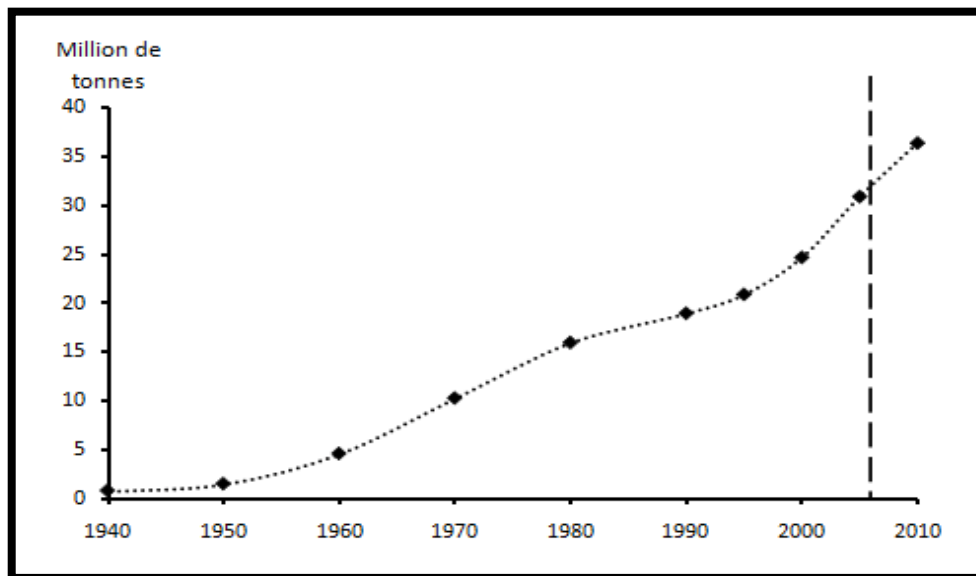


Figure I.1 Évolution de production mondiale d'aluminium [2].

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'Orsted 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. L'ÉLABORATION DE L'ALUMINIUM

I.3.a. Fabrication de l'alumine

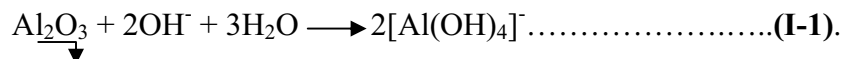
Le procédé utilisé est le procédé de Bayer le schéma est représenté dans la figure I.2.

1- Préparation de minerai

La bauxite est concassée est ensuite broyée dans une liqueur d'attaque ($\text{NaAlO}_2 + \text{NaOH}$) pour obtenir une suspension de bauxite broyée dans le liquide.

2- Attaque par la soude

La suspension est portée à 235-250°C sous une pression de 35 à 40 bars. L'alumine est dissoute par la soude d'après la réaction :



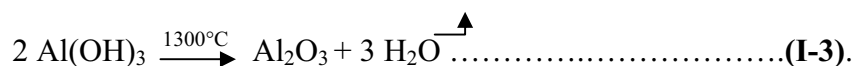
Le mélange obtenu est constitué alors de liqueur riche en alumine et autres oxydes insolubles et d'impuretés diluées et décantées.

3- Décomposition de l'aluminate

La liqueur diluée est refroidie dans des échangeurs, cette opération provoque la précipitation de l'alumine suivant la relation :



L'alumine précipitée est lavée sur filtres avant d'alimenter les fours à calciner (1300°C) qui permettent d'obtenir l'alumine pure suivant la réaction :



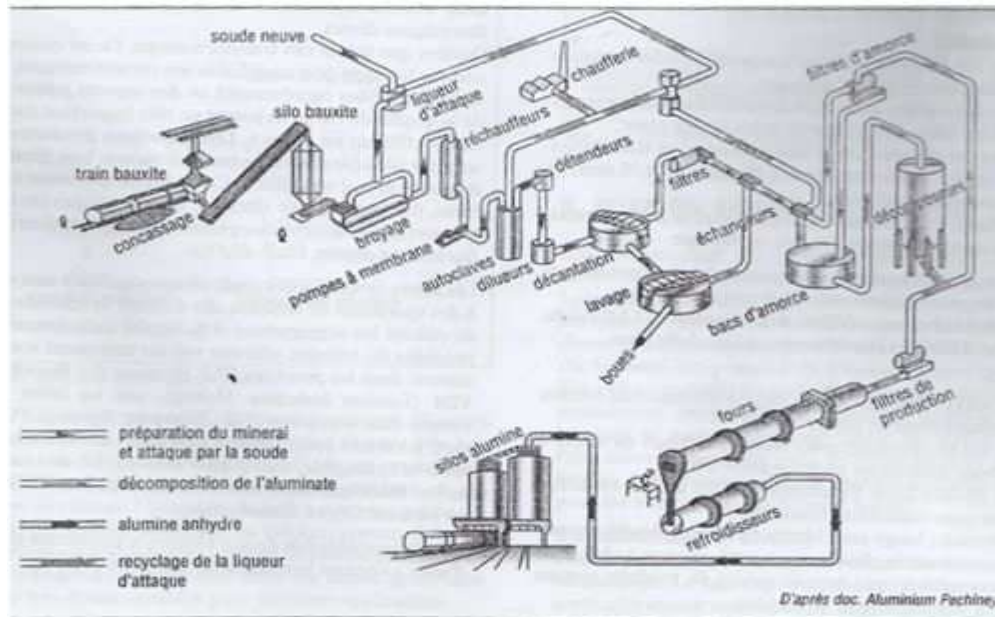


Figure I.2 Fabrication de l'alumine [3].

I.3.b. Fabrication de l'aluminium

1- L'électrolyte

La température de fusion de l'alumine est très élevée (2040°C), c'est pourquoi on lui ajoute un fondant (NaAlF₆). L'alumine dissoute conduit à un eutectique fondant à 935°C pour 18 % d'Al₂O₃.

2- L'électrolyse

L'alumine est réduite dans des cellules d'électrolyse d'alimentation en aluminium, chaque cellule comprend deux parties :

- un bloc de carbone qui joue le rôle d'anode ;
- un récipient rectangulaire en acier recouvert d'une couche au carbone qui joue le rôle de cathode.

* Les réactions d'oxydoréduction :

- la cathode : $4Al^{3+} + 12e^- \rightarrow 4Al$
- l'anode : $3C + 6O^2 \rightarrow 4Al + 3CO_2$
- la réaction globale : $2Al_2O_3 + 3C \rightarrow 4Al + 3CO_2$

- Le schéma de ces deux opérations est représenté dans la figure I.3.

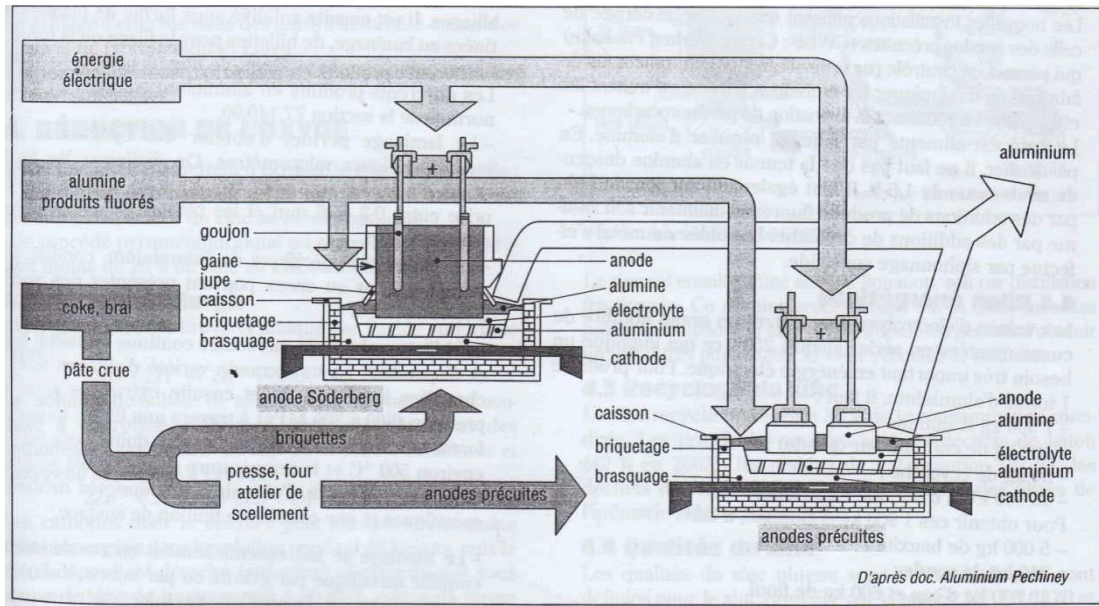


Figure I.3 Cuves d'électrolyse pour l'obtention d'aluminium [3].

* Les réserves de minerais bauxite et la production mondiale d'aluminium se répartissent dans le monde comme les montrent les figures I.4 et I.5.

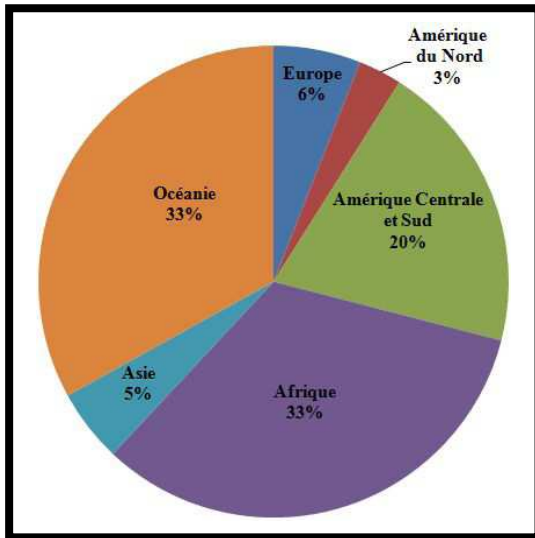


Figure I.4 Les réserves mondiales connues de minerais bauxite [2].

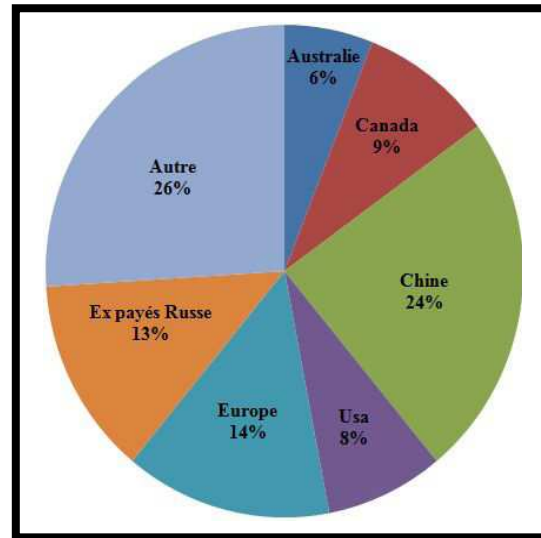


Figure I.5 Production mondiale de l'aluminium [4].

I.4. PROPRIÉTÉS PRINCIPALES DE L'ALUMINIUM

L'aluminium est un métal de couleur blanche lustre métallique, classé dans le tableau de Mendeleïev dans le groupe IIIA, période 3, bloc P. Son symbole chimique est Al [5].

I.4.a. Propriétés atomiques

L'aluminium cristallise dans une structure cubique à faces centrées ($a = 4.05 \text{ \AA}$) C'est un métal léger de masse atomique $M_r = 26,98$, son rayon de covalence et de Van Der Waals sont respectivement $1,21 \text{ \AA}$ et 205 pm . Le principal isotope est ^{27}Al stable comprenant **14** neutrons et **13** protons [5].

I.4.b. Propriétés physiques

Le matériau est solide dans son état ordinaire, de masse volumique $M_v = 2,6989 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, son point de fusion $T_f = 660,323 \text{ }^\circ\text{C}$ possédant une énergie de $10,79 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, et un point d'ébullition $T = 2\,519 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité, sa conductivité électrique $\sigma = 37,7 \times 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ et sa conductivité thermique $\lambda = 237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [6].

❖ Un coefficient de dilatation:

$\alpha = 23.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour l'intervalle de température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ à $100 \text{ }^\circ\text{C}$,

$\alpha = 25.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour l'intervalle de température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ à $300 \text{ }^\circ\text{C}$,

$\alpha = 28.7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour l'intervalle de température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ à $600 \text{ }^\circ\text{C}$ [3].

I.4.c. Propriétés mécaniques

L'aluminium pur est très déformable à chaud et à froid, il est donc très ductile. Il a une limite élastique $R_e = 30 \text{ à } 40 \text{ MPa}$ (qui passe à 150 à l'état écroui), une charge de rupture $R_m = 70 \text{ à } 100 \text{ MPa}$ (200 à l'état écroui), un allongement $A = 10 \text{ à } 60 \%$ à l'état recuit (env. 5% à l'état écroui) avec une dureté $HB = 15 \text{ à } 25$ [7].

I.4.d. Propriétés chimiques

La position de l'aluminium dans la série des potentiels électrochimiques le rend très réactif ($E^\circ_{\text{Al}/\text{Al}^{3+}} = -1,66 \text{ V/ENH}$), 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 Al_2O_3 qui stoppe la réaction d'oxydation en profondeur et permet à l'aluminium de s'auto protéger en se passivant.

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

Cette protection peut être améliorée par l'anodisation qui est un traitement permettant d'obtenir une couche plus épaisse d' Al_2O_3 pour une meilleure protection contre la corrosion mais elle est poreuse. Ainsi, elle est colmatée par un traitement à l'eau chaude pour réduire ce problème [8].

I.5. ALLIAGES D'ALUMINIUM

Nous examinerons successivement :

- les alliages de corroyage : la mise en forme du métal s'effectue, dans ce cas, par laminage, filage et forgeage.
- les alliages de fonderie : la mise en forme du métal s'effectue par le moulage.

I.5.a. 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'Al 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 [9].

I.5.b. Alliages de fonderie

Les alliages de fonderie sont, pour la plupart, des alliages Al-Si ou Al-Si-Cu [9].

Alliages Al-Si : AlSi7Mg ; AlSi10Mg ; AlSi13.

Alliages Al-Si-Cu : AlSi12CuNi ; AlSi18CuNi ; AlSi5Cu3 ; AlSi8Cu3 ; AlSi9Cu3
AlSi12Cu2 ; AlSi12Cu.

Autres alliages : AlMg3Ti ; AlMg6 ; AlMg10Si ; AlCu5MgTi ; AlZn5Mg.

I.6. TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Les traitements thermiques des alliages d'aluminium peuvent être divisés en trois types:

- les traitements d'homogénéisation.
- les traitements d'adoucissement.
- les traitements de durcissement structural [10-11].

I.6.a. Traitement d'homogénéisation

C'est un traitement comportant un chauffage à température relativement élevée allant de 450 à 610 °C suivi d'un maintien pendant 6 à 48 heures.

Ces traitements qui ont pour but de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide, sont appliqués à certains produits bruts de fonderie ou carroyés et destinés le plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (étirage, laminage, forgeage) [10].

La figure I.6 représente le schéma du traitement.

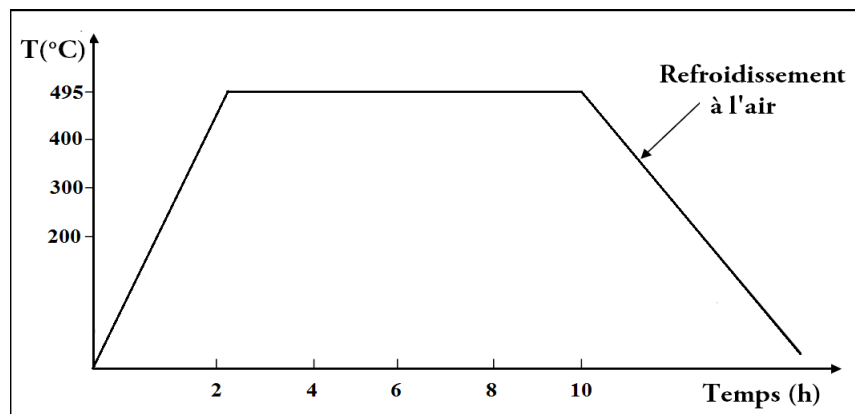


Figure I.6 Traitement d'homogénéisation [10].

I.6.b. Traitements d'adoucissement

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale.

Dans le cas de l'écrouissage, ce sont les traitements de restauration et les recuits de recristallisation [11].

- Le traitement de restauration est effectué de 200 à 300 °C pendant 1 à 8 h.
- Le traitement de recristallisation est effectué de 300 à 400 °C pendant 0.5 à 3 h.

I.6.c. Traitement de durcissement structural

Les traitements de trempe structurale des alliages d'aluminium comprennent une mise en solution suivie :

- D'un refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la solution existante a des températures plus élevées.
- D'un traitement de revenu ultérieur à l'ambiante ou à une température supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage [11].

La figure I.7 représente le schéma du traitement.

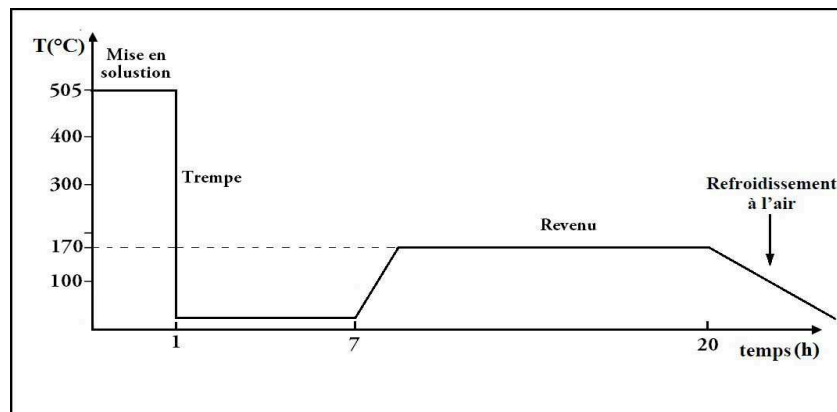


Figure I.7 Traitement de durcissement structural [11].

I.7. APPLICATION DE L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

I.7.a. Automobile

Depuis son introduction dans le domaine du transport, l'aluminium a contribué de façon importante à l'allègement des véhicules de transport terrestre et continuera à le faire.

La demande pour l'aluminium dans ce domaine croît d'ailleurs constamment. En 2000, l'automobile personnelle moyenne utilisait entre 100 et 120 kg d'aluminium.

En 2006, cette quantité se situait entre 110 et 145 kg. En 2005, environ 30 % de l'aluminium produit dans le monde entrait dans la composition de divers types de véhicules [12].

Dans le domaine de l'automobile où la bataille entre matériaux est la plus spectaculaire, l'aluminium est en compétition avec la fonte sur les blocs moteurs, avec les céramiques sur les pistons, avec l'acier, les plastiques, le magnésium sur les carter, avec le cuivre sur les échangeurs, avec l'acier, les plastiques, les composites sur la carrosserie, on trouve par exemple l'alliage 3003 qui est utilisé dans les radiateurs automobiles [13].

La figure I.8 représente l'évolution de l'utilisation de l'aluminium dans les véhicules.

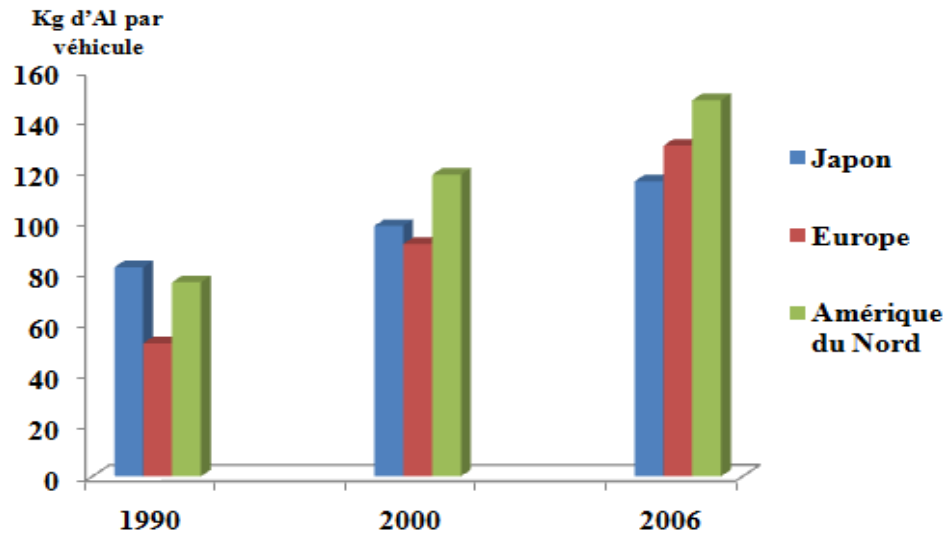


Figure I.8 Contenu d'aluminium dans les véhicules en Amérique du Nord, en Europe et au Japon [12].

I.7.b. Transports aérospatiaux

L'aluminium et l'aéronautique ont toujours été, et sont encore, étroitement liés. Si l'aéronautique put commencer avec les appareils dont les structures en bois, son véritable démarrage ne fut rendu possible que grâce à l'invention en 1903 d'un alliage aluminium-cuivre-magnésium. Celui-ci, commercialisé sous le nom de duralumin, aujourd'hui alliage 2017, il existe aussi d'autres alliages d'aluminium qui sont utilisés dans ce domaine comme les alliages 7075, 2618. La prépondérance de l'aluminium dans l'aéronautique n'a pu être conservée que par une évolution considérable au fil des ans des alliages utilisés ; aujourd'hui encore l'aluminium représente près de 80% de la masse à vide des structures des avions modernes [13].

I.7.c. L'Aluminium dans l'armement et les équipements militaires

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

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

- les obusiers (exemple le M-102 dont la légèreté de l'aluminium permet le transport par hélicoptère) ;
- les pièces balistiques avec fonds et corps de propulseurs en alliages 2014, 7049, 7075 ;
- les matériels de génie militaire dont les engins de franchissement en alliage 7020 soudé ;
- les tubes (bazookas), les lance- rockets [13].

I.7.d. Aluminium au cœur de la vie quotidienne

Année après année, en raison de ses propriétés et de ses possibilités d'utilisation variées, l'aluminium se retrouve de plus en plus présent dans notre univers de tous les jours.

Le tableau I.1 représente le domaine d'utilisation de l'aluminium dans la vie quotidienne.

Tableau I.1 *Domaine d'utilisation de l'aluminium dans la vie quotidienne* [14].

Propriétés	Exemple d'utilisation
Solidité	Bouteilles sous pression ...
Esthétique	Appareils photo, montres ...
Conductibilité électrique	Fils de bobinage pour transformateurs ...
Conductibilité thermique	Casseroles, poêles, autocuiseurs ...
Protection	Conditionnement des médicaments, boîtes de conserve ...
Allègement	Bicyclette, bâtons de ski ...
Résistance à la corrosion	Citernes de transport de denrées alimentaires ...

Chapitre II

LA PROJECTION THERMIQUE

II.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.

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.

Différentes méthodes de dépôt permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer les propriétés de la 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 et la projection thermique.

Le dépôt en acier inoxydable concerné par cette étude a été réalisé par la technique de projection thermique à arc électrique entre deux fils. Nous allons situer dans ce chapitre cette technologie par rapport aux autres techniques de projection thermique, puis nous détaillons les principaux paramètres de ce procédé.

II.2. DIFFÉRENTES TRAITEMENTS DE SURFACE

On entend par traitement de surface toutes les opérations mécaniques, chimiques, électrochimiques ou physiques qui ont pour conséquence de modifier l'aspect ou la structure de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données [15].

L'objectif est de conférer à la surface d'une pièce ou d'un composant des propriétés différentes de celles de la masse, le plus souvent en termes de :

- Résistance à l'usure;
- Résistance à la corrosion;
- Tenue en fatigue (résistance à l'amorçage des fissures);
- Aspect extérieur, esthétique.

Ces traitements peuvent être localisés, concerner qu'une partie de la surface de la pièce. Les revêtements peuvent être monocouches ou multicouches, les couches internes assure une meilleure compatibilité et une meilleure adhérence au substrat, la couche externe assure la fonction superficielle. Les couches ont fréquemment des propriétés très différentes des matériaux massifs (dureté et limite d'élasticité élevées, module de YOUNG un peu plus faible), liées à une porosité non négligeable, une microstructure très éloignée de l'équilibre thermodynamique et de fortes contraintes résiduelles, très sensibles aux conditions de dépôt. Leur adhérence est largement conditionnée par la préparation de surface du substrat (rugosité, décontamination, décapage....) [16].

Les techniques de traitement de surface se répartissent en quatre grandes familles comme le montre la (figure II.1):

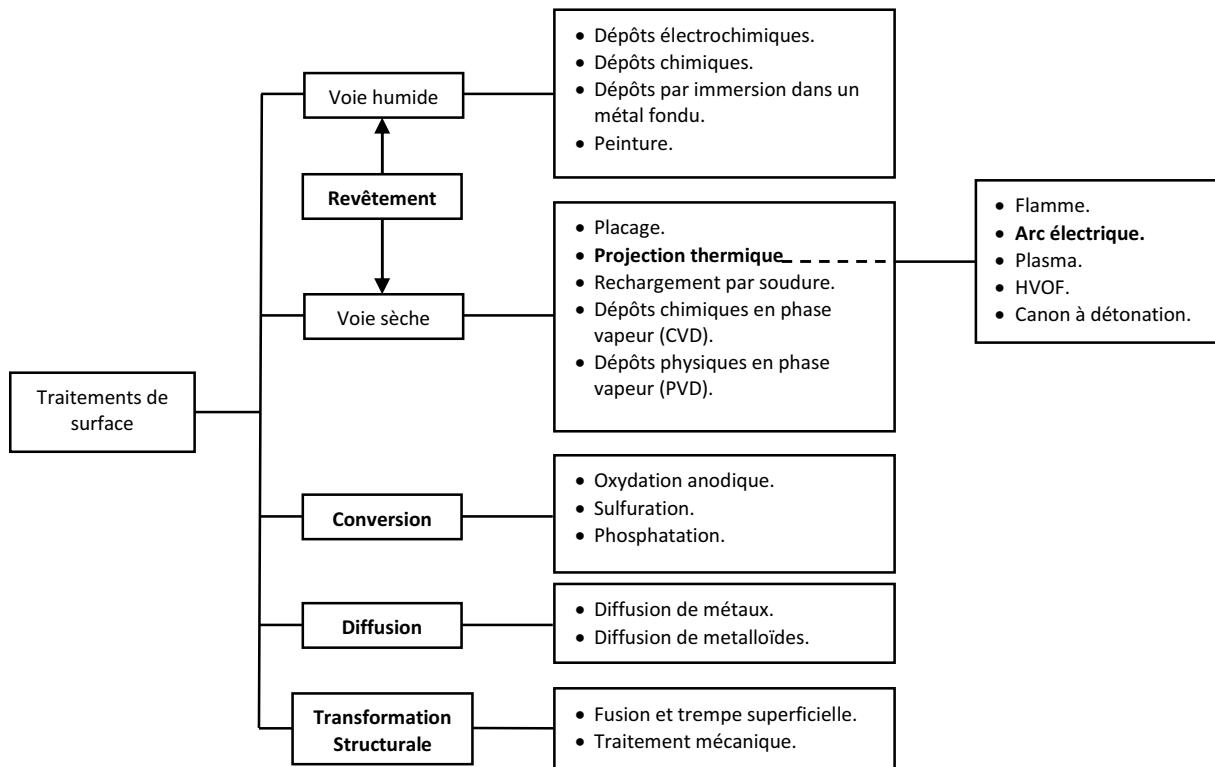


Figure II.1 Principales techniques utilisées en traitement de surface [17].

II.3. HISTORIQUE DE LA PROJECTION THERMIQUE

La première utilisation de la projection thermique remonte au début du 20^{ème} siècle, en suisse. M.U. Schoop avait l'idée d'utiliser un chalumeau oxyacétylénique pour projeter un métal à bas point de fusion sur un substrat. Cette technique s'est développée sous le nom de Schoopage et était utilisée pour protéger des pièces en acier par des revêtements de zinc et d'aluminium.

Depuis, la projection thermique a donné lieu à de très nombreux développements, ayant pour objectif d'étendre le champ d'application de la technique à de nouveaux matériaux et d'améliorer certaines propriétés des revêtements. Quelques dates ont particulièrement marqué la projection thermique [18] :

En 1911 : Utilisation de la projection à l'arc électrique par M.U. Schoop.

En 1951 : Invention de la projection plasma.

En 1955 : Naissance du canon à détonation.

En 1975 : Création de la projection plasma sous faible pression de gaz inerte.

En 1983 : Début de la projection à la flamme rapide (HVOF).

En 1991 : Emergence de la projection plasma sous gaz neutre à pression supérieure à la pression atmosphérique (système CAPS).

En 1993 : Prise de brevet du procédé PROTAL.

En 1995 : Développement de la projection froide ou "cold spray".

II.4. PLACE DE LA PROJECTION THERMIQUE PARMIS LES TRAITEMENTS DE SURFACE

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

-Le choix du 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 [19].

II.5. PRINCIPE GÉNÉRAL 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 (*figure II.2*) présente le principe général de la projection thermique : 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 [17].

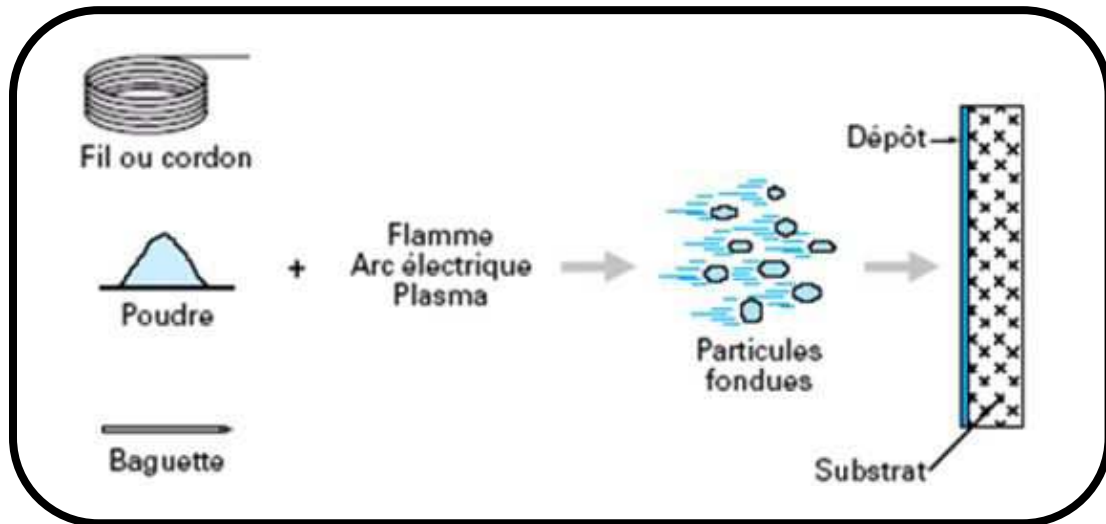


Figure II.2. Principe fondamental de la projection thermique [17].

II.6. PRINCIPE DE FORMATION DES COUCHES

Le matériau d'apport solide sous forme de poudre ou de fil est porté à l'état liquide ou pâteux au moyen d'une source de chaleur appropriée (flamme ou arc). Il est pulvérisé sous forme de gouttelettes au moyen d'un courant gazeux. Ce courant gazeux peut être constitué par un gaz auxiliaire qui est généralement de l'air, parfois de l'argon ou de l'azote, mélange aux gaz provenant de la combustion (flamme oxy-gaz) ou de l'ionisation des gaz de ceux-ci (plasma d'arc).

Les particules provenant de la pulvérisation sont véhiculées à grande vitesse :

- Environ 100 à 200 m/s pour les pistolets à gaz.
- De l'ordre de la vitesse du son pour les pistolets à plasma d'arc.

Les particules vont s'écraser sur la surface de la pièce. Au moment de l'impact sur le substrat les particules se présentent à l'état pâteux, au moins en périphérie (*Figure II.3*).

Les particules fondues doivent être à une vitesse assez grande pour qu'elles puissent s'étaler sur le subjectile et y former un dépôt par empilements successifs ; la source d'énergie doit donc être suffisamment puissante pour fournir l'énergie nécessaire à la fusion rapide du matériau (transfert thermique) et délivrer un jet gazeux susceptible de véhiculer les particules (transfert cinétique) [20].

La figure II.4 représente un schéma d'une coupe verticale d'un dépôt projeté.

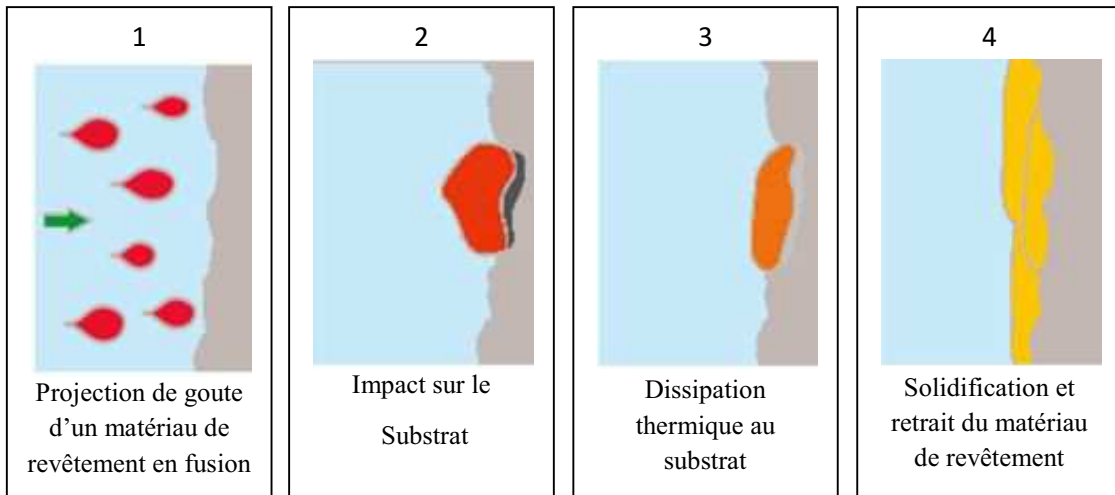


Figure II.3 Principe de formation des couches [20].

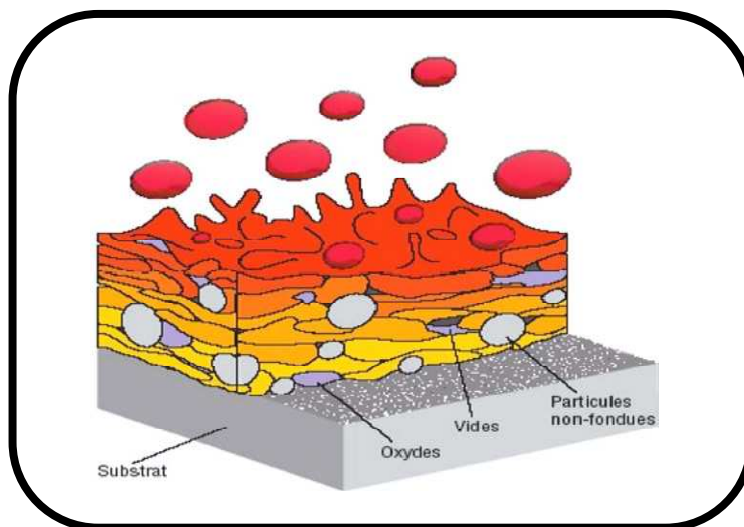


Figure II.4 Schéma représentant la coupe d'un dépôt projeté [20].

II.7. CARACTERISTIQUES GÉNÉRALES DES DÉPÔTS

II.7.a. Adhérence

Les dépôts adhèrent au substrat par un phénomène mécanique et de diffusion. Suivant les procédés et les matériaux, l'adhérence varie de 20 à 150 MPa. Dans le cas où elle s'avère insuffisante (cas de projections d'oxydes par exemple), on utilise des sous-couches d'accrochage, parmi lesquelles on peut citer l'aluminure de nickel, le molybdène ou encore les alliages du type Ni-Cr (80/20) [17].

➤ Les mécanismes influençant l'adhérence et l'édification du revêtement sont [21]:

- ✓ Propreté et étendue de la surface à revêtir ;
- ✓ Rugosité ;
- ✓ Température de projection et du substrat ;
- ✓ Temps (réaction, refroidissement) ;

- ✓ Vitesse de projection (énergie cinétique) ;
- ✓ Propriétés et réactions physico-chimiques des matériaux utilisés.

II.7.b. 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 [15].

II.7.c. 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 [15].

II.8. TYPES DE PROJECTION THERMIQUE

II.8.a. 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 : l'oxy-propane ou oxy-acétylène qui donnent des flammes oxy-combustible à des températures de 2800°C, 3100°C respectivement. Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2800°C, peuvent être projetés à la flamme.

II.8.a.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 oxy-combustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par le gaz de combustion.

❖ Matériels de la projection flamme-poudre

Il existe trois matériels dans la projection flamme-poudre :

1. Torche à gaz :

Il s'agit d'un chalumeau oxy-gaz (*Figures II.5, II.6*) 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 « auto-fusibles » à base de Nickel ou cobalt alliés à des éléments tels que le Chrome, tungstène...etc.

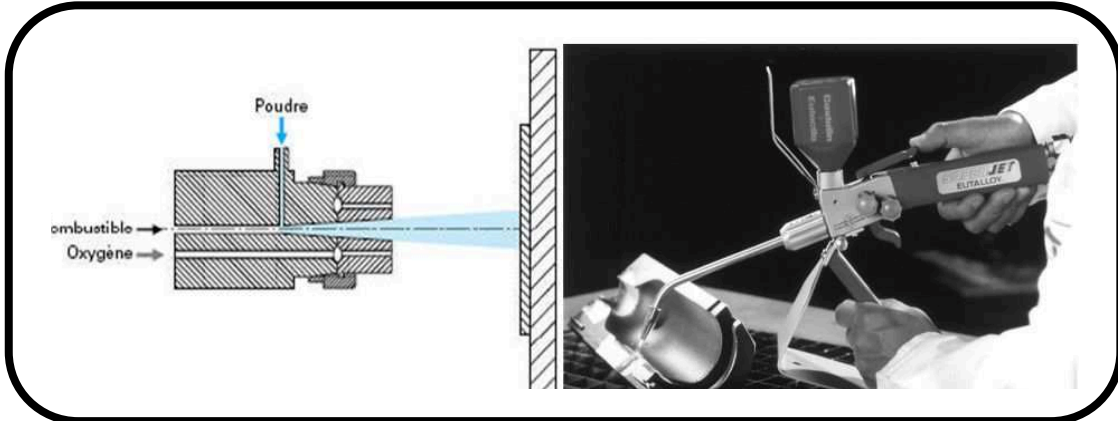


Figure II.5 Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre [17].

Figure II.6 Appareil de projection flamme-poudre [17].

2. Pistolet à poudre subsonique :

Ces pistolets 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 oxyacétylénique.

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 2 à 3 kg/h sans échauffement important du substrat.

3. Pistolet à poudre hypersonique :

On trouve dans ce matériel deux types de pistolets :

- Pistolet à tir discontinu ou canon de détonation (*Figure II.7*); 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.

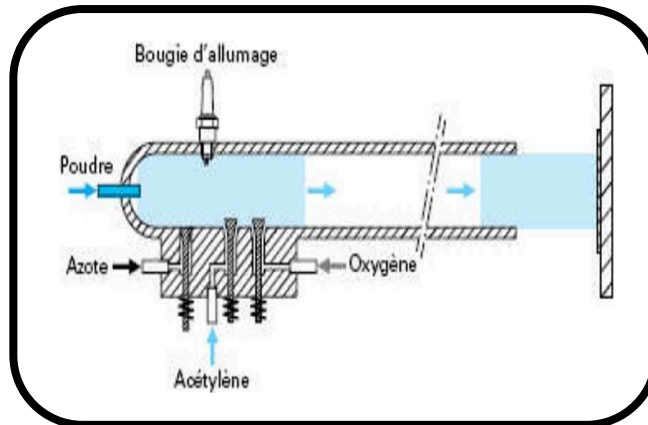


Figure II.7 Principe de fonctionnement d'un canon à détonation [17].

➤ Pistolet à tir continu ; son principe a été mis au point par une société américaine qui consiste à utiliser un jet à combustion interne (figure II.8,II.9). Dans la chambre de combustion, les gaz 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 HVOF (High Velocity Air Fuel) : il utilise un mélange de kérosène air comprimé pour la combustion.

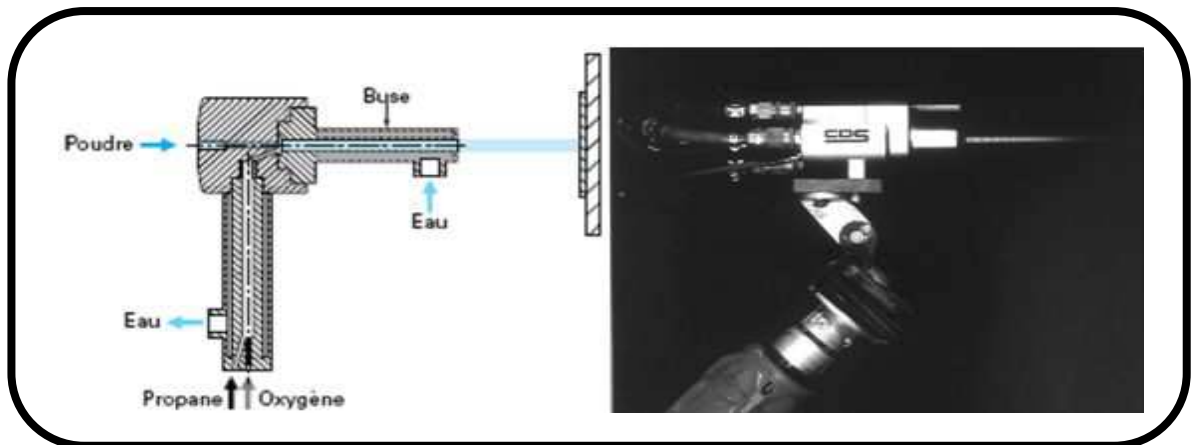


Figure II.8 Principe de fonctionnement d'un pistolet hypersonique à tir continu [17].

Figure II.9 Appareil de projection hypersonique [17].

II.8.a.2. La projection flamme-fil

La flamme sert à faire fondre le métal d'apport. Une fois fondu, ce matériau est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé.

❖ Pistolet flamme-fil :

Le pistolet de projection flamme-fil se compose de deux parties (*Figure II.10, II.11*) :

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

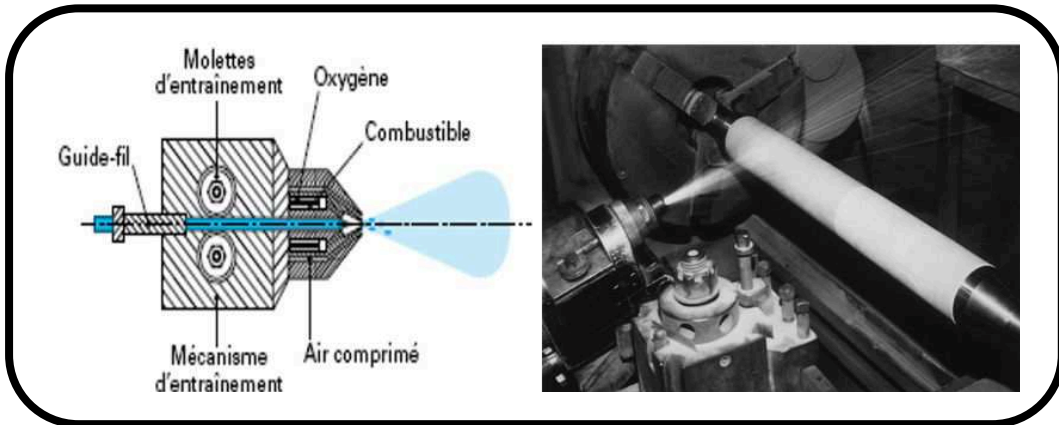


Figure II.10 Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [17].

Figure II.11 Appareil de projection flamme-fil [17].

II.8.b. La projection à l'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 (*Figure II.12*).

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

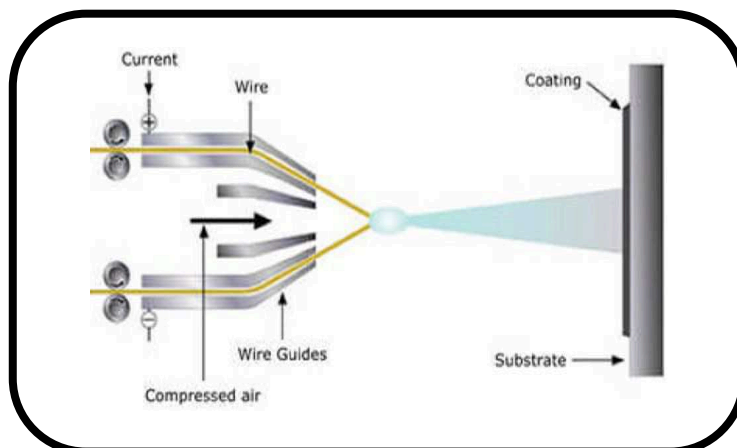


Figure II.12 Principe de la projection à arc électrique entre deux fils [22].

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.

II.8.c. La projection plasma

Le plasma est considéré comme le 4ème 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⁻ [23].

Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont [23]:

- 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.

Pour la projection thermique, deux propriétés conditionnent la vitesse et température des particules projetées [23]:

- 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).

Les figures II.13 et II.14 montrent le pistolet utilisé dans la projection plasma.

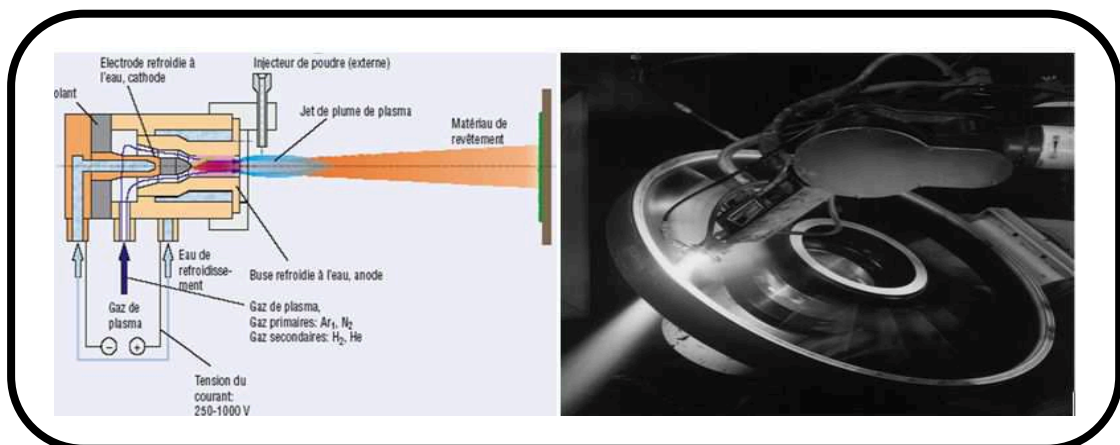


Figure II.13 Principe de fonctionnement d'une torche plasma [20].



Figure II.14 Appareil de projection plasma [17].

Un arc électrique se forme entre une cathode et la buse concentrique du pistolet pulvérisateur. 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 [20].

❖ *Comparaison entre les différents procédés de projection*

Le tableau II.1 représente une petite comparaison entre les différents procédés de projection thermique.

Tableau II.1 Comparaison entre les différents procédés [15].

Caractéristiques	Flamme poudre	Flamme fil-cordon	Arc électrique	Plasma ASP*	HVOF	Canon à détonation
Source de chaleur	Flamme	Flamme	Arc électrique	Plasma	Flamme	Flamme
Température de source de chaleur (°C)	3000	3000	6000	12000	3000	3000
Vitesse d'écoulement (m/s)	80-100	100-300	200-300	100-1200	400-2000	900-2000
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Air comprimé	Gaz flamme	Gaz flamme	Gaz flamme
Vitesse des particules (m/s)	40	150	150	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
Taux d'oxyde (%)	6 à 12	4 à 8	1 à 10	1 à 5	0.5 à 2	0.1 à 0.5
Rendement moyenne (%)*	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
Epaisseur déposé (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
Exemple des matériaux d'apport	Cermet céramique	Cermet céramique	Fils fourrés	Alliage céramique	Alliages cermets	Cermet céramique

II.9. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA PROJECTION PAR ARC ÉLECTRIQUES

❖ Les principaux avantages du procédé arc-fil sont les suivants [24] :

- ✓ un procédé économique, la puissance électrique est de l'ordre de 5 à 10 kW et le gaz utilisé 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 [24] :

- ✓ 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.10. MATÉRIAUX PROJETÉS

II.10.a. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés lors de la projection thermique sont très nombreux et leur nombre augmente en fonction de nouvelles applications.

Nous pouvons les classer de la façon suivante :

- Les aciers,
- Les alliages métalliques à base de cobalt, cuivre, nickel, zinc,
- Les nitrures, les carbures et les oxydes,
- Les matières plastiques (polyamide, polyéthylène ...).

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

Les principales formes commercialisées sont [25]:

- Les fils nus massifs ou les fils fourrés,
- Les poudres,
- Les cordons,
- Les baguettes.

II.10.b. Domaine d'utilisation des différents matériaux de projection

Le tableau I.1 représente les différents matériaux utilisés en projection thermique.

Tableau II.2 Domaine d'utilisation des différents matériaux de projection [17].

	Dénomination	Flamme	Arc	Plasma	HVOF	C à D
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 auto-adhérents (base cobalt)				X	
		X				
7	Alliages base nickel • Nickel • Alliages auto-adhérents (NiCrBSi) • Alliages auto-adhérents chargés carbures • Inconel • Monel	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
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 auto-adhérents • Aluminure 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			

Chapitre III

LES

MULTI-MATÉRIAUX

III.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 des traitements de surface et des revêtements qui améliorent la tenue en service des pièces mécaniques soumises à des diverses sollicitations.

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

III.2. DÉFINITION

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

Chaque type de matériau possède des propriétés et des caractéristiques qui lui sont propres. Les métaux sont en général tenaces et ductiles, les matières plastiques sont légères, ont une faible rigidité et des propriétés mécaniques moyennes, et elles sont parfois fragiles, les céramiques ont un module d'élasticité et une résistance théorique à la traction très élevée [26].

III.3. TYPES DES MULTI MATÉRIAUX

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

III.3.a. Revêtements monocouches

Le revêtement est projeté directement sur un substrat (*Figure III.1*). Dans ce cas, il est recommandable que les coefficients de dilatation thermique de ces deux matériaux soient les plus proches possibles, sauf si une énergie d'adhésion forte peut être obtenue compte tenu des éléments en présence [26].

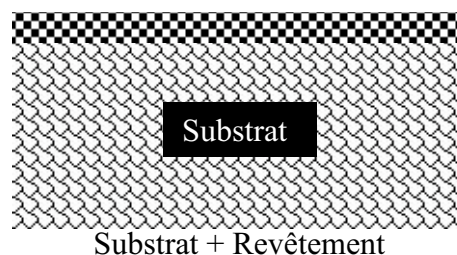


Figure III.1 Revêtement monocouche [26].

III.3.b. Revêtements bicouches

Appelés « duplexes », ces revêtements sont constitués d'un revêtement assurant la protection vis-à-vis d milieu externe, associé à une sous couche d'accrochage (fig. III.2) qui peut jouer d'une part le rôle de barrière chimique et d'autre part d'accommoder les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux[26].

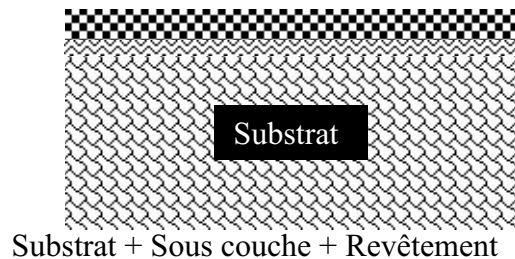


Figure III.2 Revêtement bicouche [26].

III.3.c. Revêtements multicouches

Ils sont composés d'une sous couche recouverte à son tour d'une couche intermédiaire séparant ainsi le revêtement et la sous couche (Figure III.3) [26].

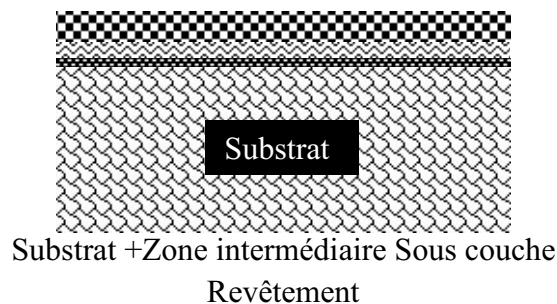


Figure III.3 Revêtement multicouche [26].

III.4. PROPRIÉTÉS DES MULTI-MATÉRIAUX

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.

III.4.a. Mouillabilité et énergie de d’adhésion

❖ Énergie de d’adhésion

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 [27].

Elle s’écrit, selon la relation de Dupré :

$$W_{adh} = \gamma_D + \gamma_S - \gamma_{DS} \dots \dots \dots (III.1).$$

Avec :

γ_D et γ_S : Respectivement les énergies de surface du dépôt et du substrat.

γ_{DS} : Énergie d’interface.

❖ Mouillage

Lors de l’élaboration des interfaces par projection thermique, un liquide est mis en contact avec un solide. Ainsi, plusieurs phénomènes interviennent, qui permettent de mettre en évidence le mouillage (figure III.4).

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 [28].

$$W_{adh} = \gamma_{SG} + \gamma_{LG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} (1 + \cos \theta) \dots \dots \dots (III.2)$$

γ_{SG} : Energie de surface S/G.

γ_{SL} : Energie de surface.

γ_{LG} : Energie de surface.

θ : Angle de contact.

W_{adh} : Energie d’adhesion.

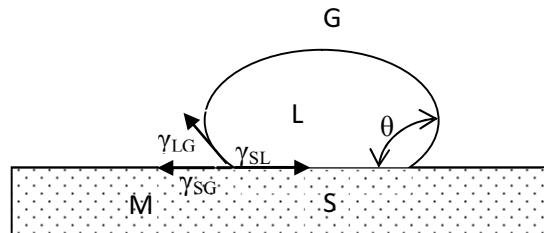


Figure III.4 Goutte de métal liquide sur une surface plane.

Le mouillage total, réalisé pour $\theta = 0$, correspond donc au maximum du travail d’adhésion. D’autre part, le mouillage peut être accompagné de transferts de masse à l’interface. L’étalement du liquide peut, en effet, être contrôlé par de la diffusion superficielle [28].

III.4.b. 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 inter-diffusion peut aller jusqu'à la disparition complète de l'interface, déplacée ou remplacée par une zone de transition.

Des phases intermédiaires, dont la composition est constante, peuvent également être formées suivant les propriétés du couple métallurgique en présence.

L'inter-diffusion est généralement considérée comme bénéfique pour l'adhérence. La formation de phases intermédiaires fragiles aux interfaces peut conduire à une mauvaise adhérence des revêtements ou au contraire l'améliorer [29].

III.4.c. 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, conduit à une augmentation de l'adhérence des revêtements [30-31].

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 (*Figure III.5*).

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

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 [32-33].

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.

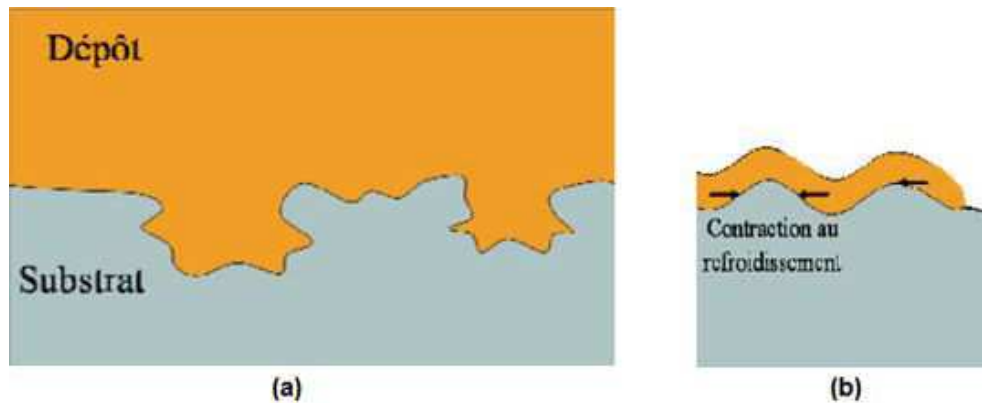


Figure III.5 Illustration de l'accrochage mécanique [34].

III.4.d. Liaisons interatomiques

Les différents types de liaisons interatomiques peuvent être établis aux interfaces et conduire à l'adhérence des revêtements. Toutefois, les forces d'attraction correspondantes à ces liaisons ne peuvent s'appliquer que si les deux matériaux sont suffisamment proches ($<0,5 \text{ nm}$) [33].

III.4.e. Les contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont des contraintes multiaxiales statiques qui existent dans un système isolé macroscopique soumis à aucune force ni moment extérieur et qui se trouvent en équilibre mécanique. Les causes de leur naissance sont les procédés de fabrication et de finition de telle façon, que toute déformation non uniforme génère des contraintes résiduelles à toute échelle de la structure. Ces déformations proviennent sous l'effet thermique, métallurgique et mécanique (grenailage...). Ces différents traitements introduisent à la surface des pièces des contraintes résiduelles néfastes qui vont à leur tour augmenter les contraintes de service, et conduisent donc à une mauvaise tenue à la fatigue [35].

On distingue trois niveaux de contraintes internes lorsque l'on se déplace de l'échelle du réseau à l'échelle macroscopique [35] :

- ✓ Les contraintes internes d'ordre III : elles sont engendrées par les défauts du réseau tels que les lacunes, les impuretés, les dislocations.
- ✓ Les contraintes internes d'ordre II : ces contraintes sont liées aux problèmes d'incompatibilité de déformation de grains sous l'action d'une sollicitation. Elles sont définies à l'échelle de plusieurs cristaux et trouvent leurs origines dans la répartition hétérogène des contraintes internes du troisième ordre.
- ✓ Les contraintes résiduelles d'ordre I : ces contraintes intéressent un volume relativement important de matière et c'est pour cette raison qu'elles sont parfois appelées contraintes macroscopiques.

III.5. QUELQUES 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 [36] :

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

III.5.a. 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 (*Figure III.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 [37].

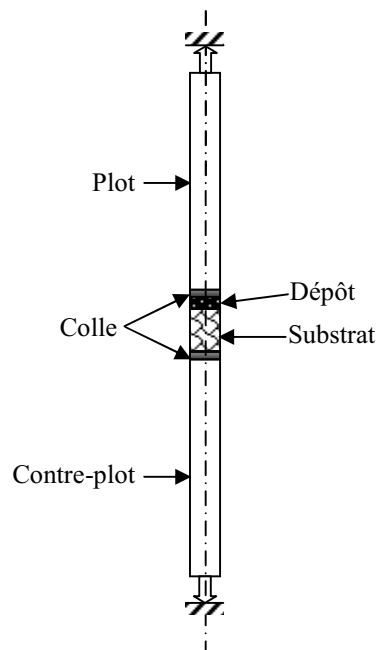


Figure III.6 Principe de l'essai d'adhérence par plot-collé [37].

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

$$\sigma = F/S \dots\dots\dots (III.3)$$

σ : contrainte de traction.

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

F : la charge appliquée.

III.5.b. Gonflement-décollement

L'essai de gonflement (ou "blister" ou encore "bulge test") permet de déterminer l'énergie d'adhérence inter-faciale entre un revêtement ductile et son substrat (Figure III.7) [37].

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.

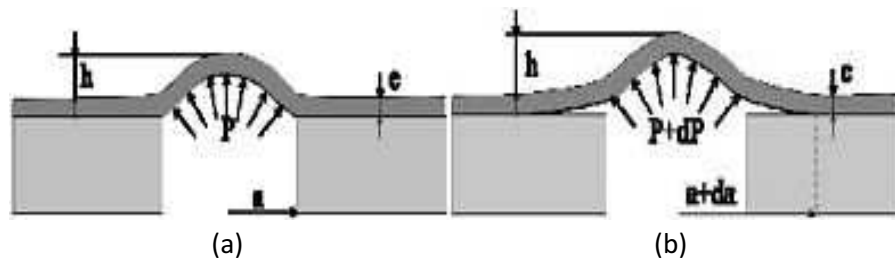


Figure III.7 Schéma des étapes de (a) gonflement et de (b) décollement de l'essai "bulge test" [37].

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

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 [37].

La courbe résultante de cet essai est représentée dans la figure III.8.

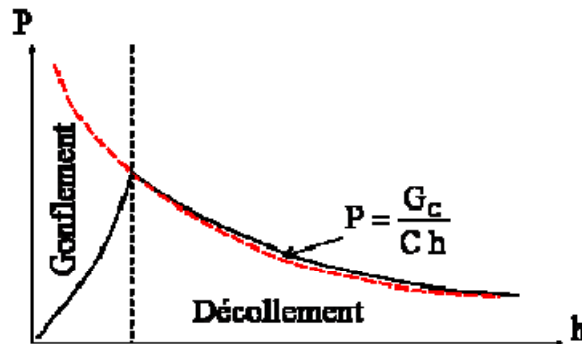


Figure III.8 Allure d'une courbe de gonflement-décollement [38].

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 [38].

III.6. RÔLES DES REVÊTEMENTS

III.6.a. Protection contre la corrosion

Les dépôts en acier inoxydable réalisés par projection thermique sont souvent utilisés pour protéger la surface des métaux contre la corrosion, et plus particulièrement contre la corrosion aqueuse. Ces dépôts protègent des pièces structurales du contact avec l'eau ou d'autres liquides. Un autre groupe d'applications concerne la protection contre la corrosion à chaud qui peut avoir lieu dans des turbines de moteurs aéronautiques ou des turbines à gaz [39-40].

La résistance à la corrosion dépend surtout du matériau projeté et de la porosité de dépôt. Pour diminuer cette porosité, il est recommandé d'utiliser des techniques de projection énergétiques, telles que la projection par détonation ou la projection par plasma sous vide [41].

III.6.b. Protection contre l'usure

L'usure peut être produite par un contact de glissement (frottement) ou de roulement entre les surfaces de deux solides, ou bien par l'écoulement sur une surface d'un fluide chargé de particules solides (érosion).

Comme il s'agit d'un processus superficiel, les traitements de surface et revêtements y jouent un rôle essentiel. La lubrification permet d'éviter le contact direct entre deux surfaces et donc de réduire l'usure.

Tout mouvement relatif des deux surfaces solides en contact se traduit par une perte de matière par arrachement de particules aux aspérités lors du déplacement imposé. Si les deux solides sont de duretés comparables et adhèrent facilement, l'usure est dite adhésive, et se répartit également sur les deux matériaux. Si l'un des deux matériaux est beaucoup plus dur que l'autre, ses aspérités arrachent des micro-copeaux à l'autre, et l'usure dite abrasive porte essentiellement sur le matériau le moins dur. Dans les deux cas, après une période de rodage à frottement important, les débris d'usure forment une couche d'un tiers-corps qui s'interpose entre les deux surfaces et peut contribuer à la dégradation du matériau ou à diminuer le frottement et à limiter l'usure ultérieure [16].

Chapitre IV
TECHNIQUES
EXPÉRIMENTALES

IV.1. INTRODUCTION

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

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

Nous nous intéresserons à la qualité de l'interface entre les antagonistes et en particulier l'adhérence entre le dépôt et le substrat.

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

IV.2. MATÉRIAUX UTILISÉS

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

IV.2.a. Substrats

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

*La composition chimique de ce substrat est la suivante :

Tableau IV.1 Composition de l'AU4G [42].

Éléments	Cu	Mg	Mn	Si	Al
Composition %	4	0.7	0.5	0.5	Le reste

➤ **AG3** : cet alliage est moins dur que l'AU4G, mais cela n'empêche pas son utilisation en carrosserie. Mise 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 ce substrat est la suivante :

Tableau IV.2 Composition de l'AG3 [42].

Éléments	Mg	Cr	Mn	Al
Composition %	3.1	0.3	0.3	Le reste

IV.2.b. dépôts

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

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

*Sa composition chimique est présentée dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 Composition de la Thermanit [42].

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

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

IV.3. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

IV.3.a. Décapage

Nous avons utilisé 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 H_2SO_4 + acide chromatique ;
5. rinçage à l'eau courante ; **mise en bain de zincate de sodium** ;
6. séchage au méthanol.

Le rôle de cette opération est d'éliminer la couche d'oxyde naturelle formée en surface du substrat qui joue le rôle d'une barrière de diffusion. Sachant que dans le cas de la protection contre la corrosion, la présence de ce film d'oxyde est importante.

Dans notre cas, les deux substrats l'AU4G et l'AG3 sont recouverts, par voie électrolytique, d'une couche de Zinc.

Après le décapage, les surfaces prennent un aspect grisâtre.

IV.3.b. Sablage

Parmi les différentes méthodes de rugosification, nous avons opté pour le grenailage qui consiste à cribler la surface par un jet de particules métalliques permettant d'obtenir une surface prête à recevoir le dépôt et assurer une bonne adhérence du point de vue mécanique. La pression du jet du grenaille utilisé égale à 7 bars, les particules pénètrent les interstices de la surface rugueuse et pour ainsi dire s'agrippent à ses aspérités.

IV.4. LA PROJECTION

IV.4.a. Paramètres de projection

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

Tableau IV.4 Les paramètres de projection.

Pression d'air dans le moteur	3.8 bars
Pression d'air dans la buse de projection	3 bars
Vitesse d'avance du fil métallique	0.064 m/s
Tension de générateur	30 V
Intensité de courant	100 A
Distance de projection	140 mm
Angle de tir	90 °

IV.4.b. Pistolet de projection

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

Cet appareil nommé THRMO-SPRAY 234 utilise l'arc électrique comme source d'énergie, c'est un pistolet à deux fils comme le montre la figure IV.1.

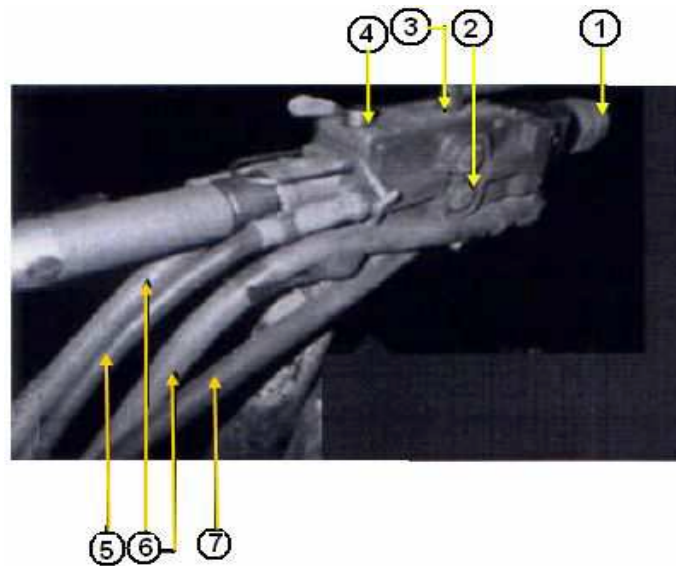


Figure IV.1 Pistolet de projection à arc entre deux fils « ARC SPRAY 234».

- 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.

IV.4.c. Principe de fonctionnement

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

❖ Différentes configurations des éprouvettes étudiées

Les figures IV.2, IV.3 et IV.4 représentent les différentes formes des éprouvettes utilisées dans cette étude.

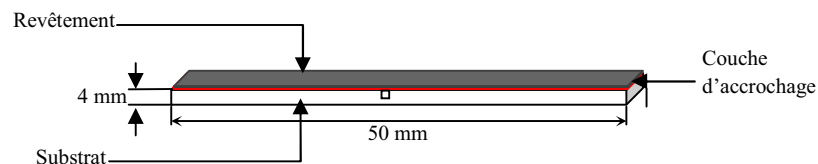


Figure IV.2 : Éprouvette de flexion.

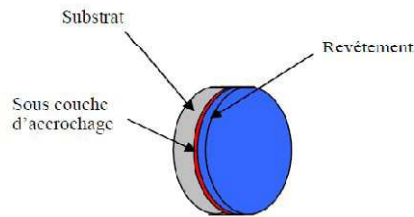


Figure IV.3 : *Éprouvette utilisée en micrographie et en post-traitement.*

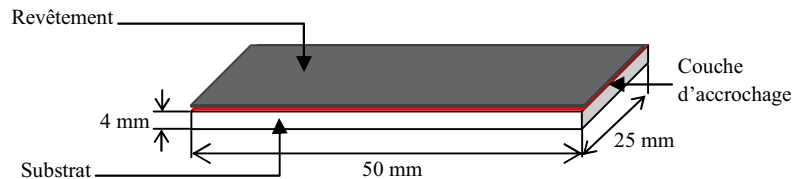


Figure IV.4 : *Éprouvette utilisée en usure.*

IV.5. PROCÉDURE ET TECHNIQUES D'ANALYSES

IV.5.a Métallographie

La métallographie est une technique qui est basée sur l'observation de la microstructure des échantillons en utilisant un microscope optique ou électronique.

L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.

Avant d'observer les échantillons par le microscope, il faut préparer la surface de ces derniers.

❖ *Polissage*

Avant de procéder au polissage, on a fait des coupes transversales pour les échantillons à étudier à l'aide d'une micro-tronçonneuse.

On fait subir aux surfaces à observer des polissages mécaniques, visant à les rendre planes et exemptes de toutes rayures, graisses ou déformations 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.600 jusqu'au plus fin P.1200, cela se fait en présence d'un arrosage abondant avec de l'eau pour éviter d'éventuels risques d'échauffement de la pièce.

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

Un nettoyage à l'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 microdureté ont été effectuées.

❖ *Analyse micrographique*

La micrographie est la première méthode utilisée pour visualiser la qualité du dépôt. Cette opération est réalisée à l'aide d'un microscope métallographique optique **OLYMPUS BX51M** en lumière directe.

Celle-ci nous permettra de révéler la structure des couches projetées et de mettre en évidence les éventuelles transformations ou inter-diffusion possible au niveau de l'interface. Cette analyse nous a permis de porter les premières remarques concernant la qualité du dépôt.

IV.5.b Étude de la microdureté

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

L'appareil d'essai est constitué 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 l'aide d'un logiciel informatique.

Le microduromètre utilisé est de type **Shimadzo MM1006** (Figure IV.5).



Figure IV.5 : Microduromètre utilisé.

Dans notre cas, on a appliqué une charge de 100 gf sur la surface du substrat et du revêtement pendant 15 secondes.

IV.5.c Essai de flexion

L'essai de flexion trois points a été effectué sur des éprouvettes AG3/NiAl/Thermanit (Figure IV.2). La machine utilisée est une machine de traction de type MAB SKF UE40 de capacité de 400 kN piloté par PC (Figure IV.6).



***Figure IV.6 :** Machine de traction utilisée.*

IV.5.d Essai d'usure

Le comportement en frottement et usure a été pris en considération et dont les paramètres de fonctionnement se résument comme suite :

- le tribomètre utilisé est de type bi-plan (Figure IV.7).
- les charges appliquées sont 70N, 90N et 40N ;
- la vitesse est de 60 tr/min;
- le nombre de cycles est de 2048 cycles ;
- la durée de l'essai est de 34 min 10 s.

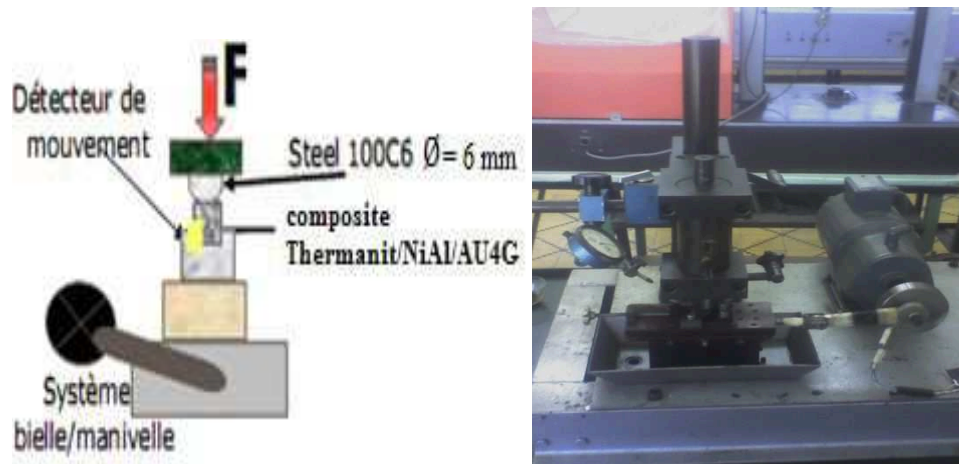


Figure IV.7 : Tribomètre Utilisé.

❖ ***Analyse des traces d'usure par Microscopie Electronique à Balayage***

Les analyses par microscopie électronique à balayage ont été effectuées suivant les traces d'usure de notre composite après les tests d'usure pour identifier les différents constituants.

La microscopie électronique à balayage (MEB) utilisé est de type ***QUANTA 600-FEI*** (Figure IV.8).



Figure IV.8 : Microscope électronique à balayage QUANTA 600-FEI

IV.5.e Post-traitement

Dans cette expérience, on va étudier l'influence du post-traitement sur la qualité du revêtement. Pour cela, on fait subir un traitement thermique (400°C) à trois échantillons de chaque nuance avec des durées de traitement différentes (15 min, 4 heures et 24 heures).

Chapitre V
RÉSULTATS ET
INTERPRÉTATIONS

V.1. ANALYSES PHYSICOCHIMIQUES DES DIFFÉRENTS COUPLES ÉTUDIÉS

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats issus des différents essais effectués. La figure V.1 représente un échantillon après revêtement.



Figure V.1 : Échantillons élaborés.

V.1.a Microstructures de l'état brut de projection

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) [43].

L'observation selon une coupe transversale, montre l'aspect des différentes couches relatives aux deux couples élaborés (figures V.1, V.2, V.3, V.4 et V.5).

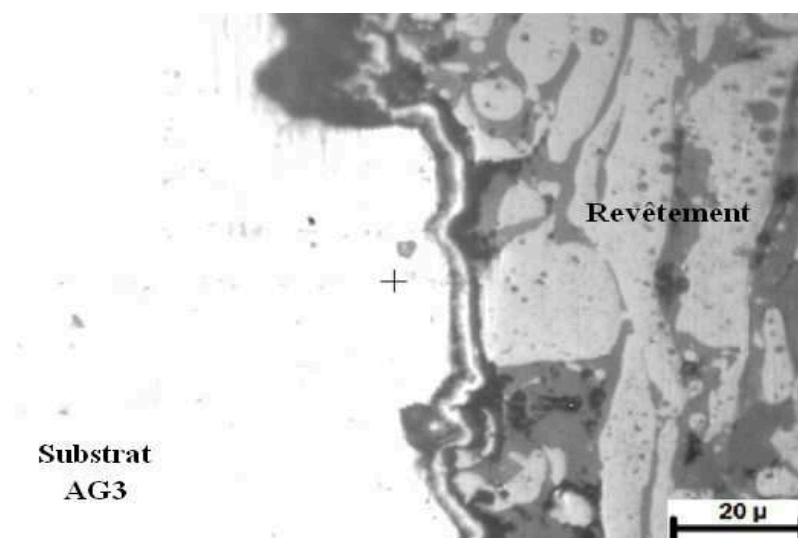


Figure V-2: Micrographie des interfaces de composite Thermanit/NiAl/AG3.

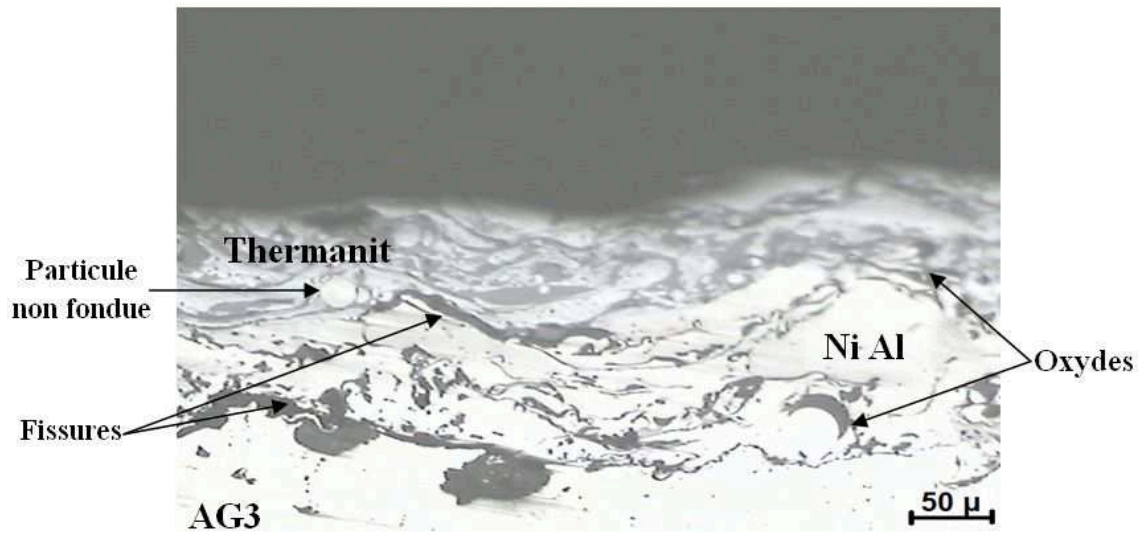


Figure V-3: Micrographie des interfaces du composite Thermanit/NiAl/AG3.

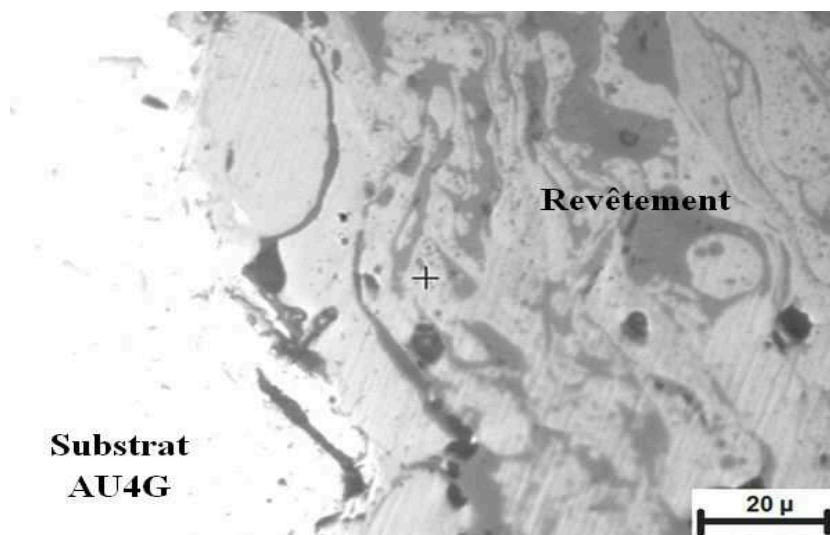


Figure V-4: Micrographie des interfaces du composite Thermanit/NiAl/AU4G.

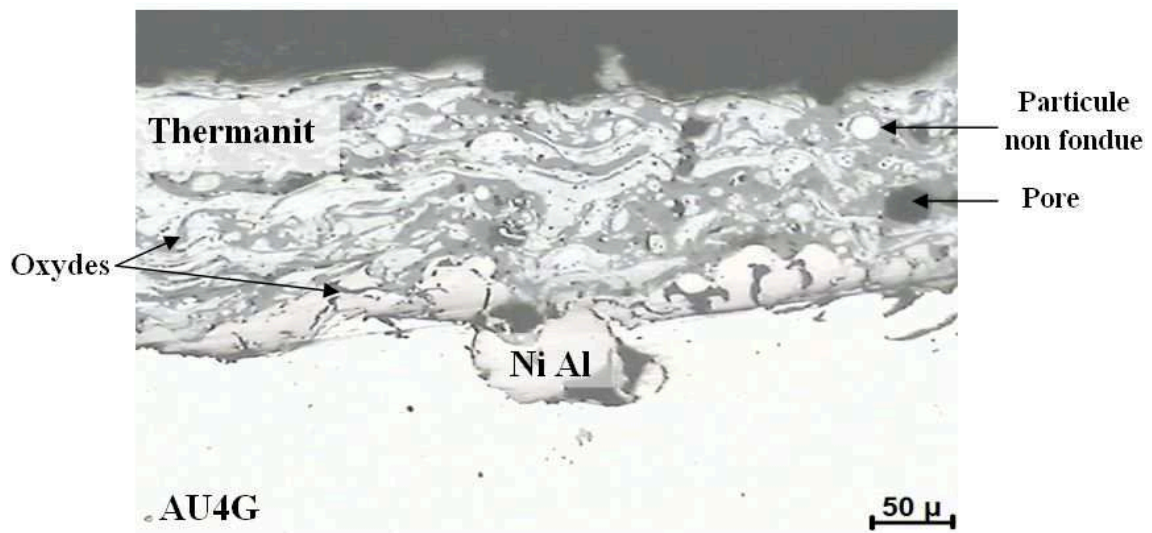


Figure V-5: Micrographie des interfaces de composite Thermanit/NiAl/AU4G.

La rugosité de la surface de la pièce traitée permet aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface ainsi créées et d'assurer un bon accrochage mécanique.

Les couches formées sur les deux substrats présentent des résultats différents :

- ✓ Dans le cas de l'AU4G, on remarque une bonne adhérence entre le substrat et la couche d'accrochage. Le Zn du décapage semble être responsable de ce résultat.
- ✓ Pour AG3, une mauvaise adhérence est soulignée.

Aussi, les propriétés thermiques (Coefficient de dilatation, conductivité thermique ...) de chaque antagoniste jouent un rôle primordial et influent sur l'accrochage entre les constituants.

V.1.b. Détermination des fractions des oxydes

Dans le cas des deux substrats, on a considéré la moyenne de quatre mesures par ImageJ pour calculer la fraction des oxydes.

❖ Composite Thermanit/NiAl/AG3

- 1^{er} essai : fraction d'oxydes 23% ;
- 2^{ème} essai fraction d'oxydes 24% ;
- 3^{ème} essai fraction d'oxydes 28% ;
- 4^{ème} essai fraction d'oxydes 31% ;

Le taux d'oxyde dans AG3 est 26.5 % .

❖ Composite Thermanit/NiAl/AU4G

1^{er} essai : fraction d'oxydes 22% ;

2^{ème} essai fraction d'oxydes 23% ;

3^{ème} essai fraction d'oxydes 29% ;

4^{ème} essai fraction d'oxydes 31% ;

Le taux d'oxyde dans AU4G est 26.25 %.

Les résultats obtenus sont conforme à ceux de la bibliographie [15].

V.1. c. Résultats du post-traitement

Après le traitement thermique on fait des analyses par microscope optique, le de V.6 jusqu'à V.13 représentent les micrographies obtenus.

❖ Composite Thermanit/NiAl/AG3

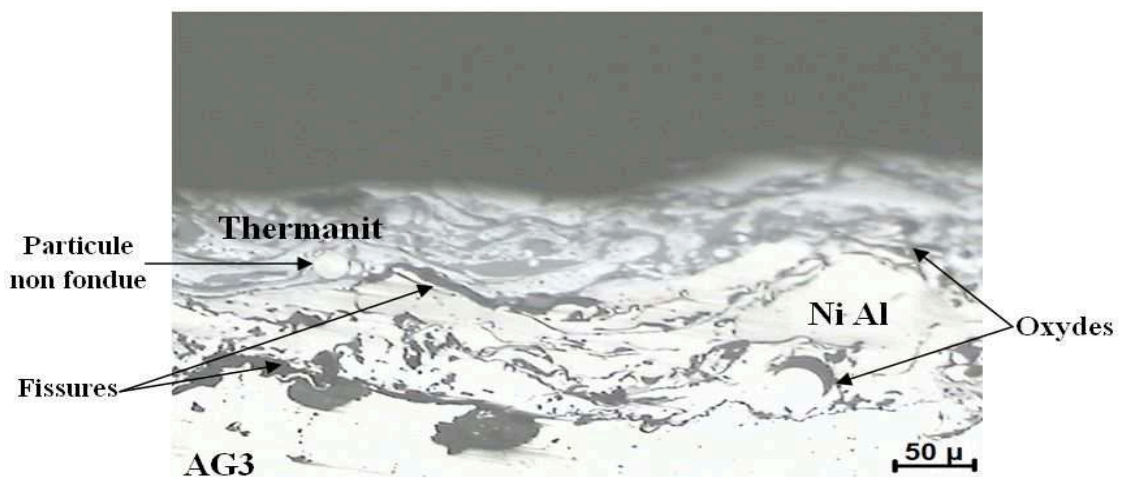


Figure V-6: Composite Thermanit/NiAl/AG3 brut.

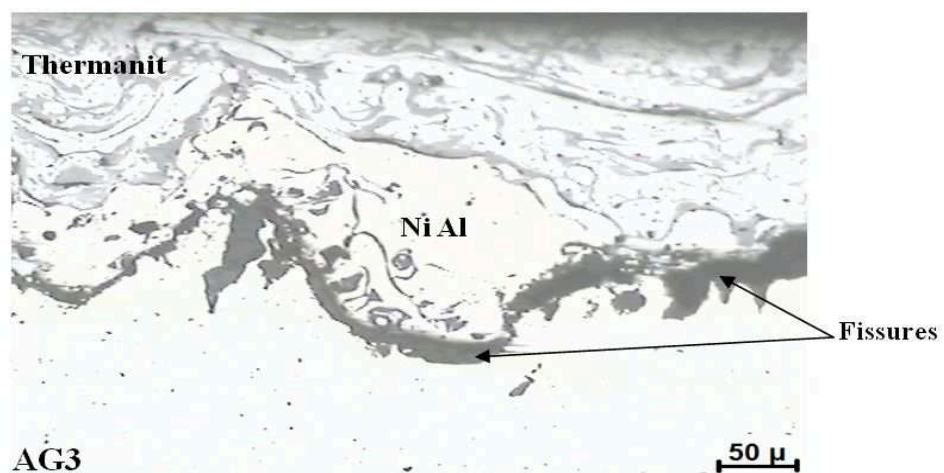


Figure V-7: Composite Thermanit/NiAl/AG3 ayant subit un traitement de 15 minutes.

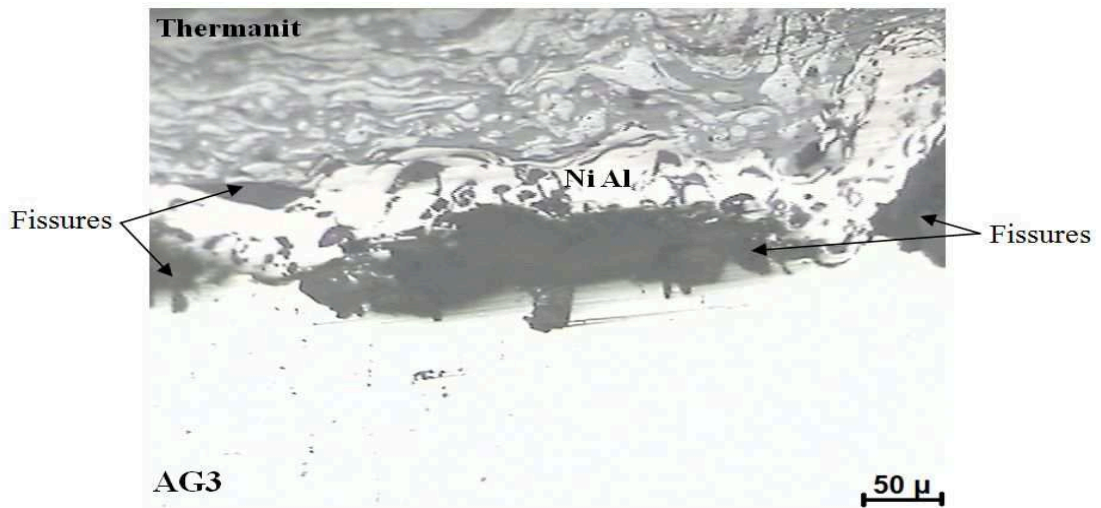


Figure V-8: Composite Thermanit/NiAl/AG3 ayant subi un traitement de 4 heures.

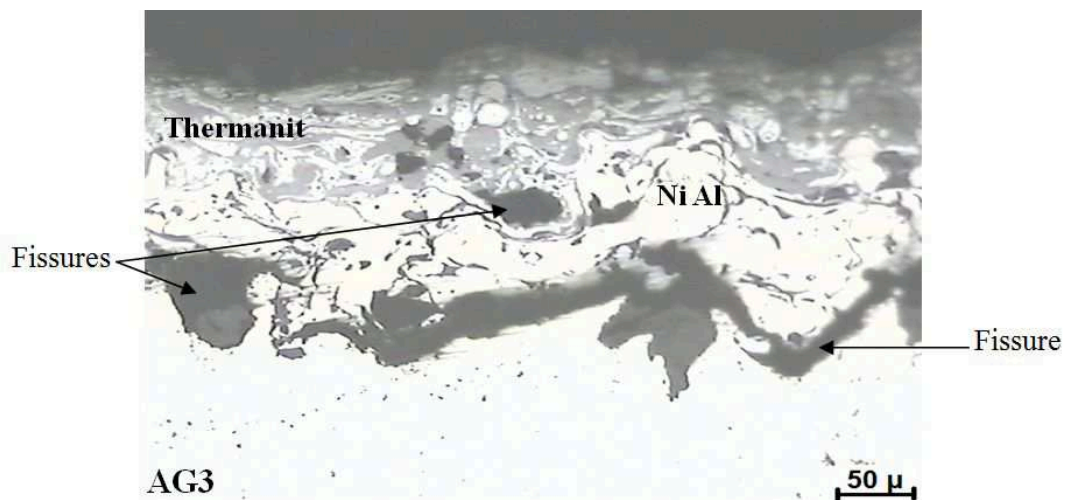


Figure V-9: Composite Thermanit/NiAl/AG3 ayant subi un traitement de 24 heures.

❖ Composite Thermanit/NiAl/AU4G

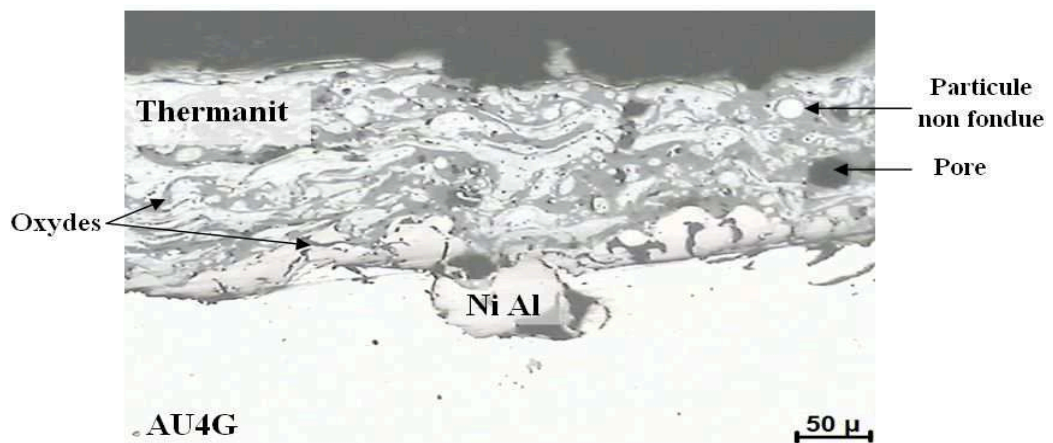


Figure V-10: Composite Thermanit/NiAl/AU4G brut.

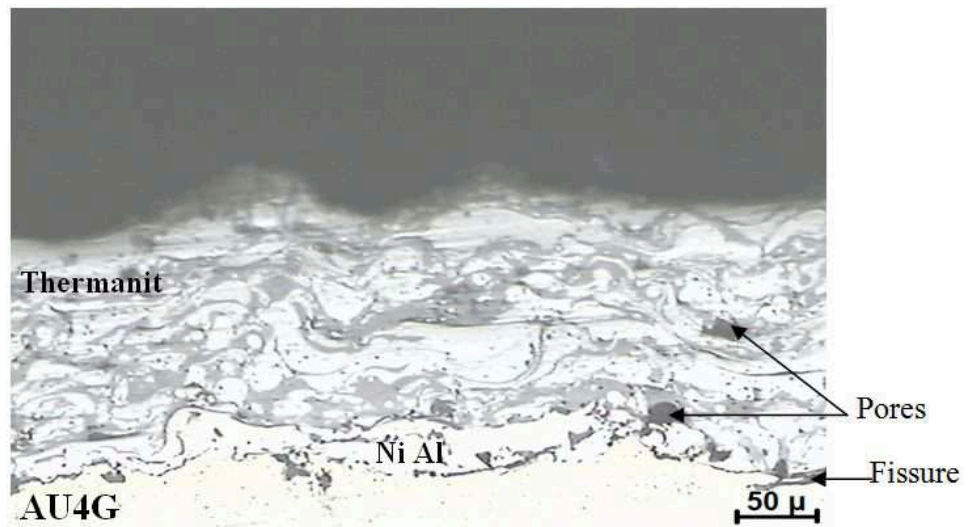


Figure V-11: Composite Thermanit/NiAl/AU4G ayant subit un traitement de 15 minutes.

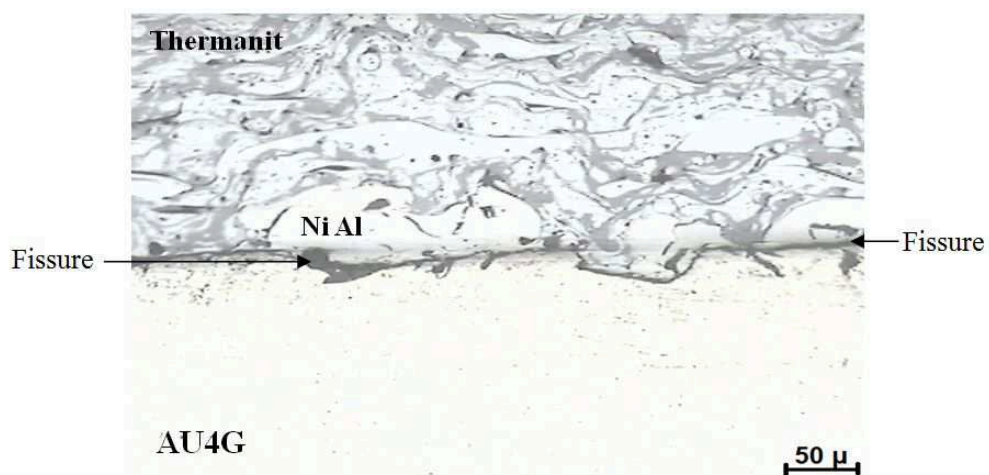


Figure V-12: Composite Thermanit/NiAl/AU4G ayant subit un traitement 4 heures.

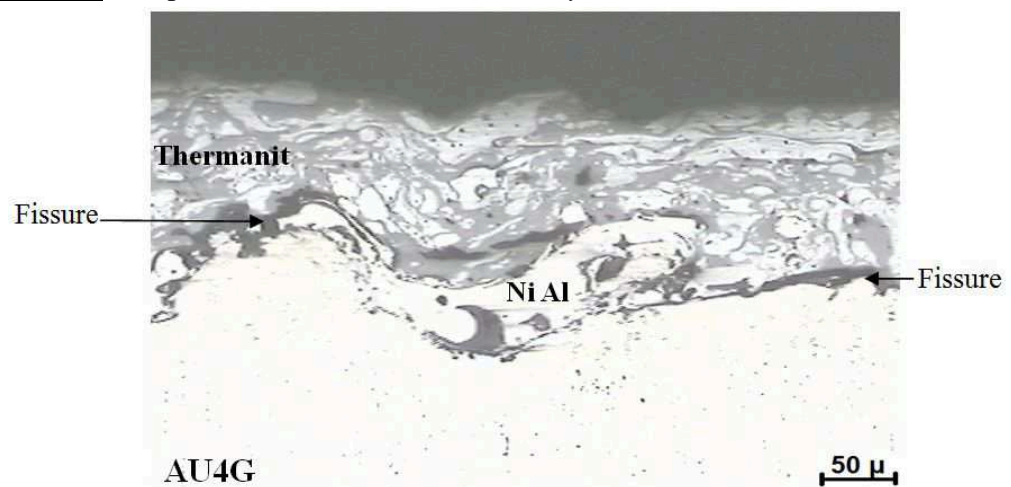


Figure V-13: Composite Thermanit/NiAl/AU4G ayant subit un traitement de 24 heures.

Pour cette partie, on a relevé la propagation de la fissure le long de l'interface et l'estimation est présentée sur les figures V-14,15.

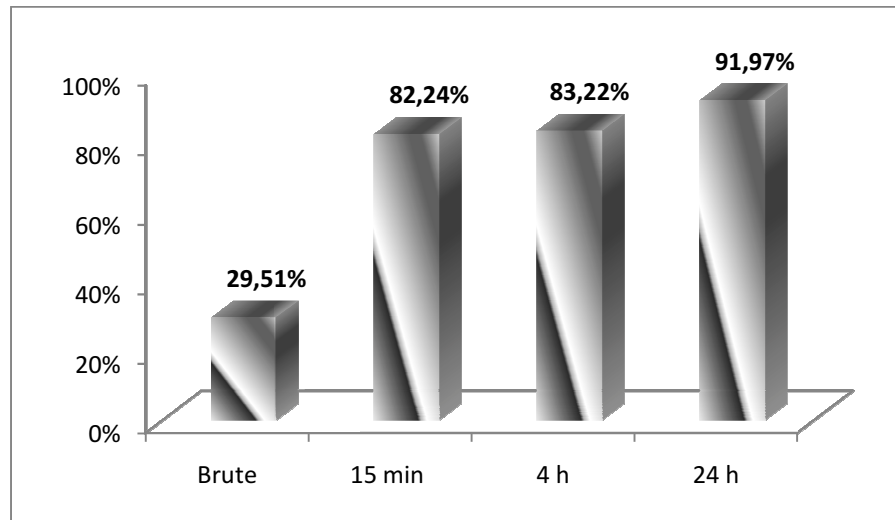


Figure V-14: Evolution de la fissure en fonction du temps, cas du composite Thermanit/NiAl/AG3.

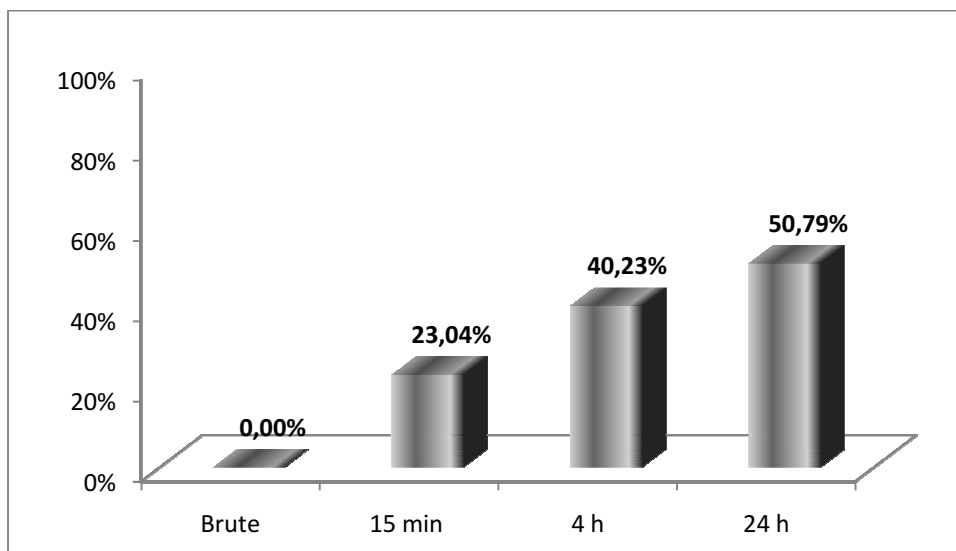


Figure V-15: Evolution de la fissure en fonction du temps, cas du composite Thermanit/NiAl/AU4G.

On remarque que les fissures au niveau des interfaces augmentent en fonction du temps. Celle-ci sont plus importantes dans le cas du composite a base de AG3.

V.2. Caractérisation mécanique des couples Thermanit/NiAl/AU4G et Thermanit/NiAl/AG3

V.2. a. Résultats de la microdureté

Des mesures de la micro-dureté Vickers ont été prises sur nos échantillons sous une charge de 100gf et sur le profil de la coupe transversale. Ces tests concernent les différentes régions à savoir le matériau de base (AU4G et AG3), la sous couche d'accrochage (NiAl) et le dépôt Thermanit.

Chaque valeur relevée représente une moyenne de cinq essais distincts sur le même niveau par rapport aux différentes interfaces.

❖ Composite Thermanit/NiAl/AG3

Les figures V-16,17 représentent les empreintes obtenues sur le composite a base de AG3

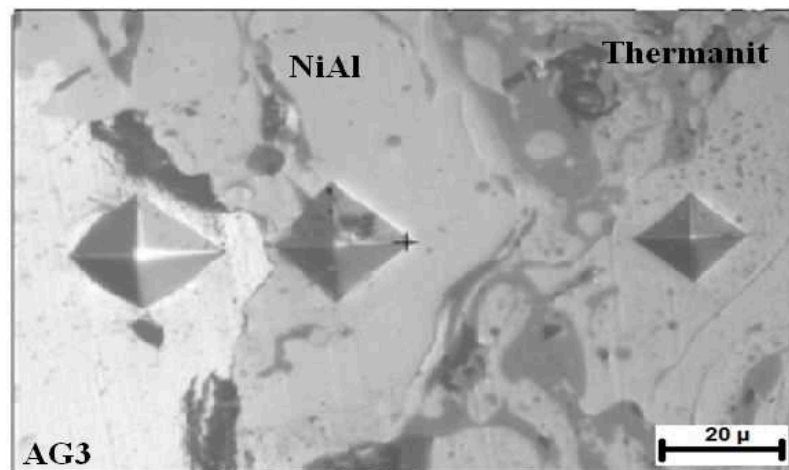


Figure V-16: Microdureté du composite Thermanit/NiAl/AG3.

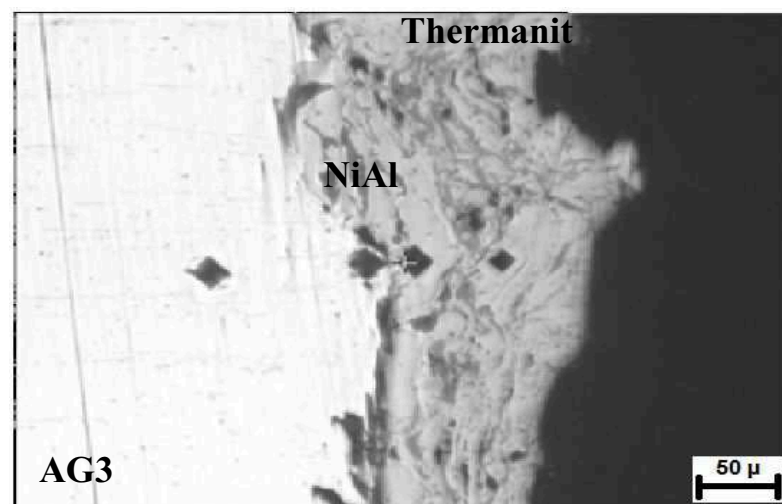


Figure V-17: Microdureté du composite Thermanit/NiAl/AG3.

* L'évolution de la micro-dureté du multi-matériau à base de l'AG3 est représentée sur la figure (V-18).

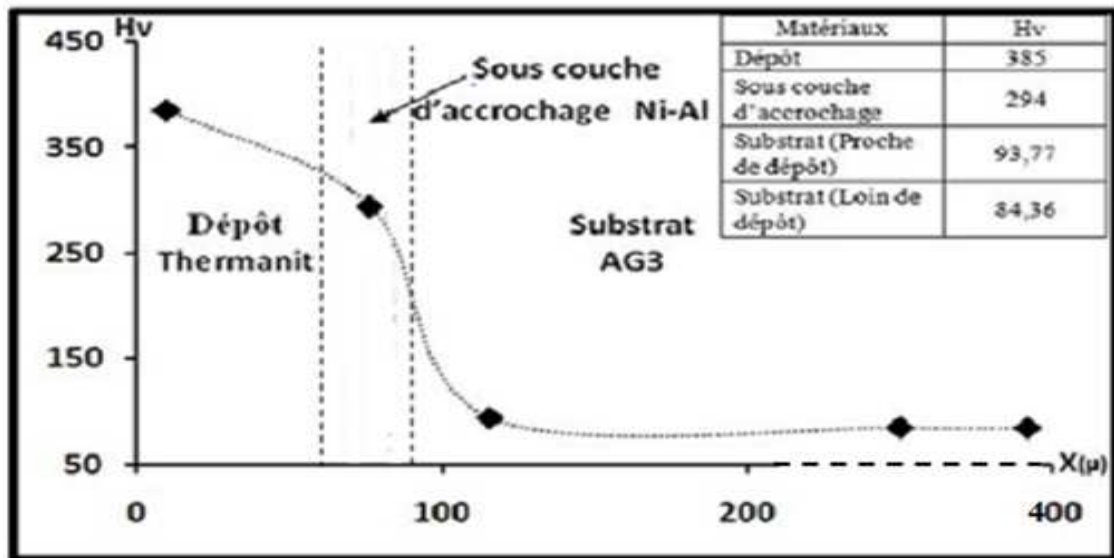


Figure V-18: Profil de la microdureté du multi-matériau à base de l'AG3.

❖ Composite Thermanit/NiAl/AU4G

Les figures V-16,17 représentent les empreintes obtenues sur le composite a base de AU4G

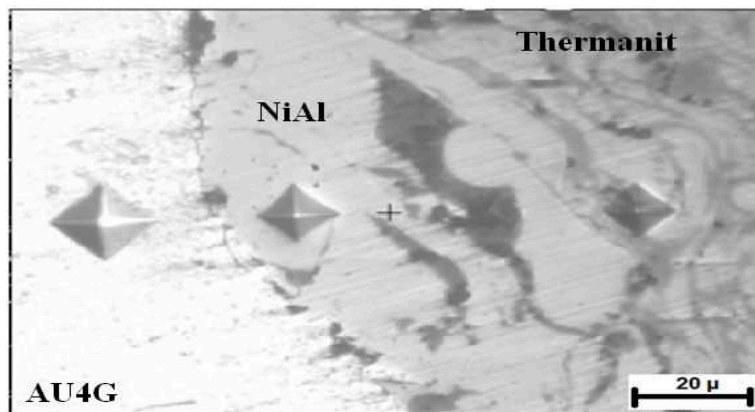


Figure V-19: Microdureté du composite Thermanit/NiAl/AU4G.

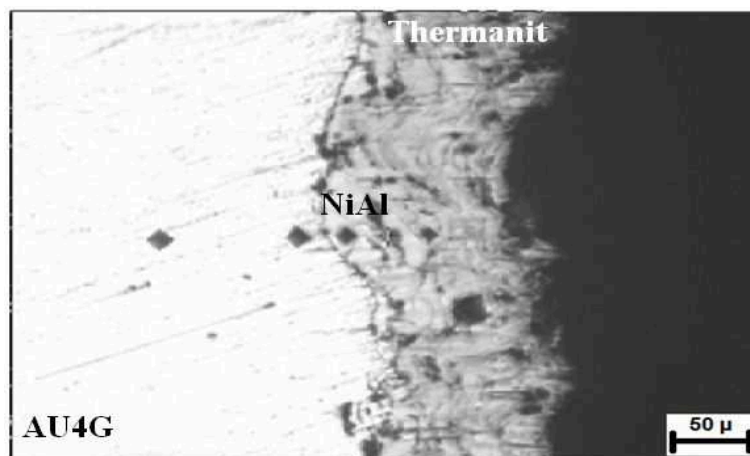


Figure V-20: Microdureté du composite Thermanit/NiAl/AU4G.

L'évolution de la microdureté du multi-matériau à base de l'AU4G est représentée dans figure (V-21).

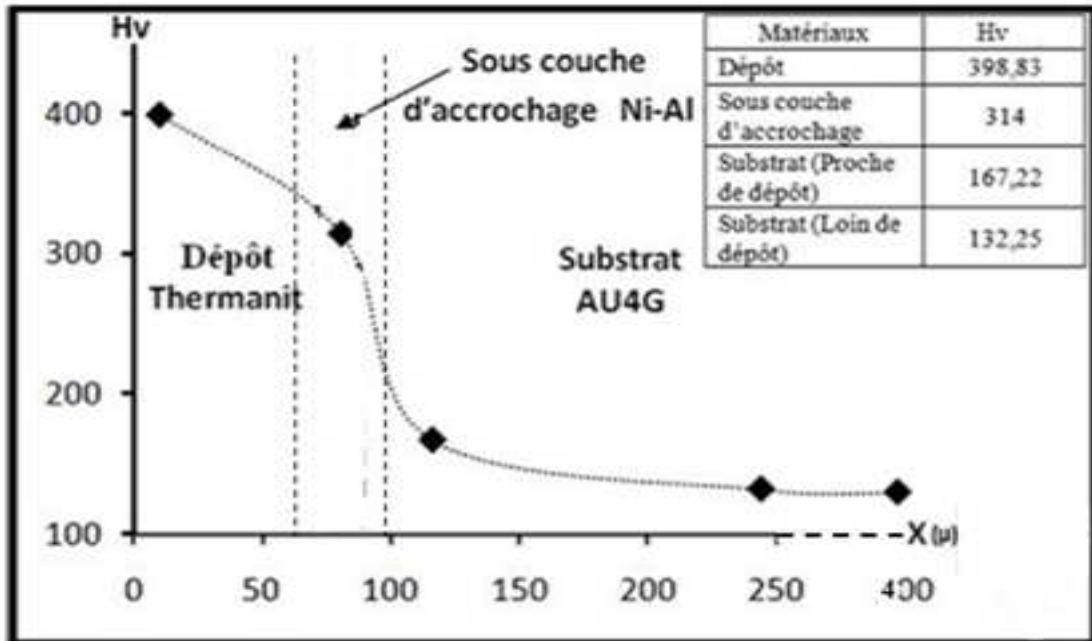


Figure V-21: Profil de la microdureté du multi-matériau à base de l'AU4G.

Les mesures de micro-dureté obtenues sur les deux multi-matériaux montrent que les valeurs du dépôt et de la sous couche d'accrochage sont plus grandes que celles des deux substrats et que la valeur de micro-dureté de la sous couche d'accrochage est proche de celle du dépôt. Aussi, la dureté du substrat AU4G est plus grande que la celle de AG3.

V.2.b. Flexion trois points du composite Thermanit/NiAl/AG3

Des éprouvettes de flexion trois points (figure V-22) ont été préparées pour suivre l'endommagement sous sollicitation mécanique des composites élaborés par projection thermique.

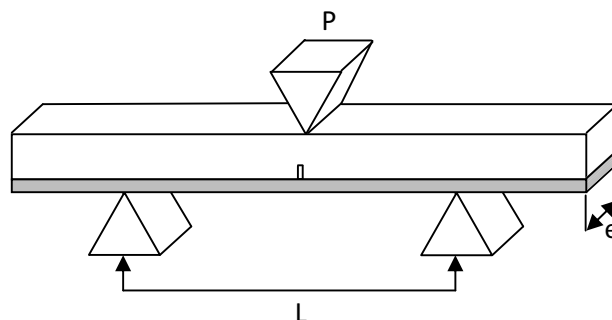


Figure V-22 : Eprouvette de flexion du multimatériau Thermanit/NiAl/AG3

L'essai de flexion en trois points a provoqué à l'interface des fissures longitudinales (figure V-23) et transversales (figure V-24).

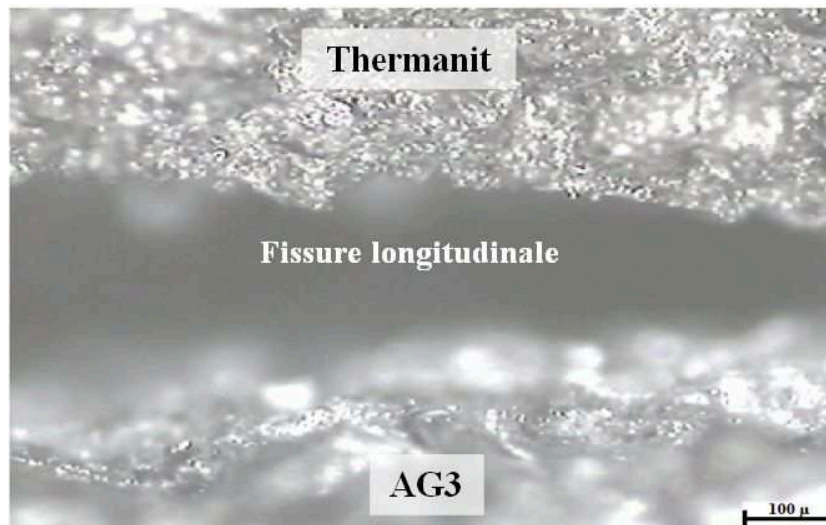


Figure V-23: Fissure longitudinale observée sous microscope optique.



Figure V-24: Fissure transversale observée sous microscope optique.

La courbe de flexion est présentée dans la figure (V-25).

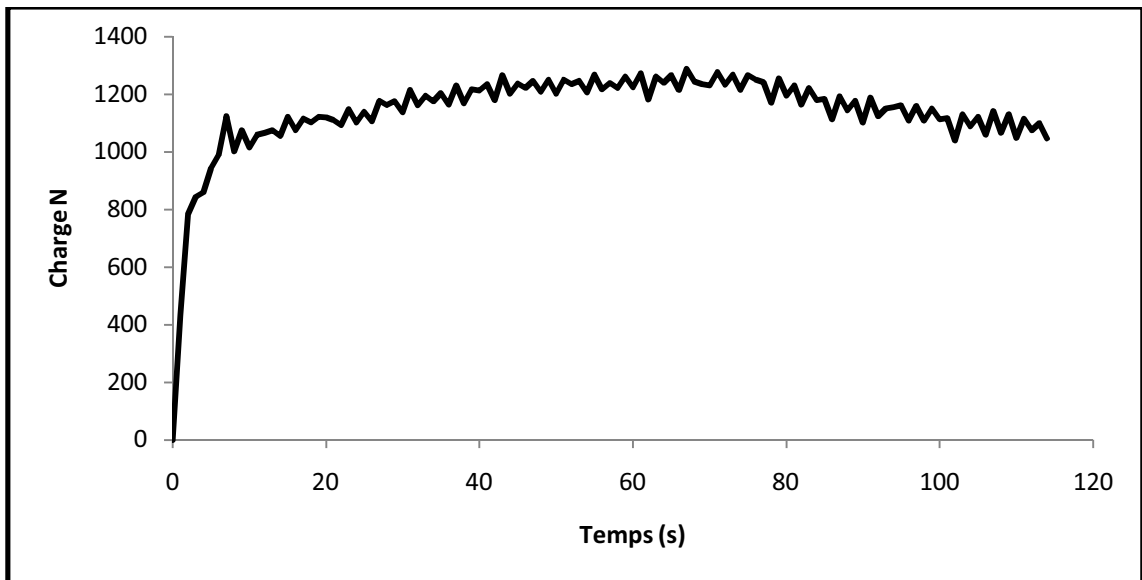


Figure V-25 : Courbe de flexion du composite Thermanit/NiAl/AG3.

Exploitation de la courbe :

Limite élastique du couple : F=845 N ;

Charge de rupture du revêtement : F= 1123 N ;

Charge maximale du substrat : F= 1266 N ;

Charge de rupture de substrat : F = 1047.

Le facteur d'intensité de contrainte a été déterminé en utilisant la méthode analytique [44] :

$$K_I = \frac{3PL}{2b^2e} \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{b}\right) \dots\dots\dots (V-1)$$

$f\left(\frac{a}{b}\right)$ = facteur de correction, dépendant du rapport $\frac{L}{b}$.

Pour $\frac{L}{b} = 4$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = 1.09 - 1.735 \left(\frac{a}{b}\right) + 8.20 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 14.18 \left(\frac{a}{b}\right)^3 + 14.57 \left(\frac{a}{b}\right)^4 \dots\dots\dots (V-2)$$

b = 5.6 mm.

L = 22.4 mm.

e = 2 mm.

a₀ = 0.226 mm.

P = 1.13 kN.

Pour a=a₀ on a :

$$K_{Ic} = 16.53 \text{ MPa } \sqrt{m}.$$

D'après la valeur obtenue du facteur d'intensité de contrainte, on peut dire que la résistance du dépôt n'est pas bonne.

V-2.3. Résultats d'usure

L'analyse en MEB des traces d'usure nous informe sur le mécanisme de dégradation de la surface (mode d'usure) et la nature des différents éléments présents.

Dans notre cas, on a considéré trois conditions différentes.

Les résultats obtenu sont représentés dans les figures V-26, 27,28.

- 1^{er} essai

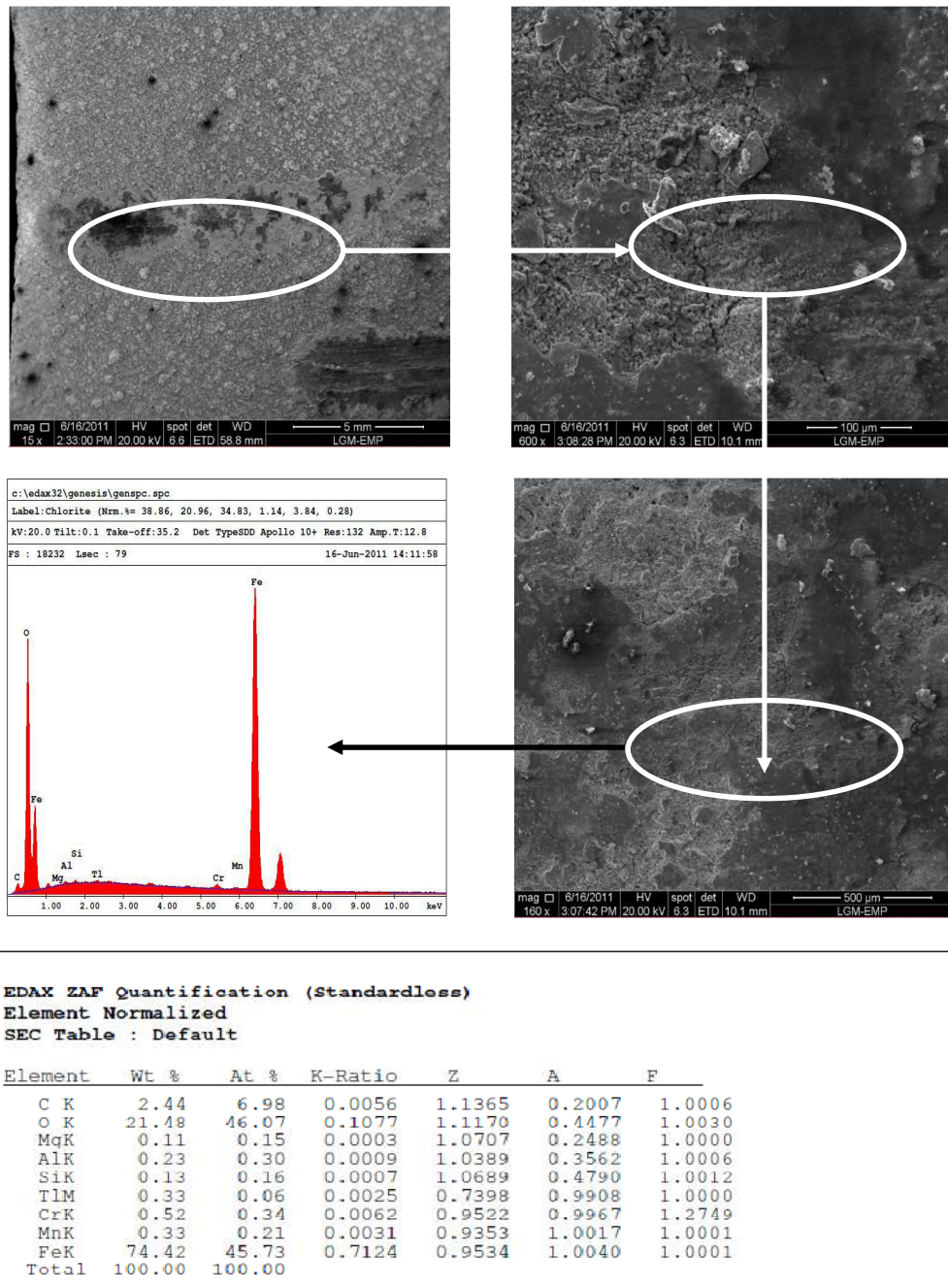


Figure V.26 : Image MEB de la trace d'usure du couple Thermanit/NiAl/AU4G et analyse en EDAX. $F=40N$; $V= 60$ tr/min.

L'analyse en EDAX montre la présence des différents éléments présents dans le dépôt Thermanit (Fe, Mn, Si ...) ainsi que de l'oxygène qui révèle éventuellement la présence d'oxydes.

- 2^{ème} essai

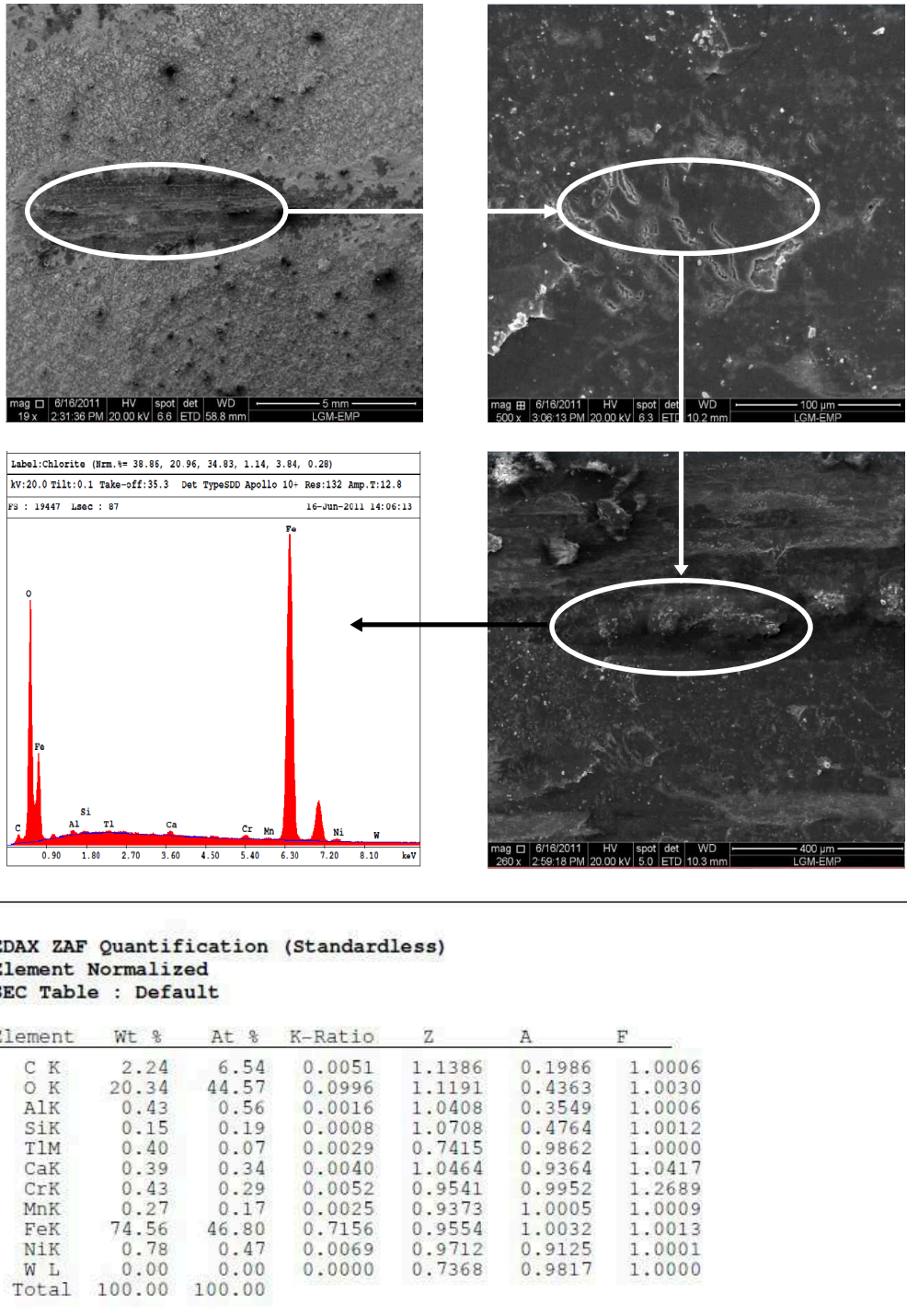
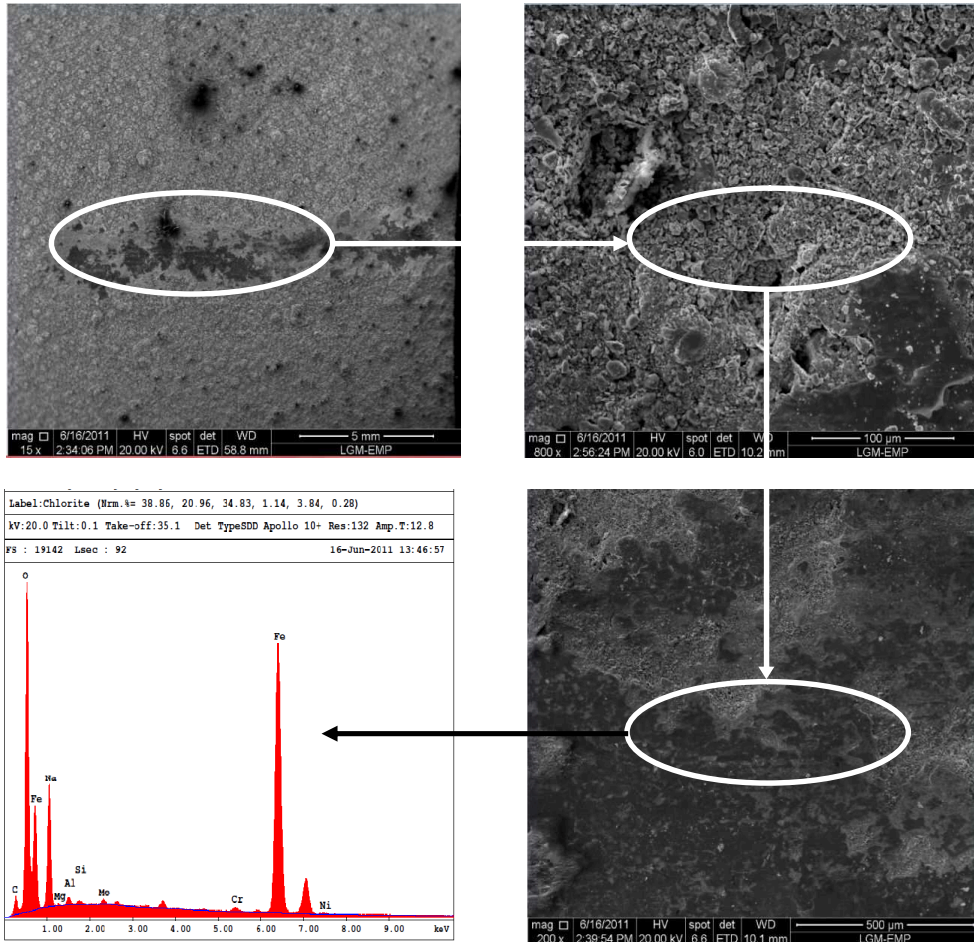


Figure V.27: Image MEB de la trace d'usure du couple Thermanit/NiAl/AU4G et analyse en EDAX. $F=70N$; $V= 60$ tr/min.

Dans ce cas, l'analyse en EDAX montre la présence des différents éléments présents dans le dépôt Thermanit (Fe, Mn, Si ...) et ceux de la couche d'accrochage (Ni, Al). Dans ce cas aussi on note la présence de l'oxygène.

• 3^{eme} essai



EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
C K	3.72	8.85	0.0080	1.1138	0.1940	1.0006
O K	23.27	41.53	0.1112	1.0948	0.4353	1.0023
NaK	16.34	20.30	0.0346	1.0242	0.2066	1.0001
MgK	0.11	0.12	0.0003	1.0498	0.2553	1.0001
AlK	0.51	0.54	0.0019	1.0187	0.3650	1.0006
SiK	0.24	0.24	0.0012	1.0482	0.4877	1.0010
MoL	0.59	0.18	0.0043	0.8364	0.8534	1.0001
CrK	0.52	0.29	0.0059	0.9311	0.9935	1.2107
FeK	54.33	27.78	0.5091	0.9316	1.0052	1.0007
NiK	0.37	0.18	0.0033	0.9463	0.9376	1.0000
Total	100.00	100.00				

Figure V.28 : Image MEB de la trace d'usure du couple Thermanit/NiAl/AU4G et analyse en EDAX. $F=90N$; $V= 60$ tr/min.

Dans ces conditions, les mêmes résultats que le cas précédent ($F=70N$, $V= 60$ tr/min) sont obtenus.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'obtention des combinaisons de propriétés spécifiques des alliages d'aluminium destinés à l'industrie aéronautique est soumise, par exemple à la réalisation de traitements thermiques précis qui jalonnent la gamme de fabrication de ces produits.

A travers notre étude, plusieurs résultats ont été obtenus qu'on va résumer par divers points.

❖ Les caractérisations et analyses en microscopie optique des composites brut de projection nous ont montré que :

- le revêtement comporte des pores, des particules non fondues et des oxydes. La porosité provient soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux d'oxyde a été estimé à ~ 26.5 %.

- les surfaces rugueuses augmentent l'ancrage mécanique substrat/dépôt par la croissance de l'aire de contact.

- des microfissures se sont formées à l'interface NiAl/AG3 se qui provoque une mauvaise adhérence du dépôt sur l'AG3 par-rapport à celle de l'AU4G.

❖ Les résultats de la micro-dureté montrent que :

- la petite différence entre la dureté du substrat et celle de la couche d'accrochage confirme le bon choix de cette dernière dans le cas du composite à base de l'AU4G.

- l'AG3 est plus ductile que l'AU4G ce qui confirme sa mauvaise adhérence avec la sous couche d'accrochage.

- Dans le cas des deux multimatériaux à base de l'AU4G ou l'AG3, la dureté des dépôts de Thermanit (~ 400 HV) est très bonne par-rapport au métal de base (HV= 80~160), donc on peut utiliser ce revêtement comme matériau anti-usure.

❖ Les caractérisations et analyses en microscopie optique après le post-traitement ont montré que :

- l'apparition des fissures dans le cas du composite Thermanit/AlNi/AU4G et leurs propagations dans le cas du Thermanit/AlNi/AG3 est due essentiellement à la différence des propriétés thermiques (Coefficient de dilatation thermique, conductivité thermique,...) des différents constituants.

- ❖ le coefficient d'intensité de contrainte du composite Thermanit/AlNi/AG3 est très faible, ce qui confirme la mauvaise adhérence dans le de ce multimatériau.
- ❖ l'analyse en EDAX après l'usure montre la présence des différents éléments constituant les dépôts. Aussi, la présence de l'oxygène confirme l'oxydation de ces derniers pendant la projection.

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.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **G. E. TOTTEN.** Handbook of aluminum, volume 1 «Physical metallurgy and processes ». Marcel Dekker, Inc. New York, USA 2003.
- [2] **P. VOISIN.** Métallurgie extractive de l'aluminium, Techniques de l'Ingénieur, réf M 2 340, 1992.
- [3] **J. Barralis , G. Meader.** Précis de Metllurgie, Editions Nathan, Paris 2005.
- [4] Association de l'aluminium du Canada, Mai 2007.
- [5] **P. BARRAND.** L'Aluminium Tome 1, Editions EYROLLES. Paris 1964.
- [6] **J. HOUZE.** Production d'aluminium. Ecole des mines d'ALBI CARMAUX France 2007.
- [7] Matériaux métalliques, édition OPU 1992.
- [8] **C. VARGEL.** Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, édition DUNOD, Paris 1979.
- [9] **F. HERBULOT.** Récupération et recyclage de l'aluminium, Techniques de l'Ingénieur M 2345, 2001.
- [10] **A. AUBERT.** Traitement de surface en métallurgie. Colloque SFM-2 sud-est Ecully 1958.
- [11] **B. AGIUS, M. FROMENT.** Surface et film minces, Édition Dunod 1990.
- [12] Association de l'aluminium du Canada, Février 2008.
- [13] **L. KABA.** Étude des paramètres du soudage TIG Pulsé sur l'alliage d'aluminium 2024 T3, Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, Juin 2009.
- [14] Association de l'aluminium du Canada, Avril 2008.
- [15] **M. DOCUS.** Revêtement par projection thermique. Techniques de l'ingénieur, M1645, 2005
- [16] **M. DUPEUX.** AIDE-MÉMOIRE SCIENCE DES MATERIAUX. Nouveau tirage corrigé DUNOD, Paris 2005.
- [17] **A. PRONER.** Revêtement par projection thermique. Techniques de l'ingénieur, M1645, 1999.
- [18] **S. BEAUVAIS.** Étude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma, thèse de Doctorat, Ecole Supérieure des Mines de Paris 2003.
- [19] **CETIM.** Guide pratique de la projection thermique 1989.
- [20] **E. WEIDMANN, A. GUESNIER.** Préparation métallographique des revêtements par projection thermique. Notes d'application, Struers A/S Denmark, 2004.

- [21] **N. MESRATI.** Réalisation et analyse de l'adhérence dans des multimatériaux types Al(Si)-ZrO₂ et graphite-métal ou céramique, Thèse de doctorat, École central de Lyon, 1989.
- [22] **M. ELBESSGHI.** Elaboration et caractérisation des multimatériaux projetés thermiquement à base d'alliage d'aluminium, projet fin d'étude, ENP Alger, 2007.
- [23] **N. MESRATI, Q. SAIF, D. TREHEUX.** Projections plasma de zircone sur différents substrats métalliques. II ème Conférence Franco-Allemande sur les Céramiques Techniques, Aachen Aix la Chapelle (RFA), 4-6 mars 1987.
- [24] **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, Université de LIMOGES, 2004.
- [25] **S. Audisio, M. Caillet. A. Galerie, H. Mazille.** Revêtement et traitement de surface (fonctionnalités, durabilité, procédés), Collection des sciences appliquées de l'INSA de Lyon, Octobre 1998.
- [26] **C. DEHMAS.** Etude de l'influence des postes de traitement sur l'adhérence et le comportement mécanique d'un multi matériau réalisé par projection thermique. Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Alger, 1994.
- [27] **K. L. MITTAL.** Adhesion measurement of thin films, Materials Science and Engineering, Vol. 28, Issue 1, April 1977.
- [28] **V. V. SOBOLEV, J. M. GUILMANY, J. NUTTING.** Development of substrate coating adhesion in thermal spraying, International Materials Reviews, 1997.
- [29] **C. S. RICHARD, G. LU. BERANGER.** The influences of heat treatments and interdiffusion on the adhesion of plasma-sprayed NiCrAlY coatings, Surface and Coatings Technology, 1996.
- [30] **S. HEDACQ.** Étude 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.
- [31] **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.
- [32] **E. DARQUE-CERETTI, E. FELDER** Adhésion et adhérence, Sciences et Techniques de l'Ingénieur, CNRS Edition, 2003.
- [33] **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.
- [34] **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.
- [35] **G. Maeder, J. L. Lebrun, J. M. Sprauel.** Détermination des contraintes résiduelles par diffraction des rayons X. Ecole d'été, 21-25 septembre 1987.

- [36] **E. SILVERI, E. CHASSAING, S. B. GORYACHEV.** Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Journal de Physique IV, 2003.
- [37] **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.
- [38] **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.
- [39] **S. BARRADAS.** Étude à l'aide du choc laser, des mécanismes d'adhérence aux interfaces cuivre / aluminium et cuivre / cuivre obtenues par projection thermique. Thèse de Doctorat, Ecole Supérieure des Mines de Paris, 2004.
- [40] **O. FORSEN.** Electrochemical methods in corrosion research. Ed. Eyrolles 1993.
- [41] **D. Chidambarama, C. R. Claytona. M. R. Dorfmanb.** Evaluation of the electrochemical behavior of HVOF-sprayed alloy coatings. (Surface & Coatings Technology), 2004.
- [42] **A. SADKI,** Etude de la protection du matériau aéronautique AU4G, Mémoire de magister, ENP, 1998.
- [43] **G. LIU.** Modélisation de l'essai d'indentation interfaciale en vue de caractériser l'adhérence de revêtements projetés thermiquement, thèse de doctorat, Université de Lille 2005.
- [44] **M. KHEMIS, M. LOUNIS.** Élaboration et étude de dépôts composites sur alliages d'aluminium, Mémoire de fin d'étude, École Nationale Polytechnique. Alger, Juin 2009.