

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT DE METALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Métallurgie

Thème

*Elaboration des multimatériaux à base
d'alliage d'aluminium et caractérisation
en cyclage thermique*

Présenté par :

Mr Amine DOGHDOGH

Proposé et dirigé par :

Pr. N.MESRATI

Promotion Juin 2010

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach

16200 Alger (Algérie)

Tel : 213 21 52 53 01/03 — Fax : 213 21 52 29 73 www.enp.edu.dz

Albert Einstein (1879-1955)

« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.

La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. »

ملخص

بالإسقاط الحراري بواسطة **AG3/75E/55E** و **AU4G/75E/55E** هذا العمل موجه لانجاز المرآبين القوس الكهربائي بين سلكين من اجل معالجة السلوك السيء لخلائط الألمنيوم المستخدمة في صناعة الطيران في مواجهة الاجهاد الحراري

بعد انجاز المرآبين ، توصلنا الى خصائص جديدة جيدة للمتطلبات الحرارية للسطح المعني

الكلمات المفتاحية: الإسقاط الحراري، الإرهاق الحراري، الإجهادات المتبقية، الإلتحام، خلائط الألمنيوم، **.Thermanit.**

Abstract

The main objective of this work is to produce two composites: AG3/75E/55E and AU4G/75E/55E. For this purpose, we consider an approach by thermal projection using an electric arc between two threads in order to address the bad behavior of aluminum aeronautical alloys against thermal exhaustion.

Following the development of multimaterials, we consider new suitable properties for heat loads of specific surface area.

Key words: Thermal projection, Thermal fatigue, Residual stresses, Adhesion, Aluminum alloys, Thermanit.

Résumé

Ce travail consiste à réaliser deux composites AG3/75E/55E et AU4G/75E/55E par projection thermique à l'arc électrique entre deux fils afin de remédier au mauvais comportement des alliages d'aluminium aéronautiques face à la fatigue thermique.

Après l'élaboration des multimatériaux, nous avons considéré de nouvelles propriétés adéquates aux sollicitations thermiques de la surface spécifique.

Mots clés: Projection thermique, Fatigue thermique, Contraintes résiduelles, Adhérence, Alliages d'Aluminium, Thermanit.

Dédicaces

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

- ❖ *A mes chers parents,
A qui je dois ce que je suis,
Qu'ils trouvent dans ce travail, le fruit de leurs sacrifices
consentis pour mon
éducation ainsi que l'expression de mon amour et de ma
gratitude pour la bienveillance avec laquelle ils m'ont
toujours entouré.
Que Dieu leur préserve longue vie et bonne santé.*

- ❖ *A mon frère Billel, dont je regrette l'absence parmi nous.*

- ❖ *A mes frères Hamza et Imad El Dinne pour leurs
soutiens.*

- ❖ *A mes sœurs Amel, Asma et Zina pour leurs
encouragements.*

- ❖ *A mon neveu Haithem.*

- ❖ *A toutes les familles DOGHDOGH, MESSAOUDI,
OUAFI, REMATI et BOURAS, et à tous mes amis.*

Amine DOGHDOGH

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'Ecole Nationale Polytechnique au sein du laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux du département de Métallurgie.

Je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage afin de pouvoir accomplir ce modeste travail.

Aucun progrès n'est possible sans la contribution d'autres personnes. Les rencontres, les conseils et les encouragements constituent des aides précieuses souvent décisives. C'est pourquoi je tiens à remercier ici tous ceux qui ont contribué à ce travail parfois sans le savoir ou du moins sans mesurer la portée de leur influence.

Je souhaite témoigner toute ma gratitude au Professeur Nadir MESRATI pour m'avoir permis de travailler sur ce projet et sa grande passion pour la recherche dont j'ai beaucoup bénéficié. La rigueur du raisonnement, le refus de toute idée préconçue, la remise en question perpétuelle même de ce qui semble établi, demeure à mes yeux les points forts de son enseignement et de ses directions de recherche. Ce travail lui doit beaucoup.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur F.HELLAL d'avoir accepté de présider mon jury. J'en suis tout particulièrement honoré et je l'en remercie sincèrement.

Mes plus vifs remerciements vont également à Monsieur S.YOUNES, expert principal de la société ALGERIE METALLISATION pour l'intérêt qu'il a toujours porté à mon travail et pour m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury.

Toute ma reconnaissance va également à Madame N.KECHOUD docteur à l'ENP pour l'honneur qu'elle m'a fait d'accepter de participer à ce jury.

Je remercierai aussi Monsieur H.YOUSFI docteur à ENP pour sa contribution dans l'évaluation de ce travail.

Je tiens à exprimer toute mon amitié à Monsieur Mohamed BEN BRAIKA enseignant au département du Génie Mécanique à l'ENP qui est à la source de toute cette aventure.

Le jour d'une soutenance orale d'un projet de fin d'études, l'étudiant soutient bien entendu le fruit d'un travail personnel. Toutefois, ce travail n'aurait pu exister dans sa forme finale sans l'aide précieuse d'autres personnes et je voudrais remercier tout particulièrement: Monsieur K.ABADLI, Monsieur M.E.DJEGHLAL, Monsieur A.DAIMELLAH, Monsieur M.KASSER, Monsieur M.LARIBI, Monsieur M.CHITROUBE et Monsieur E.SALHI qui ont su toujours critiquer mes idées avec beaucoup de bienveillance.

Enfin, j'aimerais remercier mes collègues, que j'ai pu côtoyer à L'ENP ou à BOURAOUI AMAR avec une pensée particulière pour Mohamed et Youcef. Je remercie très sincèrement mes parents et mes amis qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de ces années. Enfin, je tiens à exprimer toute mon affection à Billel OUAFI et son frère Khaled, pour leurs aides.

Merci à tous.

Liste des figures

Figure I.1: Principe fondamental de la projection thermique.....	5
Figure I.2 : Coupe d'un dépôt projeté thermiquement.....	6
Figure I.3: Structure fragmentée.....	6
Figure I.4 : Structure en forme de disque.....	7
Figure I.5: Place de la projection thermique dans les traitements de surface.....	8
Figure I.6 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre.....	9
Figure I.7 : Projection flamme-poudre sur moule de verrerie.....	9
Figure I.8: Projection flamme de cordon d'alumine.....	10
Figure I.9: Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil.....	11
Figure I.10: principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique.....	11
Figure II.1 : Production mondiale d'aluminium primaire.....	15
Figure II.2: Principaux stades et flux dans la fabrication de produits en aluminium.....	16
Figure II.3: influence des éléments d'addition sur le module d'élasticité de l'aluminium.....	19
Figure III.1 : Revêtement monocouches.....	27
Figure III.2 : Revêtement bicouches.....	27
Figure III.3 : Revêtement multicouches.....	27
Figure III.4: Goutte de liquide sur un solide et définition de l'angle de mouillage.....	29
Figure III.5 : Illustration de l'accrochage mécanique.....	30
Figure IV.1: Dimensions de l'éprouvette étudiée.....	33
Figure IV.2: Images MEB des grains d'alumine de 300 µm.....	35

Figure IV.3: Technique de projection par arc électrique.....	35
Figure IV.4 : Pistolet de projection à arc entre deux fils « ARC SPRAY 234».....	36
Figure IV.5 : Forme finale de l'échantillon après revêtement.....	37
Figure IV.6 : Dispositif de la fatigue thermique.....	38
Figure IV.7 : Cycle thermique.....	39
Figure IV.8: Schéma de commande d'un dispositif de choc thermique...	40
Figure IV.9 : technique des ultra-sons avec la méthode de transmission en immersion.....	42
Figure IV.10: Microscope optique muni d'une caméra numérique connecté à un micro-ordinateur.....	43
Figure IV.11: Micro-tronçonneuse (MICRACUT 150).....	44
Figure IV.12 : Principe de l'essai de micro-dureté.....	44
Figure V.1: Diagramme d'Amplitude de l'AG3.....	46
Figure V.2: Diagramme d'Amplitude du couple AG3/75E/55E.....	47
Figure V.3: Diagramme d'Amplitude du couple AG3/75E/55E (après 50 cycles).....	47
Figure V.4: Diagramme d'Amplitude du couple AG3/75E/55E (après 100 cycles).....	48
Figure V.5: Diagramme d'Amplitude du couple AG3/75E/55E (après 125 cycles).....	48
Figure V.6: Diagramme d'Amplitude du couple AG3/75E/55E (après 180 cycles).....	49
Figure V.7: Diagramme d'Amplitude du couple AG3/75E/55E (après 215 cycles).....	49
Figure V.8: Diagramme d'Amplitude de l'AU4G.....	50
Figure V.9: Diagramme d'Amplitude du couple AU4G/75E/55E.....	50
Figure V.10: Diagramme d'Amplitude du couple AU4G/75E/55E (après 50 cycles).....	51

Figure V.11: Diagramme d'Amplitude du couple AU4G/75E/55E (après 75 cycles).....	51
Figure V.12: Diagramme d'Amplitude du couple AU4G/75E/55E (après 100 cycles).....	52
Figure V.13: Diagramme d'Amplitude du couple AU4G/75E/55E (après 180 cycles).....	52
Figure V.14: Diagramme d'Amplitude du couple AU4G/75E/55E (après 215 cycles).....	53
Figure V.15 : Evolution du coefficient d'atténuation en fonction du nombre de cycles du couple AG3/75E/55E.....	54
Figure V.16 : Evolution du coefficient d'atténuation en fonction du nombre de cycles du couple AU4G/75E/55E.....	55
Figure V.17: Micrographie de l'interface AG3 décapé /75 E/thermanit (0 cycles).....	56
Figure V.18: Micrographie de l'interface AG3 décapé /75 E/thermanit (75 cycles).....	56
Figure V.19: Micrographies de l'interface AG3 décapé/75 E/thermanit (100 cycles) (a: extrémité gauche, b:extrémité droite, c: milieu de l'échantillon).....	57
Figure V.20:Micrographies de l'interface AG3 décapé/75E/thermanit (215 cycles) (a: à gauche, b et c: milieu de l'échantillon).....	58
Figure V.21: Micrographies de l'interface AU4G décapé /75 E/thermanit (0 cycles) (a et b: milieu de l'échantillon).....	59
Figure V.22: Micrographie de l'interface AU4G décapé /75 E/thermanit (75 cycles).....	59
Figure V.23: Micrographies de l'interface AU4G décapé /75 E/thermanit (100 cycles) (a:extrémité droite, b: milieu de l'échantillon).....	60
Figure V.24: Micrographies de l'interface AU4G décapé/75 E/thermanit (215 cycles) (a: extrémité gauche, b: milieu de l'échantillon).....	61
Figure V.25: Evolution de la microdureté du composite AG3/75E/55E en fonction de la profondeur.....	63
Figure V.26: Evolution de la microdureté du AU4G/75E/55E en fonction de la profondeur.....	63

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Variation de la conductivité Thermique en fonction de la température.....	18
Tableau II.2 : influence de la température sur le module d'élasticité.....	19
Tableau II.3 : Effet des éléments d'alliages de l'aluminium.....	21
Tableau II.4 : classification d'alliages d'aluminium de fonderie.....	22
Tableau II.5 : de désignation des alliages d'aluminium corroyés.....	23
Tableau IV.1 : Analyse spectrochimique de l'AU4G.....	32
Tableau IV.2 : Analyse spectrochimique de l'AG3.....	33
Tableau IV.3 : composition chimique de la Thermanit.....	33
Tableau IV.4 : Les paramètres employés lors du décapage.....	34
Tableau IV.5 : Paramètres de mise en service du pistolet.....	37
Tableau IV.6: Paramètres de projection.....	37
Tableau IV.7: Paramètres du cycle thermique.....	40
Tableau V.1: Variation de l'atténuation en fonction du nombres de cycles thermiques du composite AG3/75E /55E.....	53
Tableau V.1: Variation de l'atténuation en fonction du nombres de cycles thermiques du composite AU4G/75E /55E.....	54

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I:PROJECTION THERMIQUE	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. principe de la projection thermique.....	4
I.3. les différents caractéristiques des revêtements.....	5
I.3.1. formation et structure d'un revêtement.....	5
I.3.2. adhérence.....	7
I.3.3. Densité.....	7
I.3.4. Dureté.....	7
I.4. place de la projection thermique dans les traitements de surface.....	7
I.5. procédés de projection thermique.....	8
I.5.1. projection thermique flamme.....	8
I.5.1.1. principe général.....	8
I.5.1.2. projection flamme-poudre.....	9
I.5.1.3. projection flamme-fil.....	10
I.5.1.4. projection flamme avec refusion.....	11
I.5.2. projection par arc électrique entre deux fils.....	11
I.5.2.1. Avantages et inconvénients de la projection par arc électrique.....	12
I.6. Matériaux utilisés.....	13
I.7. Conclusion.....	13
CHAPITRE II: L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES.....	14
II.1. Introduction.....	15
II.2. Obtention de l'Aluminium.....	15
II.2.1. La Bauxite.....	16
II.2.2. L'alumine.....	16

II.2.3. L'aluminium.....	17
II.3. Principales caractéristiques de l'aluminium.....	17
II.3.1. Propriétés physiques.....	17
II.3.2. Propriétés thermiques.....	18
II.3.3. Propriétés électrique.....	19
II.3.4. Propriétés mécaniques.....	19
II.3.5. Résistance à la corrosion.....	20
II.3.6. Propriétés de mise en forme.....	20
II.4. Les alliages d'aluminium.....	20
II.4.1. Désignation des alliages d'aluminium.....	21
II.4.1.1. Les alliages d'aluminium de fonderie.....	21
II.4.1.2. les alliages de corroyage.....	22
II.4.2. Classification des alliages d'aluminium.....	22
II.4.2.1. Classification des alliages d'aluminium de fonderie.....	22
II.4.2.2. Classification des alliages d'aluminium corroyés.....	22
II.5. Le recyclage de l'aluminium.....	23
II.6. Les différentes utilisations de l'aluminium.....	23
II.7. Conclusion.....	24
CHAPITRE III: LES MULTIMATERIAUX.....	25
III.1. Introduction.....	26
III.2. Définition des multimatériaux.....	26
III.3. Types des multimatériaux.....	26
III.3.1. Les revêtements monocouches.....	26
III.3.2. Les revêtements bicouches.....	27
III.3.3. Les revêtements multicouches.....	27
III.4. Les problèmes des multimatériaux.....	28
III.4.1. Adhésion et adhérence.....	28

III.4.1.1. Phénomènes à l'origine de l'adhérence.....	28
III.4.1.2. Méthodes de mesure de l'adhérence.....	30
CHAPITRE IV: PROCEDURES EXPERIMENTALES.....	31
IV.1. Matériaux utilisés.....	32
IV.2. Préparation des éprouvettes.....	34
IV.2.1. Préparation de la surface à revêtir.....	34
IV.3. La projection par arc électrique.....	35
IV.3.1. Pistolet de la projection.....	36
IV.3.2. Paramètres de la projection.....	36
IV.4. L'échantillon après le revêtement.....	37
IV.5. Les choc thermiques.....	38
IV.5.1. Dispositif de la fatigue thermique.....	38
IV.5.2. Le cycle thermique.....	39
IV.5.3. Les conditions de traitement.....	40
IV.6. Dispositif proposé.....	40
IV.7. Techniques d'analyses.....	41
IV.7.1. Caractérisation par la technique des ultra-sons.....	41
IV.7.2. Analyse micrographique.....	42
IV.7.3. Etude de la microdureté.....	44
CHAPITRE V: RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
V.1. Contrôle par les ultrasons des multimatériaux élaborés.....	46
V.1.1. Diagrammes des Amplitudes en fonction du temps.....	46
V.1.2. Détermination des coefficients d'atténuation.....	53
V.1.3. Discussions et interprétations.....	55
V.2. Analyse micrographique des deux multimatériaux (AG3/75E/55E et AU4G/75E/55E).....	56
V.2.2. Discussions et interprétations.....	62

V.3. Microdureté des multimatériaux AG3/75E/Thermanit et AU4G/75E/Thermanit.....	62
V.3.1. Discussions et interprétations.....	63
CONCLUSION GENERALE.....	65
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES.....	68

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis les années soixante, les facteurs d'économie de l'énergie et la matière sont imposés pour les industries d'assemblage à savoir l'aéronautique, l'industrie navale et automobile, ce qui amène les chercheurs à développer des techniques d'assemblage et l'élaboration des matériaux qui ont des propriétés mécaniques, électrochimiques et thermiques très efficaces. Pour cela les alliages d'aluminium, de magnésium, titane... sont les plus demandés sur le marché mondial, car ils possèdent une faible densité volumique, des hautes propriétés mécaniques et une très grande résistance à la corrosion.

Les problèmes rencontrés aux sollicitations à hautes températures (fatigue thermique) constituaient un frein pour ces alliages, ce qui pousse à chercher des solutions intelligentes pour l'amélioration des performances des pièces mécaniques et répondre à la demande d'une clientèle de plus en plus exigeante.

Dans ce contexte, on s'intéresse d'une part à l'élaboration de multimatériaux à base d'aluminium grâce à la projection à l'arc électrique sur des substrats alliages d'aluminium de nuance AU4G et AG3 très utilisés dans le domaine aéronautique et d'autre part, à maîtriser les mécanismes de dégradation en fatigue (cycles de chauffage/refroidissement) de ces nouveaux matériaux.

L'objectif principal de ce travail est de caractériser l'interface obtenue après les chocs thermiques.

Pour ce faire, l'étude a été répartie en deux parties :

La première est consacrée à l'étude bibliographique dans laquelle on présente les différentes techniques de la projection thermique, une généralité sur les alliages d'aluminium, et un aperçu sur les multimatériaux.

Dans la seconde partie, nous étalons l'aspect expérimental qui contient deux chapitres: le premier consacré à la présentation des matériaux et matériels employés, tandis que le deuxième expose les différents résultats obtenus.

Ce travail sera clôturé par une conclusion émanant des résultats expérimentaux et des conditions opératoires.

CHAPITRE I

PROJECTION THERMIQUE

I.1. Introduction

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

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

La projection thermique occupe une place considérable dans le monde des traitements de surface. Son apparition date de 1909 grâce à l'invention de l'ingénieur suisse Schoop, portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme. Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'Aluminium). Dès 1914 des essais de projection par arc électrique furent réalisés [01].

I.2. Principe de la projection thermique

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés permettant de transformer un matériau d'apport de l'état solide à l'état fondu ou à l'état plastique grâce à une source de chaleur appropriée (flamme ou arc électrique), puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie (**voir figure I.1**). La surface de base ne subit aucune fusion et l'adhérence du dépôt est généralement mécanique [02].

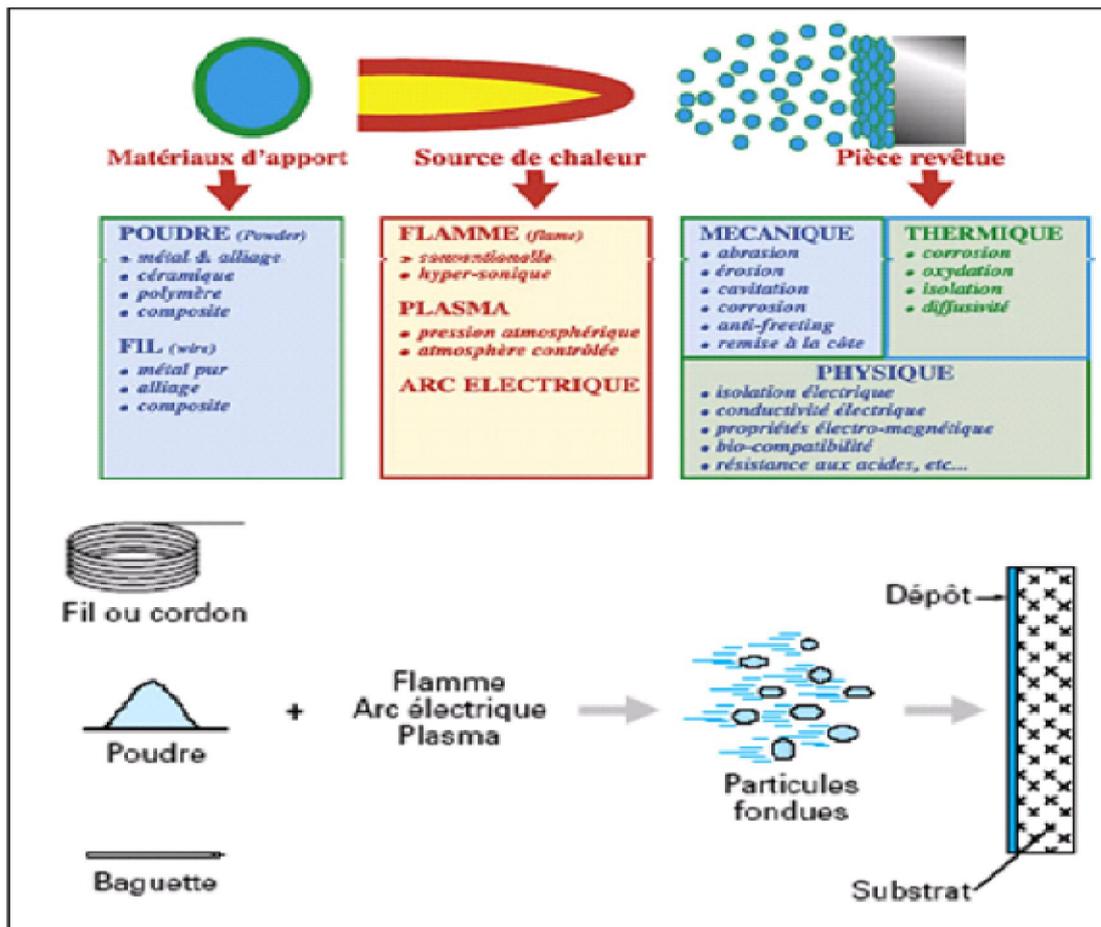


Figure I.1: Principe fondamental de la projection thermique [03].

I.3. Les différentes caractéristiques des revêtements

Les différentes caractéristiques du revêtement dépendent essentiellement de la méthode appliquée pour la projection et les différents paramètres qui régissent cette méthode [01].

Les principales caractéristiques des revêtements projetés sont :

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

I.3.1. Formation et structure d'un revêtement

La formation d'un dépôt est le résultat d'une combinaison du phénomène d'écrasement, de solidification rapide des particules fondues sur le substrat et du balayage de la surface à traiter. Les particules projetées en s'écrasant sur le métal de base, elles forment une juxtaposition de couches qui donnent l'allure générale d'un dépôt obtenu par projection thermique comme le montre la figure I.2.

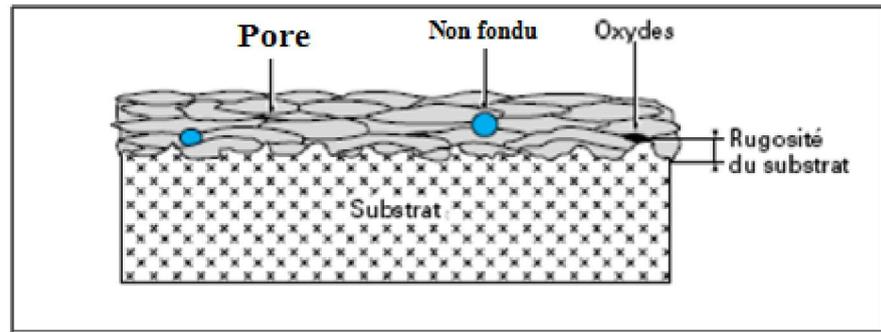


Figure I.2 : Coupe d'un dépôt projeté thermiquement [01].

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

Deux types de structures existent après impact :

— *une structure fragmentée* : constituée d'un disque central de faible diamètre et de ramifications dirigées vers l'extérieur, **figure I.3**.

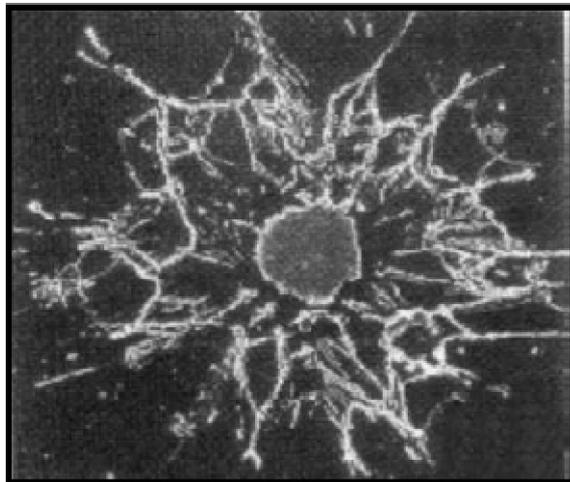


Figure I.3: Structure fragmentée [01].

— *une structure en forme de disque* : constituée à partir d'un écoulement continu et stable du liquide, allant du point d'impact de la particule vers la périphérie, voir **figure I.4**.

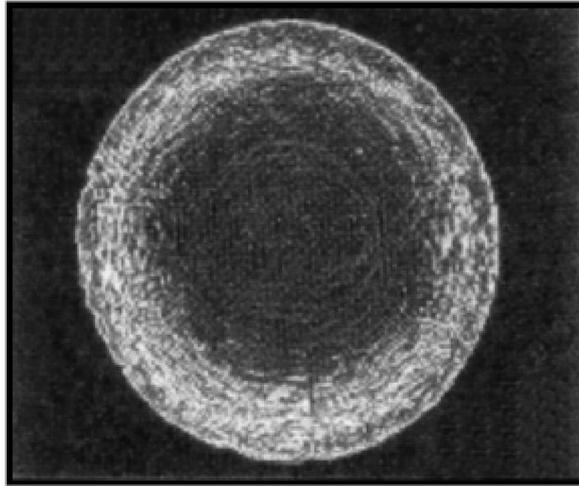


Figure I.4 : *Structure en forme de disque [01].*

I.3.2. Adhérence

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

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

I.3.3. 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.

I.3.4. 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.

I.4. Place de la projection thermique dans les traitements de surface

Les techniques de traitements de surface se répartissent en quatre familles :

- les revêtements par voie sèche ou humide ;
- les traitements de conversion (réaction superficielle entre le matériau d'apport et le substrat) ;
- les traitements de diffusion (le matériau d'apport diffuse dans le substrat) ;

— les transformations structurales (modification de la structure métallurgique du substrat).

La figure I.5 présente les principales techniques utilisées en traitement de surface.

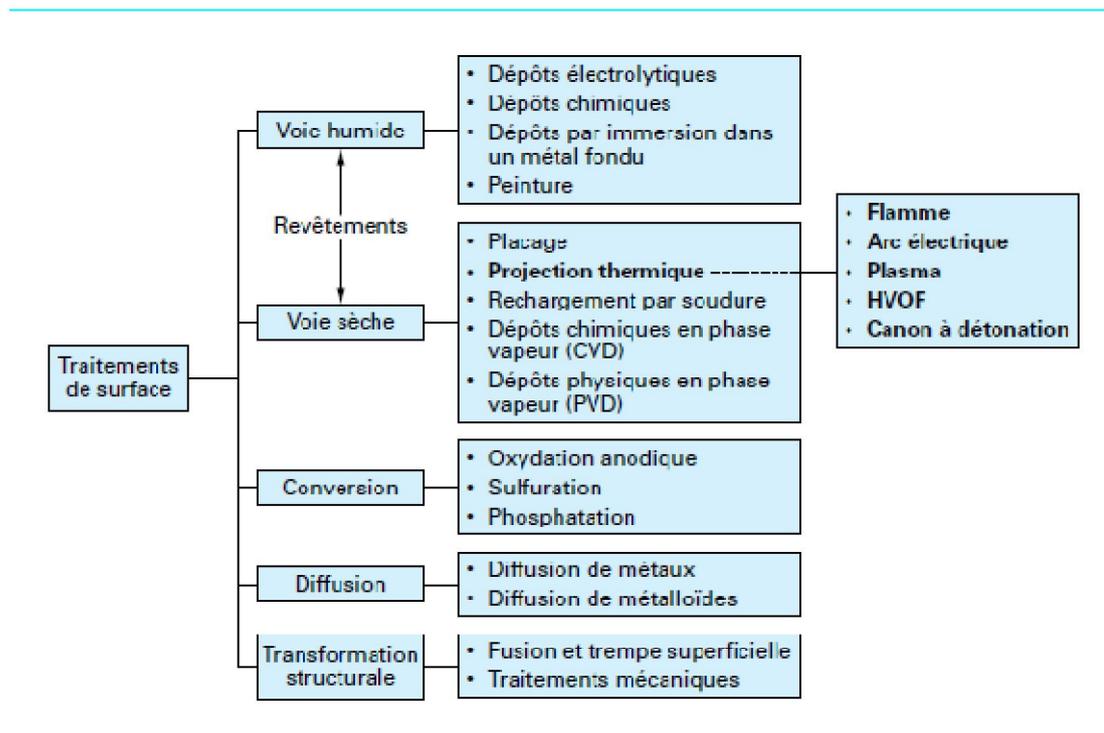


Figure I.5: Place de la projection thermique dans les traitements de surface [01].

Le choix d'un procédé est directement issu d'un certain nombre de facteurs parmi lesquels on peut citer :

- les conditions en service de la pièce traitée ;
- la forme de la pièce ;
- la nature du matériau de base ;
- la nature du matériau d'apport le plus performant.

I.5. Procédés de projection thermique

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

Le choix du procédé se fait selon la nature du matériau projeté (poudre ou fil), le type de source d'énergie (flamme ou électricité) [04].

I.5.1. Projection thermique flamme

I.5.1.1. Principe général

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de projection flamme [01].

La température d'une flamme oxycombustible varie de 2 800 °C (oxypropane) à 3150°C (oxyacétylène). Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2800 °C, et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme.

I.5.1.2. Projection flamme-poudre

a) Principe:

On désigne généralement sous le nom de projection flamme-poudre le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxycombustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (**figure I.6**).

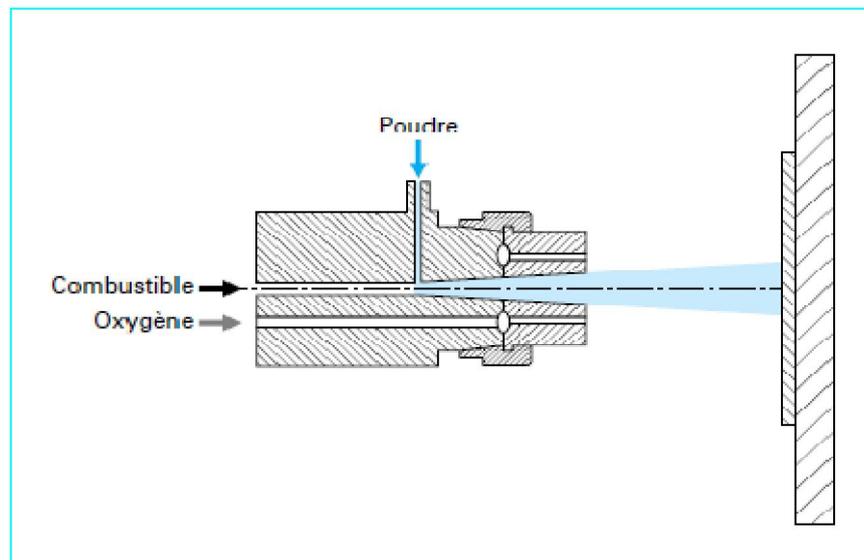


Figure I.6 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre [01].

b) Torches à gaz:

Ces torches sont des chalumeaux oxygaz équipés d'un récipient contenant la poudre. Celle-ci tombe par gravité et est entraînée par un des gaz de combustion, pour être introduite dans la flamme. La vitesse de projection est très faible. La distance de la buse au support est très courte (quelques millimètres). La flamme sert à chauffer le substrat et à assurer la fusion de la poudre. Une liaison de type brasure est ainsi réalisée (**figure I.7**).

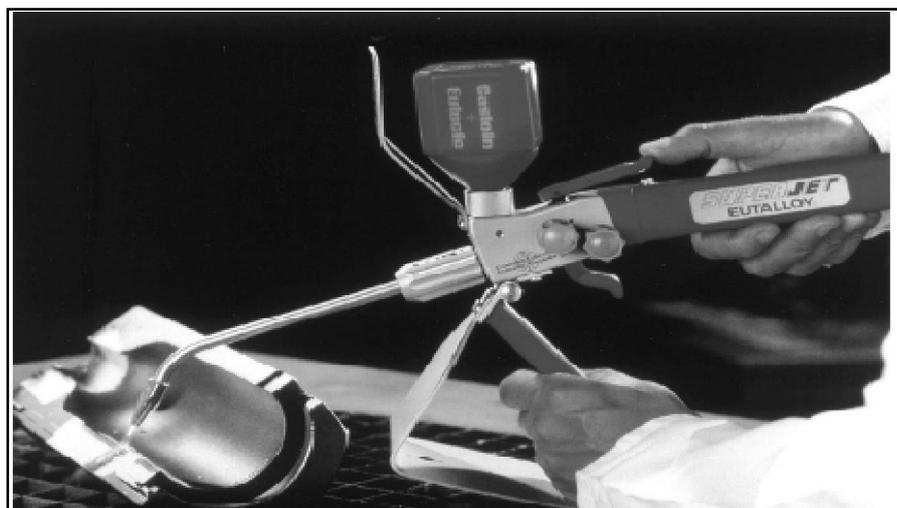


Figure I.7 : Projection flamme-poudre sur moule de verrerie [01].

c) Pistolets flamme-poudre:

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

Les pistolets flamme-poudre sont de deux types :

— à réservoir de poudre intégré, la poudre tombant par gravité puis étant aspirée par un des gaz de combustion ;

— à réservoir séparé, relié au pistolet par un flexible, la poudre étant véhiculée par un gaz porteur (gaz neutre, air...).

I.5.1.3. Projection flamme-fil**a) Principe:**

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme ne sert en projection flamme-fil qu'à fondre le métal d'apport, introduit sous forme de fil, de cordon, ou de baguette, en son centre. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé (**Figure I.8**).

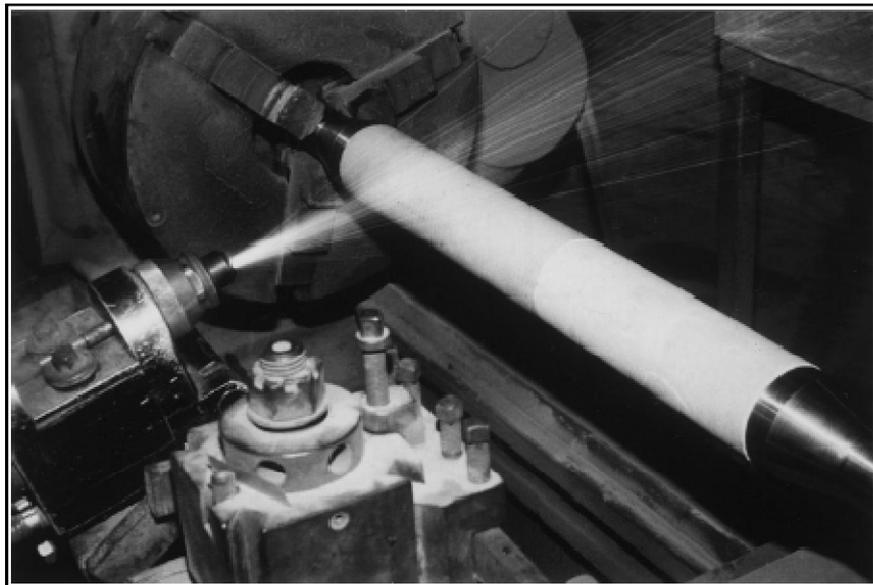


Figure I.8: *Projection flamme de cordon d'alumine [01].*

b) Pistolets flamme-fil:

Les pistolets de projection flamme-fil se composent de deux parties (**figure I.9**) :

— une partie chalumeau dans laquelle le matériau d'apport est fondu et pulvérisé ;

— une partie entraînement de fil.

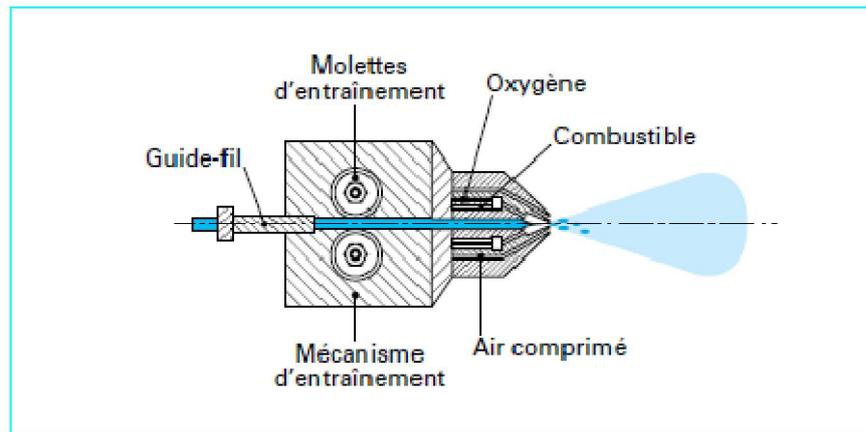


Figure I.9: *Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [01].*

I.5.1.4. Projection flamme avec refusion

Les revêtements réalisés par projection thermique sont poreux et leur liaison avec le substrat est purement mécanique. Pour des problèmes de corrosion et/ou d'adhérence insuffisante, un traitement de refusion peut compléter la gamme opératoire de manière à densifier le dépôt (la porosité ouverte disparaît) et à assurer une liaison du type brasage.

I.5.2. Projection par arc électrique entre deux fils

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et le projetant sur le substrat (**figure I.10**).

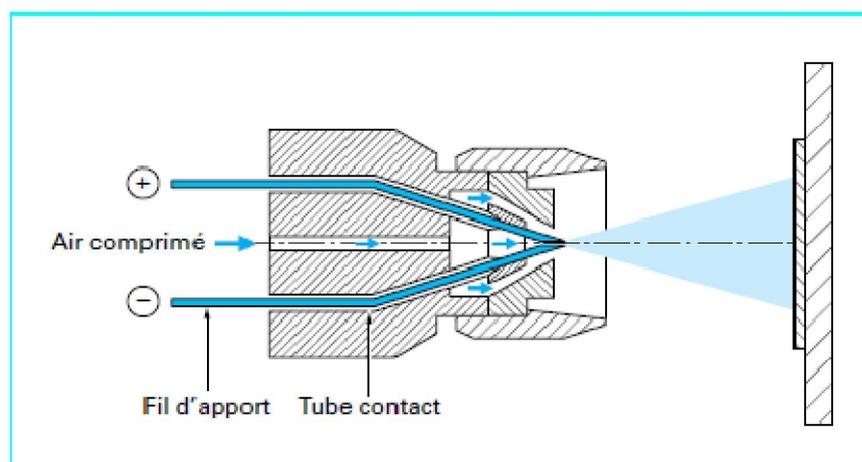


Figure I.10: *principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique [01].*

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

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

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

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

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

Le procédé de projection par arc électrique est un procédé manuel ou automatique, très simple à mettre en œuvre, et particulièrement bien adapté aux impératifs de fiabilité et de reproductibilité imposés par la production en moyennes et grandes séries.

La projection par arc électrique présente un meilleur rendement de dépôt par rapport aux autres procédés de projection, mais elle nécessite des matériaux conducteurs électriques et tréfilables. La plupart des matériaux métalliques tels que le Zinc, le Cuivre, l'Aluminium, le Bronze, l'Acier, le Molybdène, ainsi que de nombreux alliages peuvent être projetés par cette technique [05].

Les domaines d'applications sont l'anticorrosion et les rechargements, surtout pour les dépôts durs [05].

I.5.2.1. Avantages et inconvénients de la projection par arc électrique

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

- 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: 5- 40 kg/h ;
- un rendement énergétique important: 60 à 70 % de la puissance électrique fournie est utilisée pour fondre les fils;
- avec un fil plein le matériau projeté est complètement fondu ;
- il n'est généralement pas nécessaire de refroidir le substrat [06].

Les principaux inconvénients de la projection par arc électrique sont les suivants :

- un jet de particules divergeant qui se traduit par une tache d'impact sur le substrat relativement large (25 à 50mm de diamètre à 100mm de la sortie torche) ;

- 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 de la température de l'extrémité des fils très au delà de la température de fusion;
- des fluctuations élevées de tension dues à une variation continue de la distance inter-électrode à cause de la différence de fusion entre le fil cathode et le fil anode, ce qui rend le procédé instable [06].

I.6. 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 :

- les fils nus massifs ou les fils fourrés,
- les poudres,
- les cordons,
- les baguettes [07].

I.7. Conclusion

Depuis les années 1960, le marché de la projection thermique a progressé d'environ 10 % par an principalement grâce au développement des procédés. La flamme, qui représentait 70 % des applications en 1960, ne couvre aujourd'hui que 12 % du marché. Un essor particulier concerne ces dernières années, d'une part, l'arc électrique qui retrouve une seconde jeunesse, grâce aux progrès des équipements et des matériaux (fils fourrés) et, d'autre part, la projection hypersonique.

CHAPITRE II

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

II.1. Introduction

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis sa découverte en 1854 symbolisée par la présentation à l'Académie des Sciences, par le chimiste français Sainte-Claire Deville, d'un petit lingot réalisé par voie chimique, mais le véritable développement industriel de l'aluminium et ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux Etats-Unis. L'aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux en tonnage, il a supplanté l'étain dans les années 1920, le plomb dans les années 1940 le zinc puis le cuivre dans les années 1950. **La figure II.1** montre la production mondiale d'aluminium primaire.

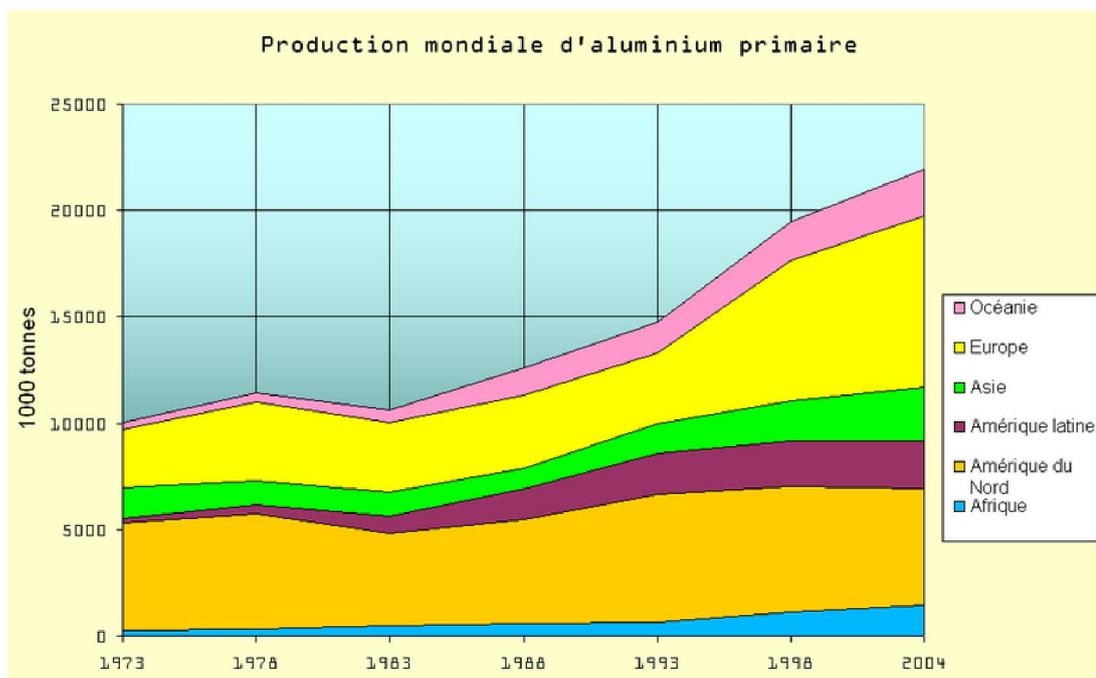


Figure II.1 : Production mondiale d'aluminium primaire [08].

L'aluminium et ses alliages sont largement utilisés dans l'industrie et en particulier dans la fonderie pour leurs propriétés mécaniques et physiques meilleures, tel que, la faible densité, la très haute résistance à la corrosion, la bonne ductilité, la très bonne usinabilité, la bonne soudabilité et la très bonne conductibilité électrique et thermique. Parmi ces alliages d'aluminium, les plus connus sont les alliages d'Al-Si, Al-Cu et Al-Mg [09].

II.2. Obtention de l'Aluminium

L'importance prise aujourd'hui par l'aluminium n'est pas seulement celle de l'aluminium brut mais celle de toute une filière avec, en amont, le minerai et, en aval, l'industrie de transformation en produits semi-finis [10]. **La figure II.2** montre les principaux stades dans la fabrication de produits en aluminium.

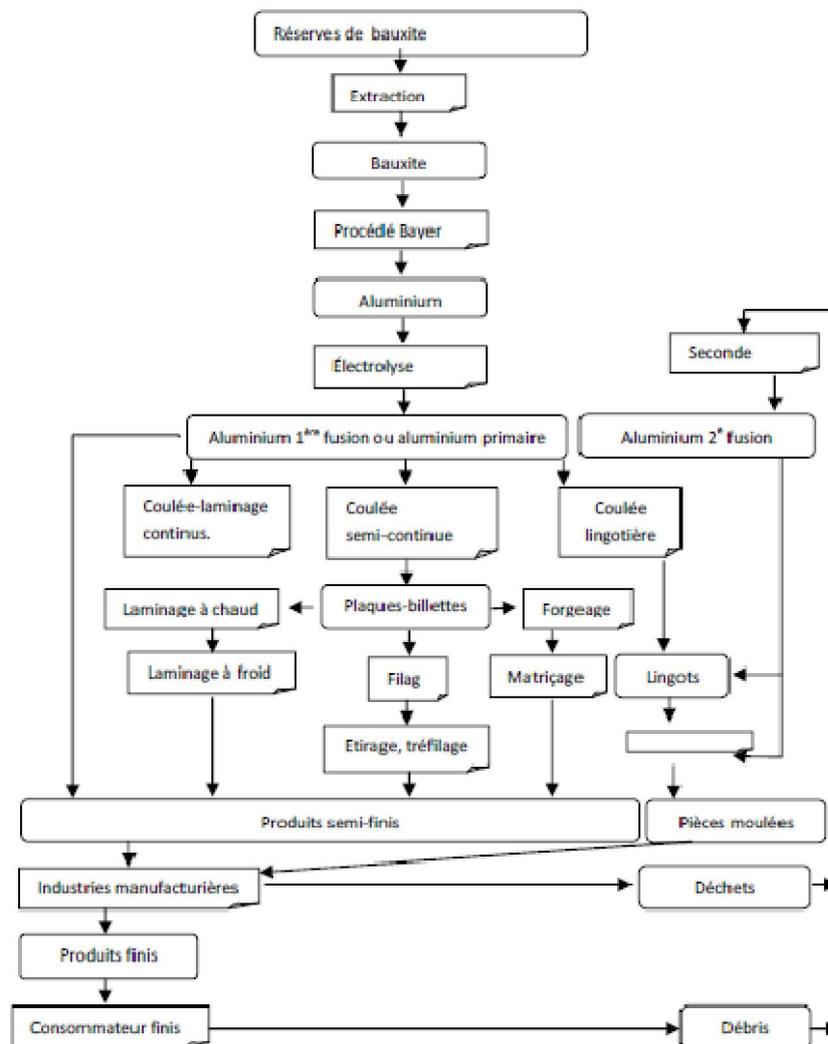


Figure II.2: Principaux stades et flux dans la fabrication de produits en aluminium [10].

II.2.1. La Bauxite

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%) constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal [11].

II.2.2. L'alumine

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par de la soude. On obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour précipitation de l'alumine [11].

II.2.3. L'aluminium

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode). L'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve [11].

Bien que, en tonnage, la production d'aluminium ne représente qu'un peu plus de 2% de celle des aciers, ce métal (et les alliages qui en dérivent) arrive en seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui, dans bien des circonstances, en font un matériau irremplaçable. Parmi celle-ci, citons les plus importantes [12].

II.3. Principales caractéristiques de l'aluminium

II.3.1. Propriétés physiques

a. Propriétés atomique et cristallines [13]:

- Numéro atomique: 13.
- Masse atomique: les valeurs actuellement acceptées sont:
 - 26,981 5 (valeur basée sur ^{12}C);
 - 26,989 74 (valeur basée sur ^{16}O).
- Isotopes :
 - Le principal isotope, ^{27}Al , est stable et comprend 14 neutrons et 13 protons ; à l'exception de l'isotope ^{26}Al qui a une demi-durée de vie de l'ordre de 106 années, les autres isotopes, produits artificiellement, ont une demi-durée de vie très courte.
- Valence de l'aluminium dans les composés chimiques: 3
- Structure cubique à faces centrées.
- Constante réticulaire: $4,049\ 596 \times 10^{-10}$ m à 298 K.
- Diamètre atomique: $2,86 \times 10^{-10}$ m.
- Volume atomique: $9,999 \times 10^{-6}$ m³.

b. Masse volumique :

La masse volumique de l'aluminium est de 2700 kg/m^3 , soit près de trois fois moins que celle des aciers. L'utilisation de l'aluminium s'impose donc quand il faut réduire au maximum la masse des systèmes et des structures; c'est le cas, par exemple, dans les domaines de la construction aéronautique et de l'industrie du transport en général où, pour réaliser des économies d'énergie, on cherche à diminuer la charge à vide, afin d'augmenter la charge utile [12].

II.3.2. Propriétés thermiques**a. Température Fusion:**

L'aluminium pur fond à $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour les alliages Al-Mg et Al-Cu, la température de fusion décroît avec l'augmentation de la teneur en Mg et en Cu [14].

b. Vaporisation:

La température d'ébullition est de $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ environ et la chaleur de vaporisation est de 10780 kJ/kg .

A l'état liquide, l'aluminium liquide a une très faible tension de vapeur à basse température mais qui s'élève très vite avec celle-ci [14].

c. Conductivité thermique :

La conductivité thermique est de 237 w / (m.k) à la température ambiante. Elle varie en fonction de la température [09]; le tableau II.1 montre la variation de la conductivité thermique en fonction de la température.

Tableau II.1 : Variation de la conductivité Thermique en fonction de la température[09].

$302. \text{W / (m. k)}$ à $- 173 \text{ }^\circ\text{C}$
$237. \text{W / (m. k)}$ à $+ 020 \text{ }^\circ\text{C}$
$208. \text{W / (m. k)}$ à $+ 660 \text{ }^\circ\text{C}$ -état solide-
$091. \text{W / (m. k)}$ à $+ 660 \text{ }^\circ\text{C}$ -état liquide-

d. Coefficient de Dilatation linéaire:

D'environ $24 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ aux températures ordinaires et en moyenne de $28 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ près de la température de fusion, il est sensiblement double de l'acier. Les déformations dues à la chaleur de soudage sont cependant bien inférieures à ce que laissent supposer ces valeurs, car les températures de fusion et de soudage de l'aluminium sont très inférieures à celles de l'acier [14].

II.3.3. Propriétés électriques

La conductibilité électrique de l'aluminium commercialement pur atteint 62% de celle de cuivre. Par contre, la masse volumique du cuivre est plus élevée que celle de l'aluminium [12].

II.3.4. Propriétés mécaniques

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles; on peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas. Puisque l'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées, ils font preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité, et ce à toute températures [12].

a. Module d'élasticité [13]:

La littérature cite pour le module d'élasticité de l'aluminium pur des valeurs comprises entre 63 et 71 GPa, avec 66,6 GPa comme valeur la plus probable. Cette valeur varie en fonction de différents paramètres :

1. elle augmente en présence d'éléments étrangers (additions ou impuretés), aussi la valeur de 69 GPa est-elle généralement admise pour l'aluminium dit commercialement pur (voir **la figure II.3**) ;
2. elle diminue lorsque la température augmente (**tableau I I.2**).

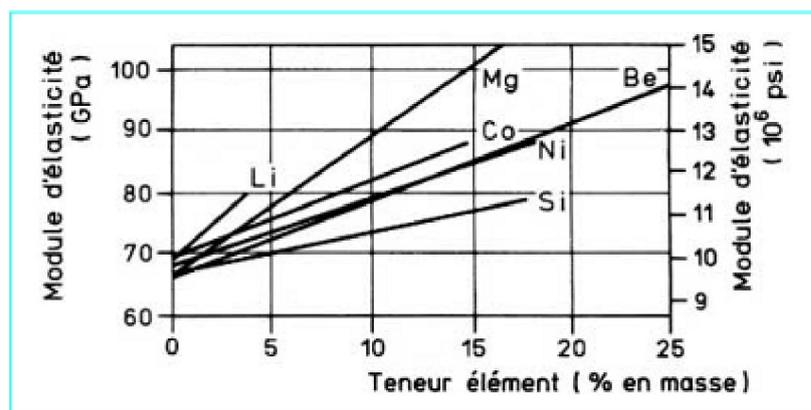


Figure II.3: Influence des éléments d'addition sur le module d'élasticité de l'aluminium [13].

Tableau II.2 : Influence de la température sur le module d'élasticité [13].

Température (°C)	Module d'élasticité (1) (%)
- 195	112
- 85	105
- 29	102
+ 24	100
+ 100	98
+ 149	95
+ 204	90
+ 260	80

(1) Base 100 à 24 °C.

II.3.5. Résistance à la corrosion

Grâce à la couche d'oxyde qui se forme en surface, les alliages d'aluminium résistent à la corrosion. On peut rendre cette couche protectrice d'oxyde plus épaisse par anodisation. L'aluminium et ses alliages peuvent alors être utilisés sans protection supplémentaire. Par contre, dans les milieux corrosifs, les alliages peuvent subir les effets de la corrosion par piqûres, de la corrosion sous contrainte, fatigue-corrosion, voire la corrosion généralisée peut se développer. Pour les conditions données, la sévérité de l'attaque dépend de l'alliage utilisé et de son état.

II.3.6. Propriétés de mise en forme

L'aluminium a une température de fusion relativement basse, d'environ 660 °C. Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie.

L'aluminium est très ductile, on peut aisément le mettre en forme à l'état solide, par déformation plastique soit à chaud, soit à la température ambiante (laminage, filage à la presse et filage par choc, étirage, etc.) [12].

II.4. Les alliages d'aluminium

Il existe environ 310 alliages d'aluminium différents. Certains alliages possèdent des caractéristiques mécaniques qui répondent très bien aux besoins du domaine aéronautique [15].

Bien que la plupart des métaux et certains métalloïdes soient capables de former avec l'aluminium des solutions, les alliages d'aluminium sont en fait basés sur quelques systèmes seulement : Al-Cu, Al-Mn, Al-Mg, Al-Si, Al-Zn. Le tableau II.3 montre l'effet des éléments d'alliages de l'aluminium.

Tableau II.3 : *Effet des éléments d'alliages de l'aluminium.*

Éléments	Effets
<i>Cuivre</i>	<i>Augmente la résistance mécanique</i>
<i>Manganèse</i>	<i>Augmente la résistance mécanique et modifie la granulométrie</i>
<i>Magnésium et silicium</i>	<i>Augmentent la résistance à la corrosion atmosphérique</i>
<i>Zinc</i>	<i>Augmente la résistance mécanique</i>

II.4.1. Désignation des alliages d'aluminium

Les principales nuances normalisées sont divisées en deux grandes familles : les aluminiums corroyés, obtenus par déformation plastique (laminage...) et les aluminiums pour la fonderie. Les compositions et les microstructures des deux familles sont assez différentes et chacune se divise en deux groupes : ceux pouvant être traités thermiquement et ceux ne pouvant pas être traités ou non trempant [16].

II.4.1.1. Les alliages d'aluminium de fonderie

Les alliages d'aluminium de fonderie (série à trois chiffres) sont les plus versatiles de tous les alliages de fonderie et ils offrent de façon générale une facilité de mise en forme, contrairement aux alliages de corroyage (série à quatre chiffres). Les alliages d'aluminium, comme tous les autres matériaux de fonderie, ont les caractéristiques suivantes :

- Une bonne fluidité pour bien remplir toutes les parties du moule.
- Un point de fusion relativement bas.
- Un transfert de chaleur rapide de l'aluminium liquide vers le moule, ce qui assure un cycle de mise en forme rapide.
- L'hydrogène qui est le seul gaz avec lequel l'aluminium et ses alliages sont solubles peut être contrôlé efficacement.
- Plusieurs alliages d'aluminium n'ont relativement pas de tendance au craquage à chaud.
- Une bonne stabilité chimique.
- Un bon fini de surface avec des surfaces lustrées et peu ou pas de défauts [17].

Ils sont utilisés en fonderie pour la fabrication de pièces obtenues par la coulée du métal liquide dans des moules en sable, c'est la coulée en sable, ou des moules en acier ou en fonte, c'est la coulée en coquille. Par ce procédé, on élabore des pièces aux formes plus ou moins complexes : poignées de portes, blocs moteurs...etc [18].

II.4.1.2. Les alliages de corroyage

Matériaux coulés en fonderie sous forme de plaques ou de billettes et ensuite transformés en demi-produits : tôles, profilés,..., par laminage ou par tréfilage, les demi-produits ainsi obtenus sont ensuite utilisés dans la construction mécanique où ils sont assemblés par soudage, rivetage, vissage,..., dans le bâtiment, dans l'électricité,...etc [18].

II.4.2. Classification des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres. Ces quatre chiffres identifiant la composition chimique de l'alliage. Ce groupe de quatre chiffres est parfois suivi d'une lettre indiquant une variante nationale.

II.4.2.1. Classification des alliages d'aluminium de fonderie

Ce système contient trois chiffres plus une décimale (par ex. 356.0) ; l'élément d'alliage principal. Les deuxième et troisième chiffres identifient l'alliage spécifique s'il s'agit d'une pièce moulée (.0) ou d'un lingot (.1 Ou .2) [19]. Voir le **tableau II.4**.

Tableau II.4 : Classification d'alliages d'aluminium de fonderie [19].

Séries d'alliages	Éléments d'alliages principaux
1xx.x	99% d'aluminium minimum
2xx.x	Cuivre
3xx.x	Silicium
4xx.x	Silicium +cuivre et/ou magnésium
5xx.x	magnésium
6xx.x	N'existe pas
7xx.x	zinc
8xx.x	Etain
9xx.x	Autres éléments

II.4.2.2. Classification des alliages d'aluminium corroyés

Le premier chiffre indique l'élément d'alliage le plus important (Xxxx). Il est également utilisé pour désigner les différentes séries d'alliages d'aluminium telles que séries 1000, 2000 jusqu'à 8000. Le deuxième chiffre (xXxx), s'il n'est pas nul, indique s'il y a eu modification de l'alliage spécifique. Les troisième et quatrième chiffres identifient un alliage spécifique dans la série. Par ex. pour l'alliage 5183, le chiffre 5 indique qu'il s'agit d'un alliage de magnésium, le chiffre 1 indique qu'il s'agit de la première modification par rapport à l'alliage originel 5083 et le nombre 83 identifie l'alliage dans la série 5xxx. La seule exception dans la série est la série 1xxx (l'aluminium pur) où les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium

minimale au-dessus de 99%. L'alliage 1350 contient donc au moins 99.50% d'aluminium [19] (voir **tableau II.5**).

Tableau II.5 : Désignation des alliages d'aluminium corroyés [19].

Série	Désignation	Élément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu – Al ₂ CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-
Série 9000	/	Non utilisé	-

II.5. Le recyclage de l'aluminium

L'aluminium a une excellente recyclabilité. Pour recycler l'aluminium, on le fait simplement fondre, ce processus de transformation de l'aluminium est beaucoup moins coûteux que l'extraction à partir du minerai de bauxite : une tonne d'aluminium recyclé permet d'économiser quatre tonnes de bauxite.

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

II.6. Les différentes utilisations de l'aluminium

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

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

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

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

II.7. Conclusion

La production d'aluminium ne représente que 2 % environ en poids de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux qui peuvent résister aux effets de la corrosion.

CHAPITRE III

LES MULTIMATERIAUX

III.1. Introduction

L'utilisation d'une pièce dans un milieu bien particulier, nécessite le choix du matériau convenable qui doit résister aux problèmes qui peuvent survenir ce qui a poussé les industries à s'orienter vers les différentes techniques de protection, en utilisant un deuxième matériau qui peut intervenir comme un élément protecteur contre l'agressivité du milieu.

Cette association, constitue une nouvelle voie de matériau métallique du fait de ses caractéristiques biens particulières. Cette famille permet en effet, d'obtenir d'une part une amélioration à l'échelle technique et d'autre part, une amélioration d'ordre économique, de sorte qu'elle permet de remplacer les produits performants et coûteux. Malgré les avantages d'un multimatériau, la réalisation de celui-ci n'allait pas sans créer des problèmes, les plus importants se situent à l'interface.

Plusieurs travaux ont été effectués à ce propos pour minimiser le maximum de ces problèmes en utilisant des sous-couches d'accrochages [20-21].

III.2. Définition des multimatériaux

Un regroupement de deux ou plusieurs classes de matériaux souvent sous forme de couches sur un métal de base donne naissance à ce qu'on appelle « multimatériau ».

Chaque matériau possède des propriétés et des caractéristiques qui lui sont propres: un métal est soit tenace ou ductile, les matières plastiques (légères), ont une faible rigidité et des propriétés mécaniques moyennes, et elles sont parfois fragiles. Les céramiques, quant à elles, ont un module d'élasticité et une résistance théorique à la traction très élevée [22].

III.3. Types des multimatériaux

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

III.3.1. Les revêtements monocouches

Le revêtement est projeté directement sur un substrat. Dans ce cas, il est préférable que les coefficients de dilatation thermique de ces deux matériaux soient les plus proches possibles, sauf si une énergie d'adhésion forte peut être obtenue compte tenu des éléments en présence (Fig III.1) [22].

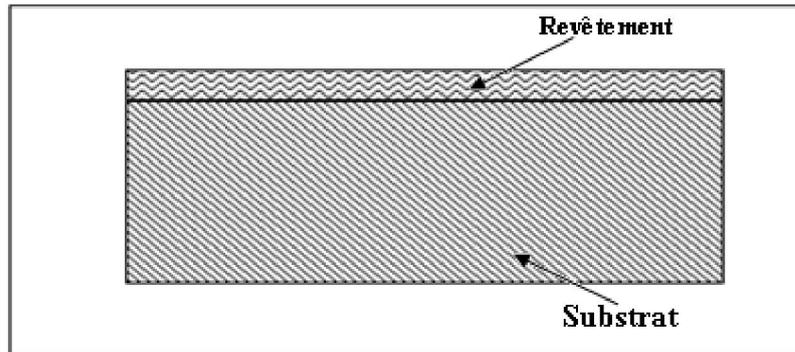


Figure III.1 : *Revêtement monocouches* [22].

III.3.2. Les revêtements bicouches

Appelés « duplexes », constitués d'un revêtement assurant la protection vis-à-vis du milieu externe et associés à une sous couche d'accrochage qui peut jouer d'une part le rôle de barrière chimique et d'autre part d'accommoder les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux (Fig III.2) [22].

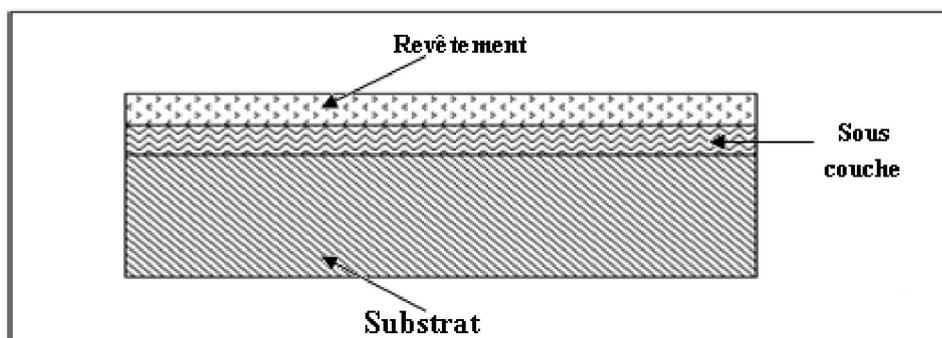


Figure III.2 : *Revêtement bicouches* [22].

III.3.3. Les 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 (fig.III.3).

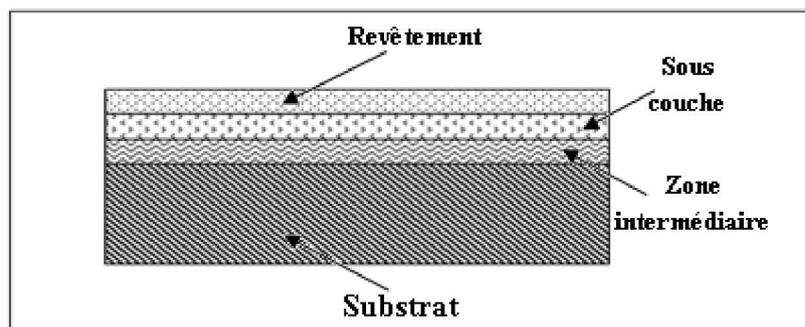


Figure III.3 : *Revêtement multicouches* [22].

III.4. Les problèmes des multimatériaux

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

III.4.1. Adhésion et adhérence

L'adhésion représente tous les phénomènes microscopiques liant deux corps et l'adhérence en est la mesure [23].

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

Elle s'écrit, selon la relation de Dupré :

$$W_{adh} = \gamma D + \gamma S - \gamma DS \quad (III.1)$$

Avec : γD et γS respectivement les énergies de surface du dépôt et du substrat.
 γDS l'énergie d'interface.

III.4.1.1. Phénomènes à l'origine de l'adhérence

Les interfaces créées lors d'un procédé d'élaboration des dépôts diffèrent de, par leurs épaisseurs et de par les mécanismes d'adhérence qui y prédominent. En plus des adhérences chimiques et physiques qui se rapportent à des échelles atomiques, il existe deux principaux types de mécanismes d'adhérence microscopiques : la diffusion (avec ou sans formation de composés intermédiaires) et l'ancrage mécanique [24].

L'étalement de particules liquides sur un substrat est souvent employé, mettant en œuvre des phénomènes de *mouillage* [25].

a. Le 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.

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 (**figure III.4**) prend la forme d'une calotte ayant un angle de mouillage θ avec la surface du substrat [25-26]. L'énergie d'adhérence W_{Adh} dépend du mouillage, par la relation **III.2**:

$$W_{Adh} = \gamma L (1 + \cos \theta) \quad (III.2)$$

Avec : γL l'énergie libre de surface du liquide.

Le mouillage total, réalisé pour $\theta = 0$, correspond donc au maximum du travail d'adhésion. D'autre part, le mouillage peut être accompagné de transferts de masse à

l'interface [25]. L'étalement du liquide peut, en effet, être contrôlé par de la diffusion superficielle.

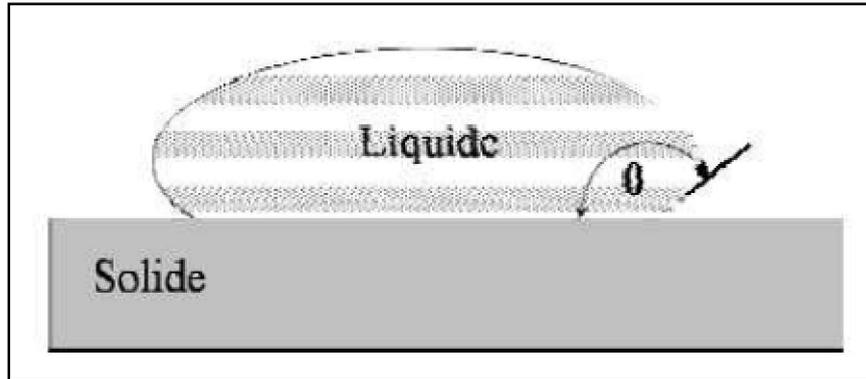


Figure III.4: Goutte de liquide sur un solide et définition de l'angle de mouillage [25].

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 [27]. La formation de phases intermédiaires fragiles aux interfaces peut conduire à une mauvaise adhérence des revêtements [27-28] ou au contraire l'améliorer [29].

c. Ancrage mécanique (grenailage)

La rugosité du substrat est considérée comme un paramètre déterminant pour l'adhérence des revêtements. D'une part, son accentuation (figure III.5.a) 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]. 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.b**).

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.

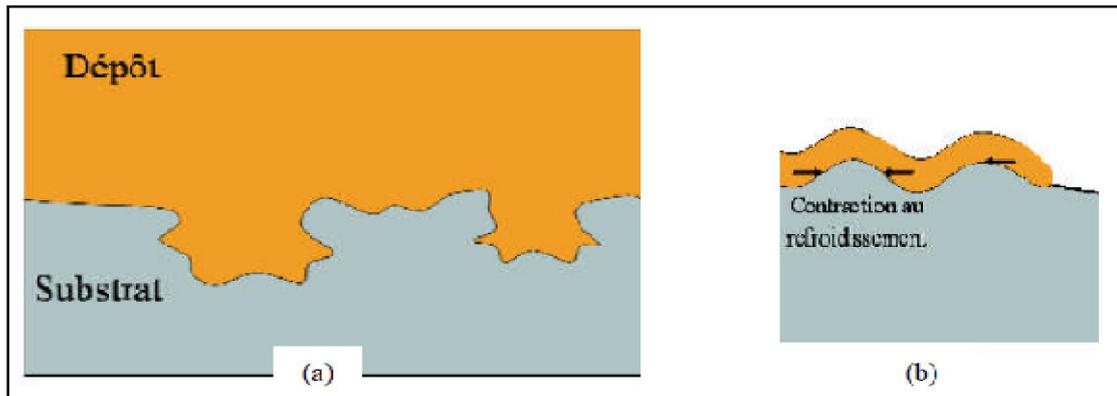


Figure III.5 : Illustration de l'accrochage mécanique [34].

Les contributions microscopiques de l'ancrage mécanique et de la diffusion ne peuvent pas être négligées.

d. Liaisons inter-atomiques

Les différents types de liaisons inter-atomiques 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.4.1.2. Méthodes de mesure de l'adhérence

Il existe un grand nombre de dispositifs permettant de déterminer l'adhérence d'un revêtement sur son substrat. Ces techniques peuvent, par exemple, être classées en quatre catégories [35].

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

Les méthodes directes, comme les essais de traction et de cisaillement, pour lesquelles la contrainte d'adhérence entraînant la décohésion est directement mesurée.

Les méthodes indirectes qui induisent des champs de contraintes complexes dans les matériaux et nécessitent une simulation des phénomènes intervenant lors de l'essai afin d'obtenir une valeur d'adhérence, soit en contrainte, soit en énergie : l'indentation normale, l'essai de rayure ou l'essai de choc laser.

Les méthodes non mécaniques et non destructives, comme les techniques utilisant les ultrasons, les courants de Foucault...etc.

CHAPITRE IV

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Pour étudier la tenue en cycles thermiques de deux nuances de multimatériaux à base d'aluminium (AG3/75E/55E, AU4G/75E/55E), nous avons utilisé le dispositif de fatigue thermique pour tester nos éprouvettes qui sont élaborées par projection thermique grâce au procédé de Projection à arc électrique entre deux fils. Ce dernier a été réalisé à l'entreprise "Algérie métallisation" spécialisée dans la rénovation et la récupération des pièces usées.

Les échantillons ont subi une préparation préliminaire avant de recevoir le dépôt. Ainsi élaborés et après les essais de chauffage et de refroidissement, les échantillons ont subi un test non destructif par "ultra-sons" pour estimer la tenue aux chocs thermiques. Des observations métallographiques par microscopie optique et des mesures de microduretés ont été réalisés pour compléter l'analyse tout en focalisant notre attention sur le comportement de l'interface vis-à-vis des différents cycles thermiques.

Nous présentons dans cette partie, d'abord le procédé, l'appareillage et les différents paramètres pris en considération dans notre étude.

IV.1. Matériaux utilisés

Les matériaux de base ont été fournis par l'Unité de Rénovation du Matériel Aéronautique (URMA) sis à **Dar El-Bieda**.

Les substrats utilisés sont :

- ✓ **AU4G (2017A)** : utilisé en aéronautique, il est très utilisé dans la construction du fuselage et voilures d'avions. En particulier, pour des pièces soumises à des contraintes, il fait partie de la famille des Alliages "Durs".

L'analyse spectrale d'un échantillon de cet alliage par l'appareil D.V.4, donne la composition chimique suivante (**Tableau IV.1**) :

Tableau IV.1 : Analyse spectrochimique de l'AU4G [36].

Eléments	Cu	Mn	Mg	Si	Al
Composition (% en masse)	4	0.5	0.7	0.5	Reste

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

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

Tableau IV.2 : Analyse spectrochimique de l'AG3 [36].

Eléments	Mg	Mn	Cr	Al
Composition (% en masse)	3.1	0.3	0.3	Reste

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

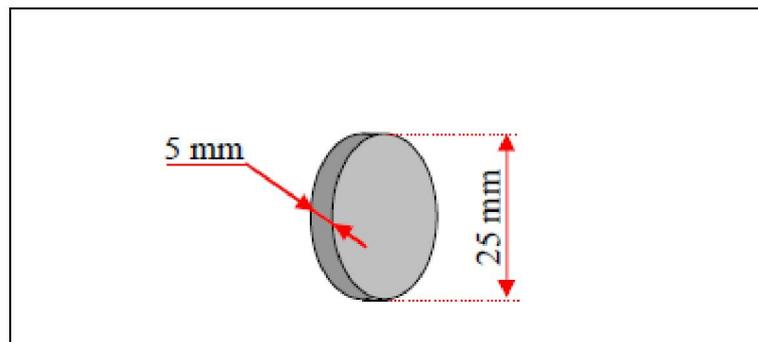


Figure IV.1: Dimensions de l'éprouvette étudiée.

- **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 dépôt d'un alliage **Ni-Al** désigné par la nuance **75 E** sur une épaisseur d'environ 0,1 mm.

- **Matériaux de revêtement**

Le revêtement utilisé est la Thermanit désignée par **55E**, c'est un acier inoxydable réfractaire utilisé comme une barrière thermique et résiste contre l'usure aux frottements et contre la corrosion. Sa composition chimique est illustrée dans le tableau suivant (**Tableau IV.3**) :

Tableau IV.3 : Composition chimique de la Thermanit [36].

Eléments	C	Fe	Ni	Cr	Mn
Composition (% en masse)	0.132	66.6	5.5	18.5	8.1

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

IV.2. Préparation des éprouvettes

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

IV.2.1. Préparation de la surface à revêtir

- **Polissage:**

On a fait un polissage grossier sur les surfaces à revêtir avec un papier abrasif de faible granulométrie (P.80).

- **Décapage:**

C'est un procédé d'élimination par voie chimique des couches d'oxydes formées, il consiste à élaborer une couche mince d'un élément inhibiteur (tout dépend du matériau de base). Dans le cas des alliages légers cette étape est indispensable pour mieux protéger la surface à revêtir. Pour cela les pièces ont subi un traitement thermo-chimique dans un bain de zincate.

Les paramètres employés lors du décapage sont présentés dans le **tableau IV.4**.

Tableau IV.4 : Les paramètres employés lors du décapage.

	AU4G		AG3	
	T(°C)	t(min)	T(°C)	t(min)
Zn	80	3-5	80	3-5

- **Dégraissage**

Les échantillons sont dégraissés et nettoyés avec une solution d'acétone afin d'éliminer les salissures.

- **Sablage**

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

Dans notre cas, on a utilisé les particules de corindon (oxyde d'aluminium) (**voir la Fig IV.2**).

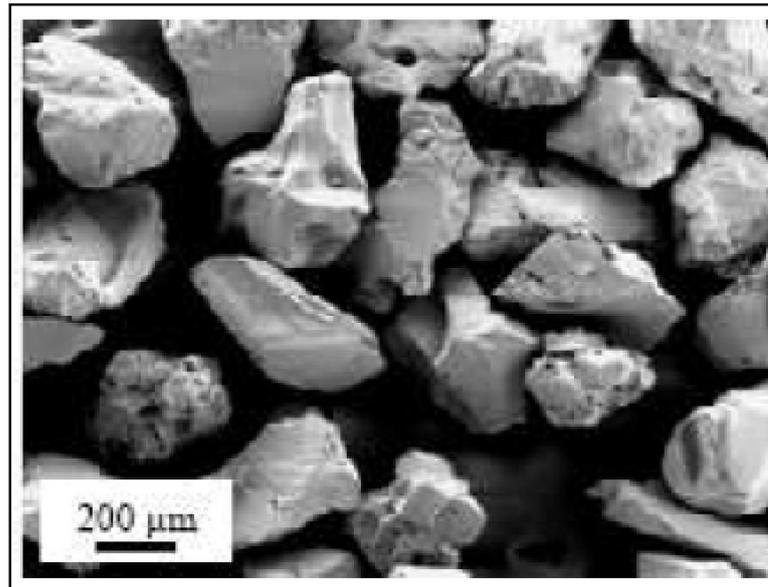


Figure IV.2: Images MEB des grains d'alumine de 300 μm .

IV.3. La projection par arc électrique

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et le projetant sur le substrat (Figure IV.2).

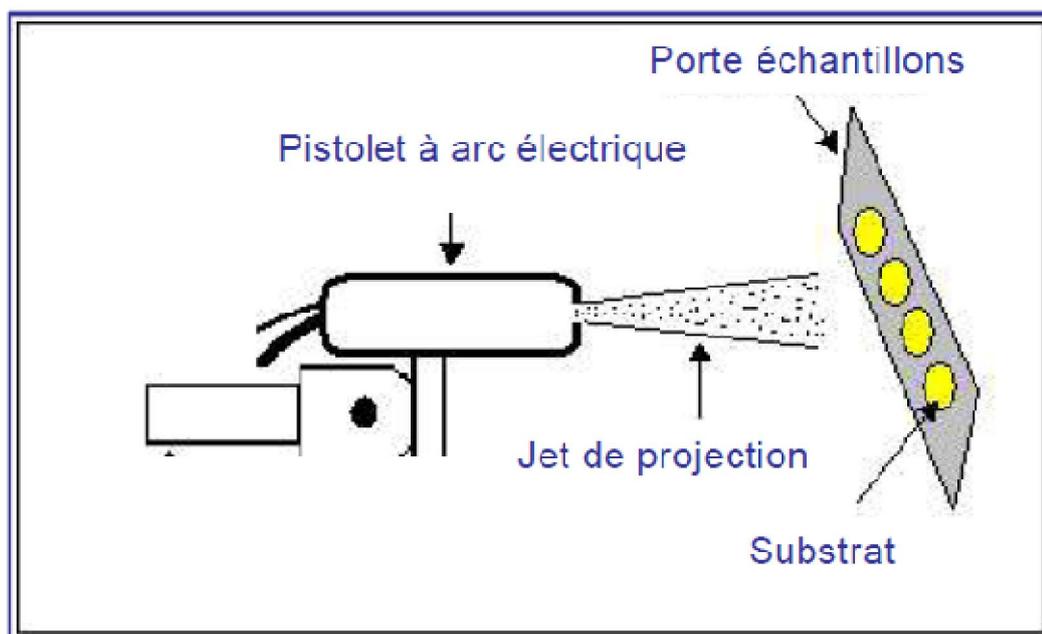


Figure IV.3: Technique de projection par arc électrique.

IV.3.1. Pistolet de la projection

C'est un appareil portatif qui présente une souplesse et 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.3**.

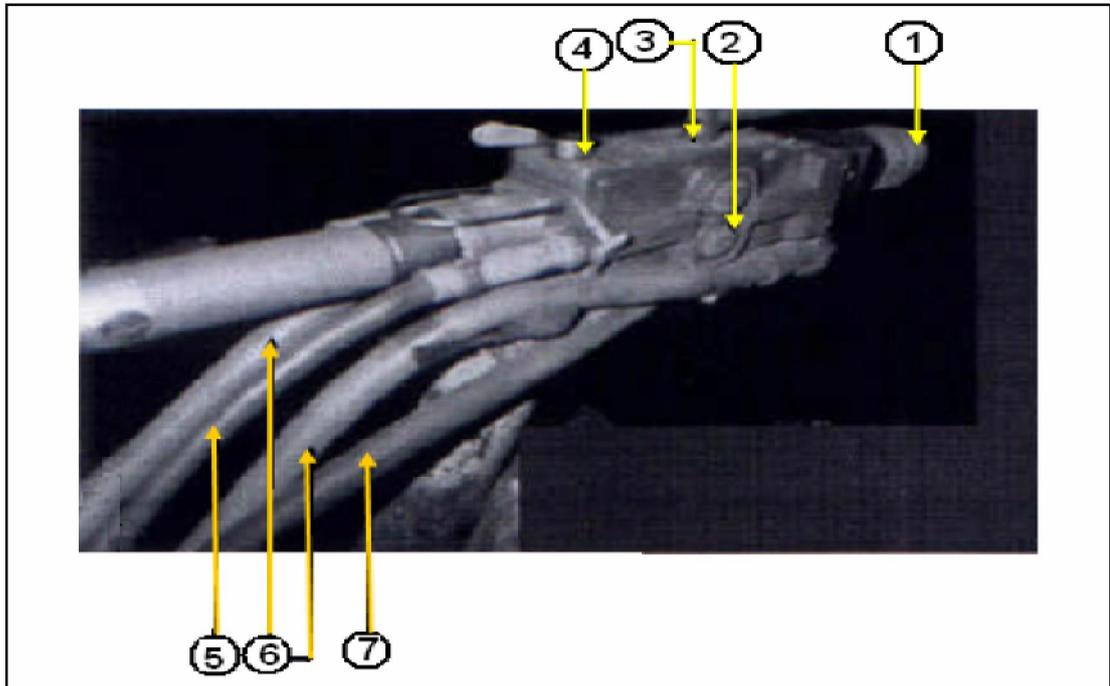


Figure IV.4 : Pistolet de projection à arc entre deux fils « ARC SPRAY 234» [37].

- 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.

Ce pistolet se compose de deux parties : une de chalumeau et l'autre de l'entraînement du fil. Il utilise le mélange du gaz ; l'oxygène, l'acétylène ou le propane et de l'air comprimé.

IV.3.2. Paramètres de la projection

Il est recommandé de respecter certains paramètres préconisés par le constructeur selon les matériaux utilisés, pour que le revêtement s'adhère le mieux possible avec notre substrat et qui sont données par le **tableau IV.5**.

Tableau IV.5 : Paramètres de mise en service du pistolet.

Pression d'air dans le moteur	3,8 bars
Pression d'air dans la buse de projection	3 bars
Vitesse d'avance du fil métallique	0,064 m/s
Tension du générateur	30 V
Intensité du courant	100 A

D'autres paramètres de projection (distance de projection, vitesse de rotation de la cible, débit de matière projetée, angle de projection...) ayant une influence sur la qualité du revêtement, sont présentés dans le **tableau IV.6**.

Tableau IV.6: Paramètres de projection.

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

IV.4. L'échantillon après le revêtement

La forme finale de nos échantillons est présentée sur la **figure IV.4**.

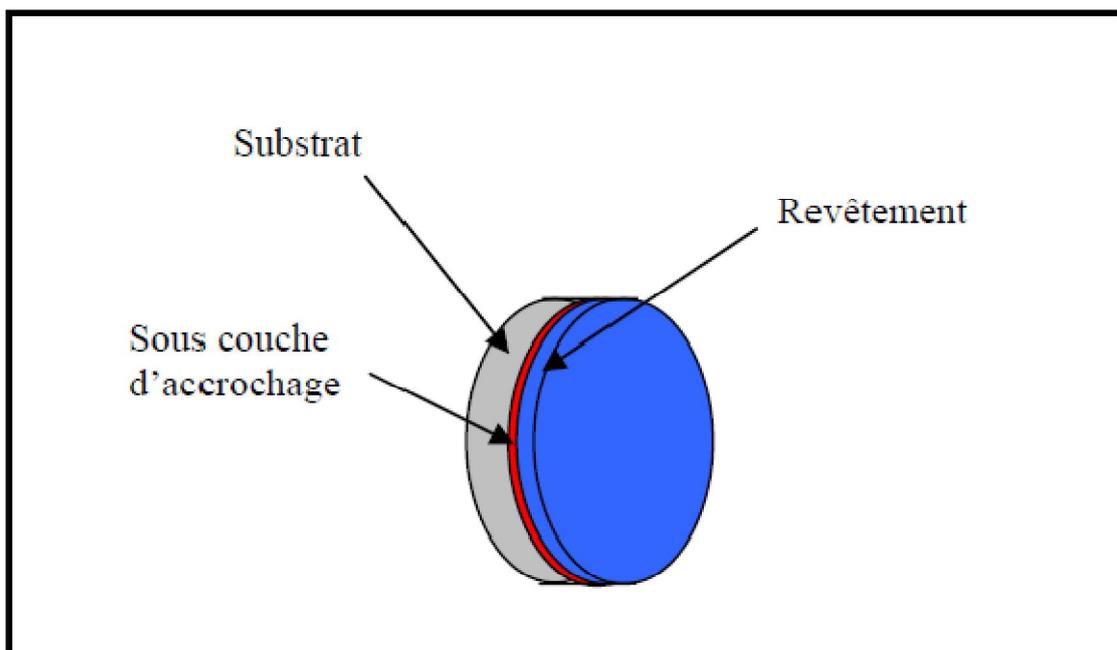


Figure IV.5 : Forme finale de l'échantillon après revêtement.

IV.5. Les chocs thermiques

IV.5.1. Dispositif de la fatigue thermique

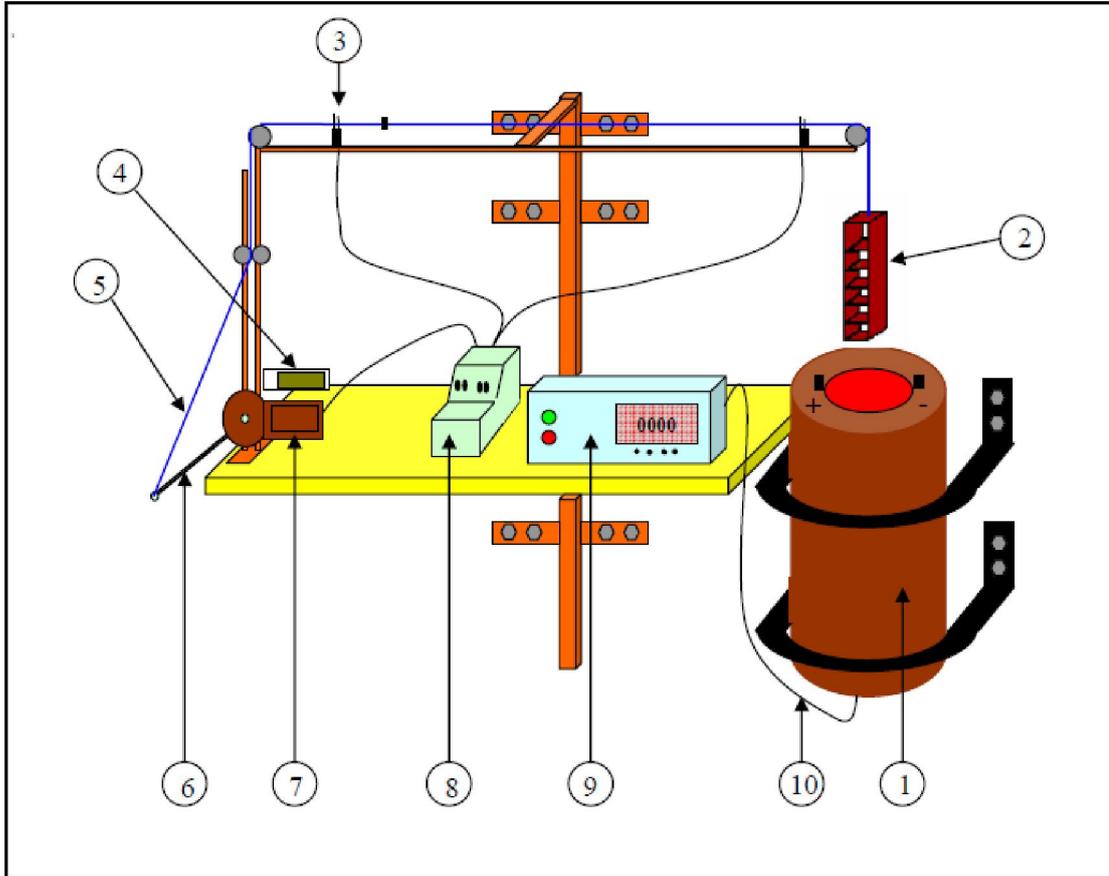


Figure IV.6 : Dispositif de la fatigue thermique.

- Composants du dispositif (Figure IV.6)

1. Four électrique tubulaire vertical, il peut chauffer jusqu'à 1200°C ;
2. Porte échantillons ;
3. Contacteur de fin de course ;
4. Compteur (détermine le nombre de cycles) ;
5. Câble (assure le mouvement du mécanisme) ;
6. Tige reliant le câble au moteur ;
7. Moteur électrique ;
8. Temporisateur ;
9. Régulateur de température contient aussi le bloc de puissance ;
10. Câble du thermocouple type K placé au milieu du four.

- **Principe de fonctionnement du dispositif**

Ce dispositif permet de réaliser des cycles de chauffage et de refroidissement. Pour cela, les éprouvettes sont chauffées dans le four tubulaire ensuite, elles sont refroidies à l'air à l'extérieur du four. Ces cycles thermiques sont réalisés à l'aide d'un système électromécanique composé d'un moteur électrique à courant, le mouvement du porte échantillon est délimité par des contacts électriques sensibles (fins de course). Ce système permet d'obtenir un mouvement oscillatoire vertical avec une fréquence constante, la vitesse d'oscillation désirée est obtenue à l'aide d'un temporisateur qui fixe le temps de chauffage et de refroidissement (temps à l'intérieur et à l'extérieur du four). La température du four est contrôlée par un thermocouple qui est relié au thermorégulateur.

IV.5.2. Le cycle thermique

La connaissance des paramètres de traitement consiste d'abord à tracer le cycle thermique c'est-à-dire l'évolution de la température pendant les opérations de chauffage et de refroidissement, et pour cela ils ont fixés solidement un thermocouple sur un échantillon percé par une perceuse de diamètre égale au celui du thermocouple, l'échantillon est de forme cylindrique ($\Phi=25$ mm et $L=20$ mm). L'ensemble est placé directement dans le mécanisme de la fatigue thermique. Puis, ils ont procédé à des essais de cyclage thermique, pour lesquels on a relié un thermocouple avec un régulateur de température pour suivre l'évolution de ce paramètre en fonction du temps. Ce dernier est mesuré à l'aide d'un chronomètre.

La forme de la courbe T ($^{\circ}\text{C}$) = $f(t)$ obtenue est montrée par la **figure IV.7**.

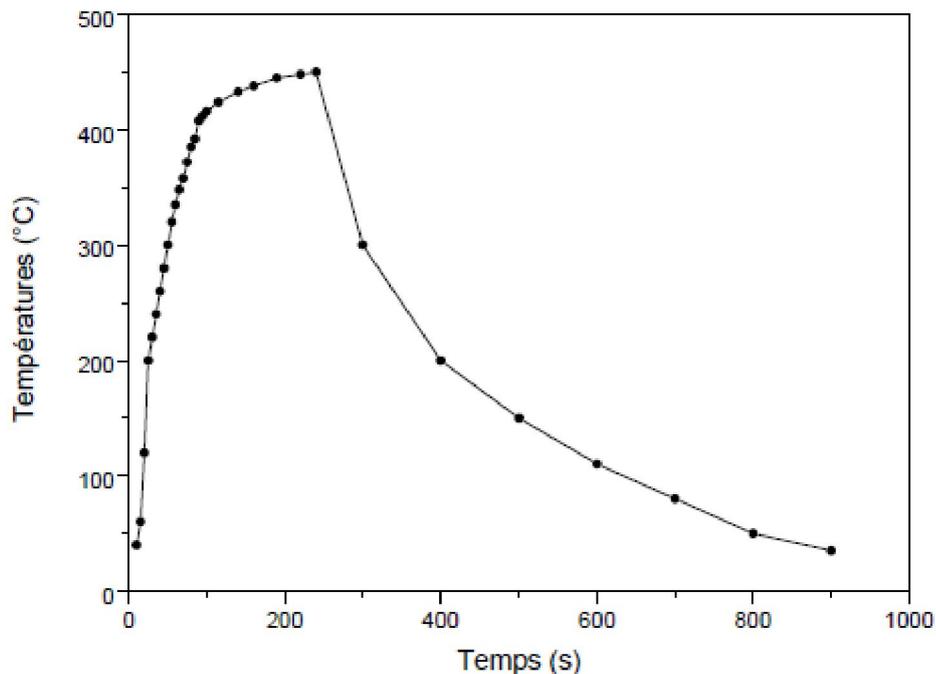


Figure IV.7 : Cycle thermique.

IV.5.3. Les conditions de traitement

Le cycle thermique nous a permis de déterminer le temps de chauffage et de refroidissement qui sont reliés aux températures des bornes. La période de chauffage jusqu'à 450 °C est atteinte après 4min et 43sec, et après un refroidissement près de 10min, l'échantillon atteint la température de 35 °C (voir Tableau IV.7).

Le choix de la température de cycle a été guidé par les considérations suivantes [38-39]:

- éviter tout changement structural du substrat en se basant sur les diagrammes TTT (temps, température et transformation) et la technique de dilatation différentielle concernant les alliages.
- Connaissance de la température approximative de ces deux alliages, de l'aluminium et de l'acier, dans leurs domaines d'application.

Tableau IV.7: Paramètres du cycle thermique.

Température maximale TMax (°C)	450
Température minimale TMin (°C)	35
Temps de chauffage (s)	300
Temps de refroidissement (s)	600

IV.6. Dispositif proposé

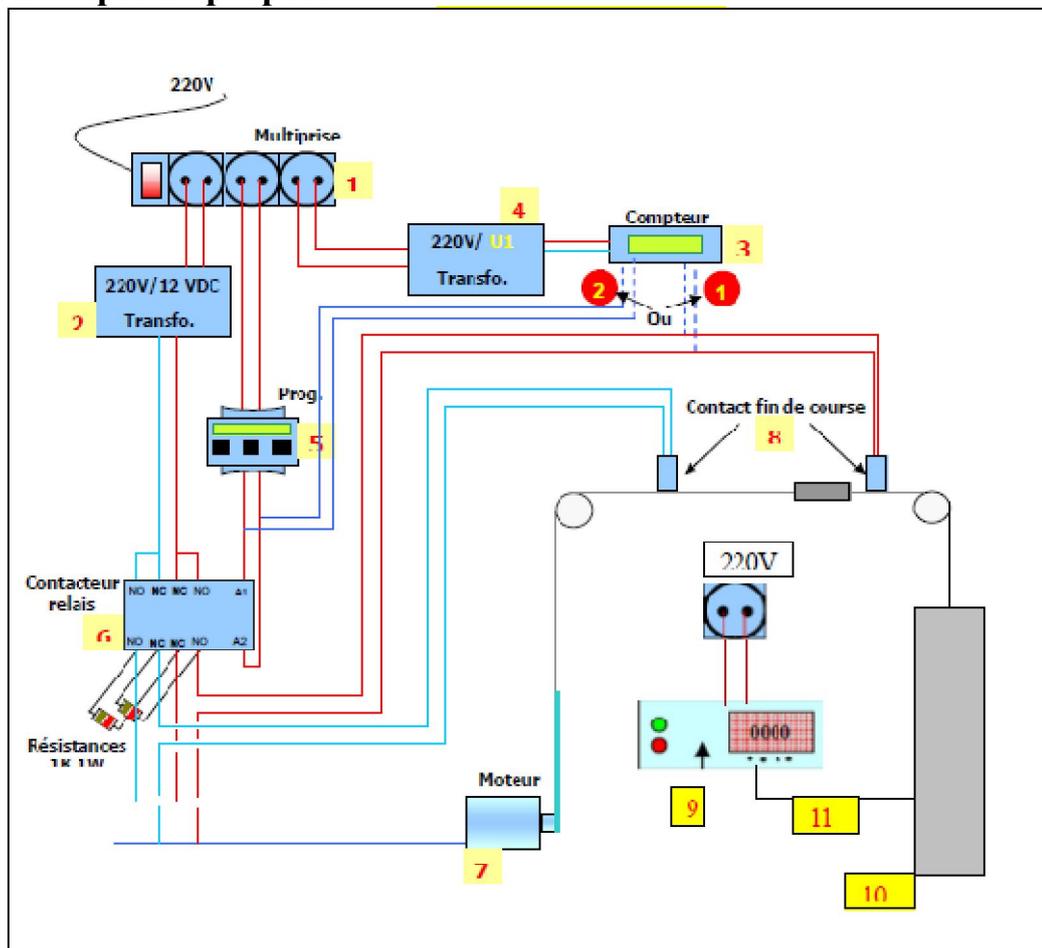


Figure IV.8: Schéma de commande d'un dispositif de choc thermique.

- **Composants du dispositif (Figure IV.8)**

1. Multiprise;
2. Transformateur 220V/12 vcd;
3. Compteur impulsion totalisateur (nécessite un transformateur selon sont alimentation U1 deux possibilités pour la mesure 12 vdc ou 220V);
4. Transformateur 220V/U1 selon la tension d'alimentation du compteur;
5. Programmateur avec cycle en minute;
6. Contacteur relais 220V;
7. Moteur essuie glace 12V;
8. Contact fin de cours;
9. Régulateur de température contient aussi le bloc de puissance ;
10. Four électrique tubulaire vertical, il peut chauffer jusqu'à 1200°C ;
11. Câble du thermocouple type K placé au milieu du four.

IV.7. Techniques d'analyses

IV.7.1. Caractérisation par la technique des ultra-sons

Le contrôle non destructif par ultrasons permet la détection, la localisation, le dimensionnement et l'identification du type de défaut interne dans les pièces métalliques. Il permet aussi de trier des informations sur l'état physique et métallique de la matière à partir d'une onde l'ayant traversé.

Ce contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut.

Dans notre cas, on a utilisé la technique de contrôle par immersion avec la méthode de transmission dans le but d'apprécier plutôt l'adhérence des échantillons après un nombre de cycle bien défini.

Principe de la méthode de transmission:

La pièce à contrôler est immergée complètement dans le liquide de couplage. Les palpeurs et la pièce ne sont plus directement en contact, le sondage peut être manuel mais dans la plupart des cas, il est automatique.

On met l'échantillon à caractériser entre deux palpeurs, un émetteur et un récepteur placé en opposition. Les impulsions ultrasonores reçues, convenablement synchronisées et amplifiées, permettent de caractériser la **transmission** des ultrasons au travers de la pièce (**voir Fig IV.9**).

Quand un défaut intercepte le signal, une partie de l'énergie ultrasonore est arrêtée et, en conséquence, l'énergie parvenant au capteur récepteur est diminuée.

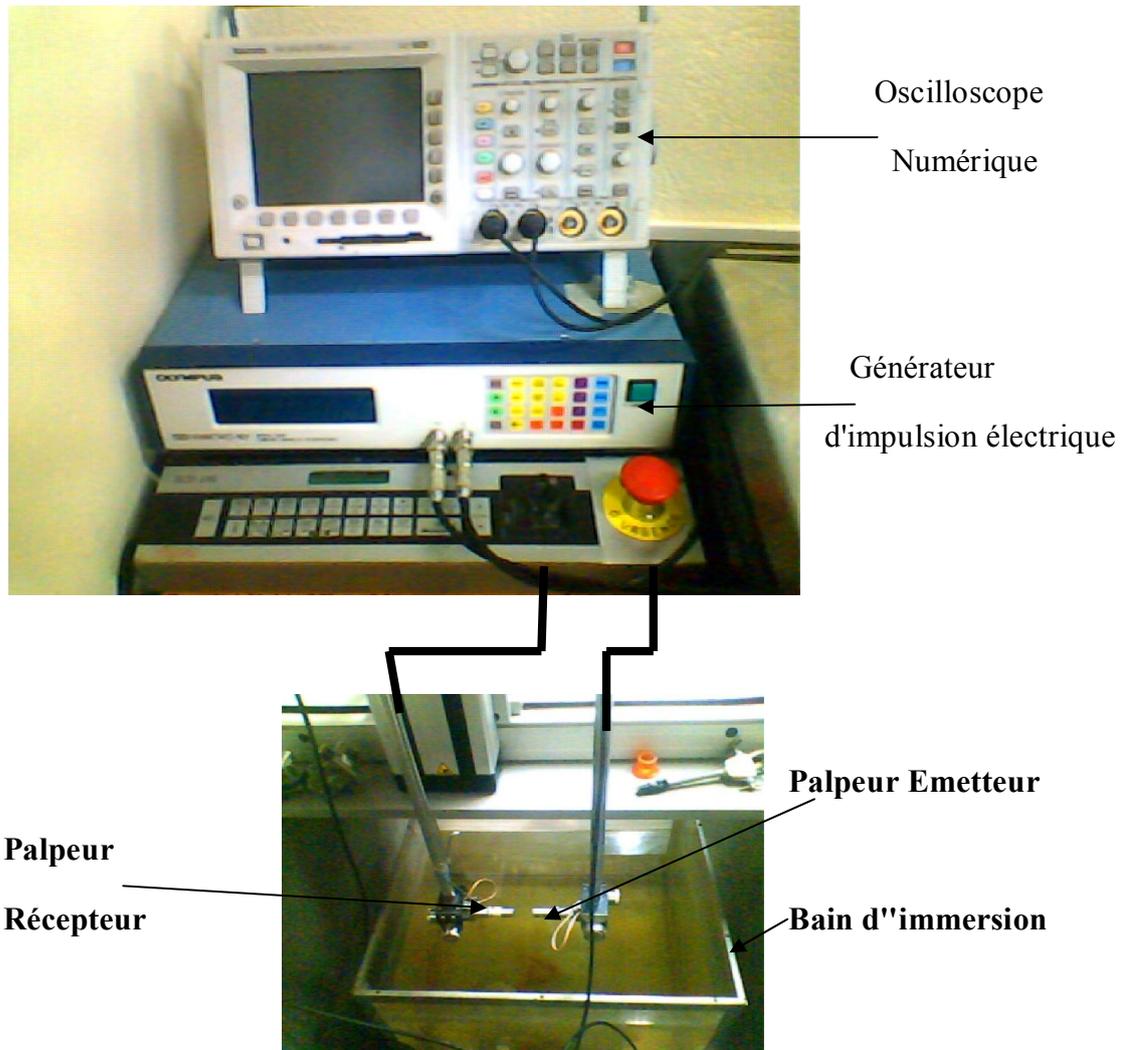


Figure IV.9 : *Technique des ultra-sons avec la méthode de transmission en immersion.*

Paramètres employés :

- La fréquence des palpeurs $f = 2,25$ MHz. De diamètres $D = 9,5$ mm;
- Oscilloscope Numérique "TEKTRONIX TDS 3054";
- Générateur d'impulsion électrique "PANAMETRICS model 5800";
- La distance entre les deux palpeurs $X = 20$ mm;
- Le liquide de couplage est l'eau.

IV.7.2. Analyse micrographique

Des observations par microscopie optique ont été effectuées sur une coupe transversale de nos échantillons avant et après les traitements de fatigue pour révéler les structures des différents constituants (substrat, sous couche et le dépôt).

Le microscope métallographique de type **OLYMPUS BX51M** en lumière directe permet l'observation des échantillons, avec un grandissement qui varie de 5X à 100X. Ce microscope s'accompagne d'une caméra (**fig IV.10**). 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'aller aux observations par microscope, il faut préparer la surface des échantillons.

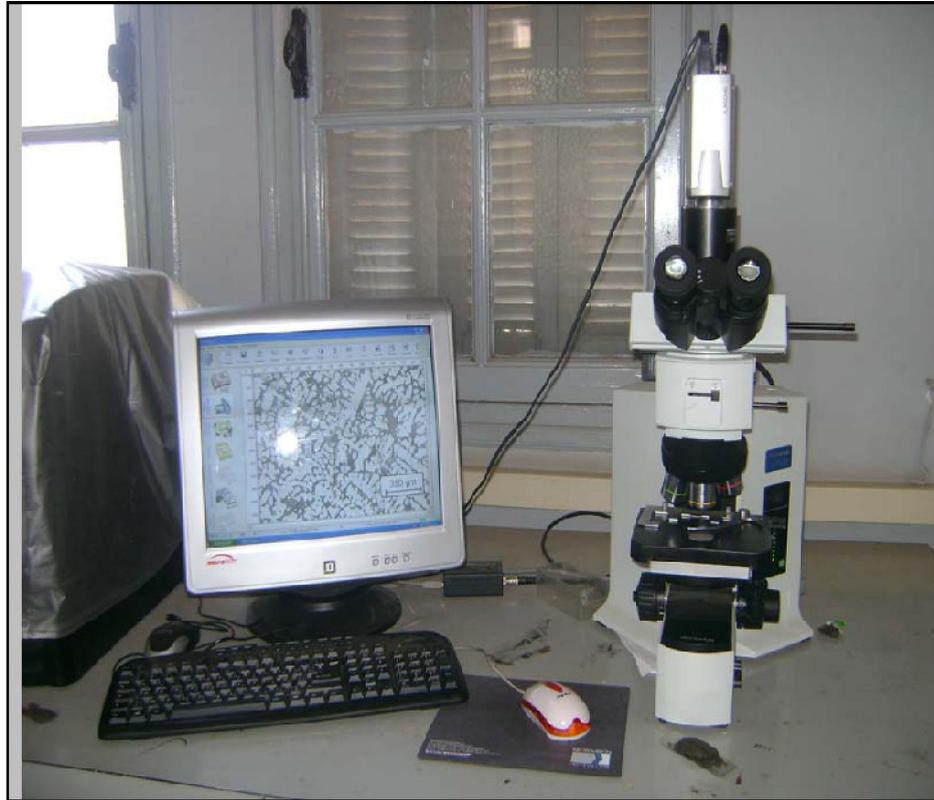


Figure IV.10: Microscope optique muni d'une caméra numérique connectée à un micro-ordinateur.

- **Polissage :**

Les échantillons à étudier ont subi des coupes transversales à l'aide d'une micro-tronçonneuse (voir Fig IV.11) ensuite, un enrobage à froid.

Les surfaces à observer subissent des polissages mécaniques, visant à les rendre planes et exemptes de toutes rayures, graisses ou déformations nuisibles et gênantes.

Cette opération consiste à polir les surfaces des échantillons à observer grâce aux papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus faible en commençant avec P.600 jusqu'au plus fin P.1200. Cette opération s'accompagne d'un arrosage abondant avec de l'eau pour écarter d'éventuels risques d'échauffement de la pièce.

La finition est faite à l'aide de la pâte diamantée tout en prolongeant 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.



Figure IV.11: Micro-tronçonneuse (MICRACUT 150).

IV.7.3. Test de microdureté

On a utilisé une machine de "SHIMADEZU HMV-M3", elle est constituée d'un dispositif pour l'enfoncement d'une pyramide en diamant à base carrée et d'angle de 136° au sommet sous une faible charge et un microscope métallographique (voir Fig IV.12). Par la mesure des deux diagonales de l'empreinte laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge, on peut avoir les valeurs de la microdureté directement à partir d'un tableau (chaque microduromètre a un tableau de valeurs de microdureté propre à lui).

Dans notre étude, on a appliqué une charge de 100gr sur la surface perpendiculaire au substrat et au revêtement pendant 10 secondes, sans choc ni vibration.

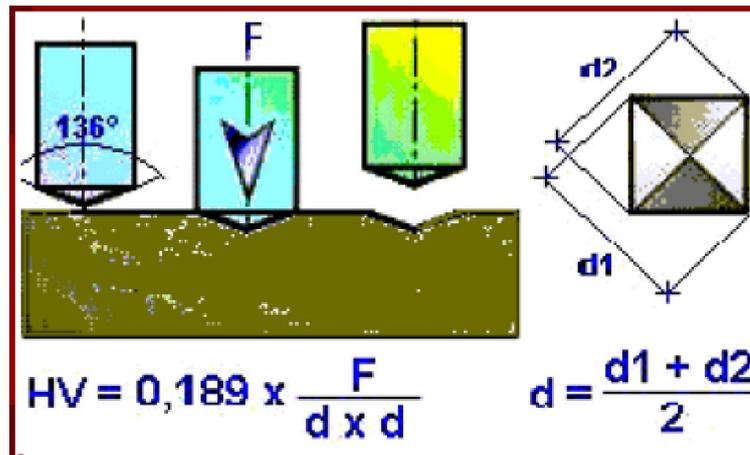


Figure IV.12 : Principe de l'essai de micro-dureté.

CHAPITRE V

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

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

V.1. Contrôle par les ultrasons des multimatériaux élaborés

La caractérisation de l'adhérence de l'interface des échantillons par les ultrasons, impose l'exploitation des diagrammes des amplitudes en fonction du temps de chaque nombre de cycles effectué. ces derniers nous permettent de calculer les coefficients d'atténuations pour pouvoir comparer l'adhérence de tous les échantillons.

Le coefficient d'atténuation

Le coefficient d'extinction ou d'atténuation d'une substance particulière, noté α , mesure la perte d'énergie d'un rayonnement traversant ce milieu; elle dépend de la dispersion et de l'absorption dans le milieu qu'il traverse.

L'étude du coefficient de l'atténuation α nous renseigne sur l'état de l'échantillon après un nombre de cycles bien défini.

L'évolution du coefficient α permet également d'expliquer la présence des défauts dans les pièces.

$$A_1 = A_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad ; \quad \alpha \text{ [dB/m]} = \frac{1}{x} \text{Ln} \frac{A_0}{A_1} \quad ;$$

- A_0 : L'amplitude de premier pic;
- A_1 : L'amplitude de deuxième pic;
- x : Epaisseur de l'échantillon;
- dB** : décibel; **m** : mètre.

V.1.1. Diagrammes des Amplitudes en fonction du temps
a- Cas de l'alliage AG3

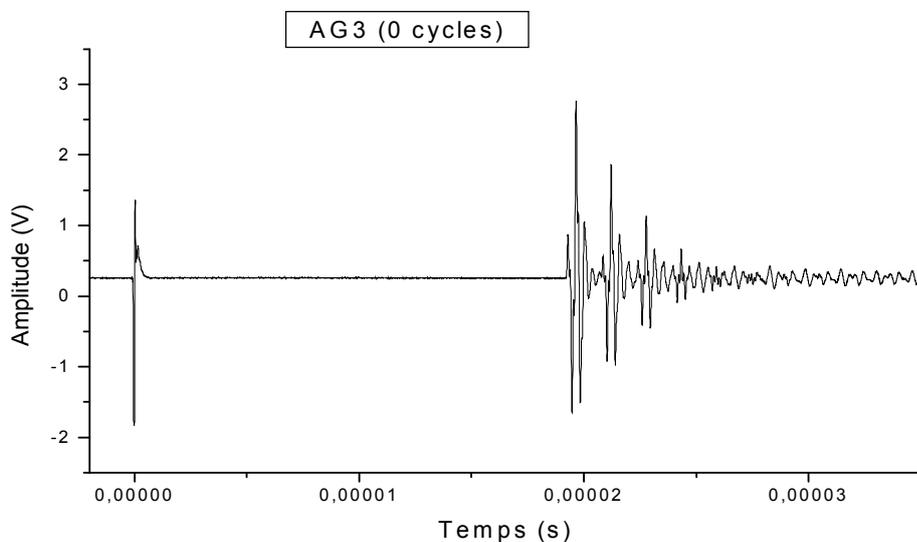


Figure V.1: Diagramme d'Amplitude dans l'AG3.

b- Cas du couple AG3/75E/55E

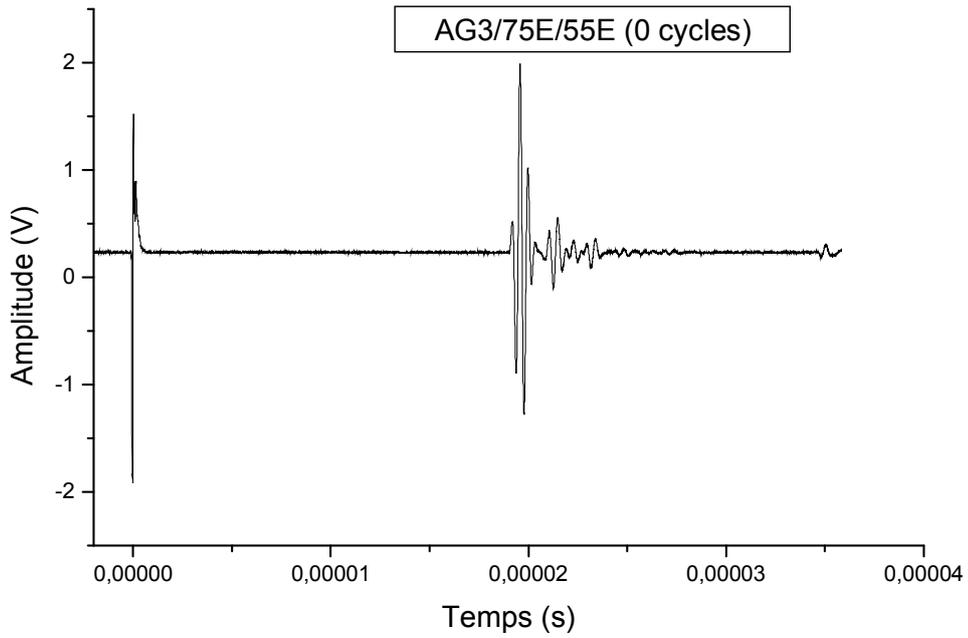


Figure V.2: Diagramme d'Amplitude du ccomposite AG3/75E/55E.

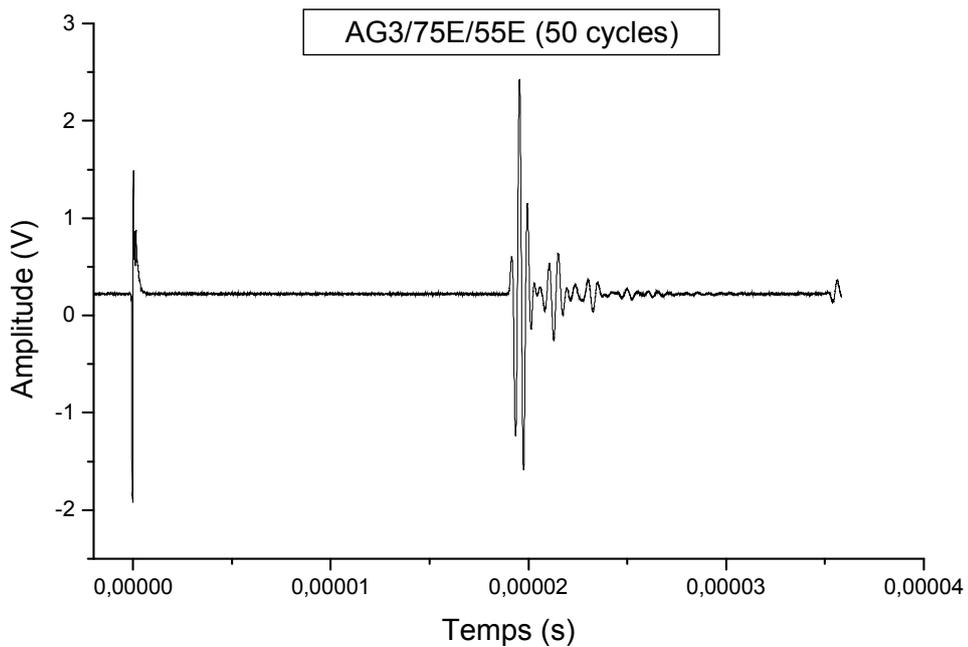


Figure V.3: Diagramme d'Amplitude du composite AG3/75E/55E (après 50 cycles).

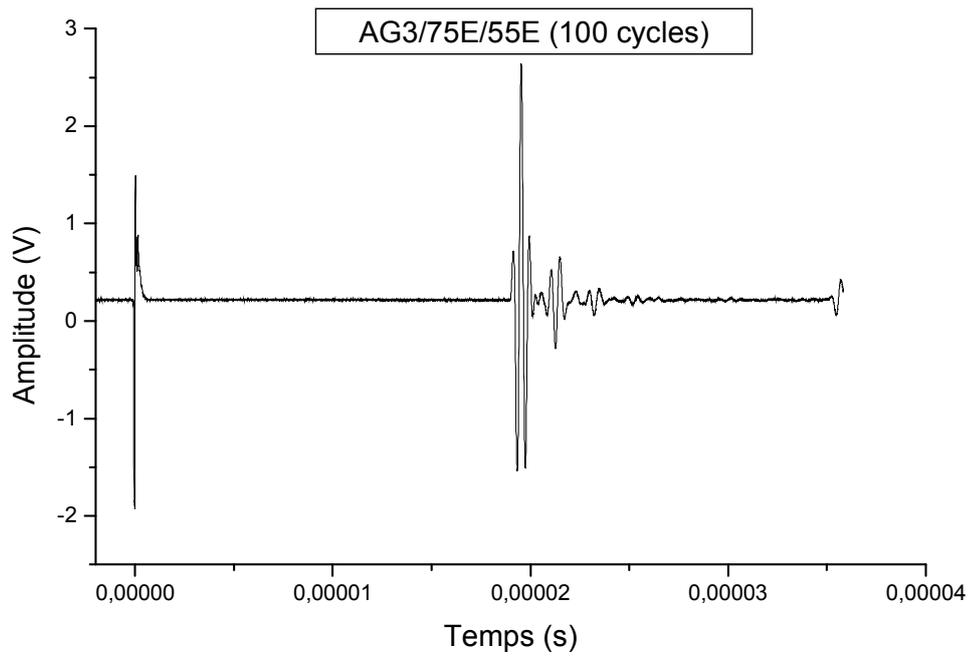


Figure V.4: *Diagramme d'Amplitude du composite AG3/75E/55E (après 100 cycles).*

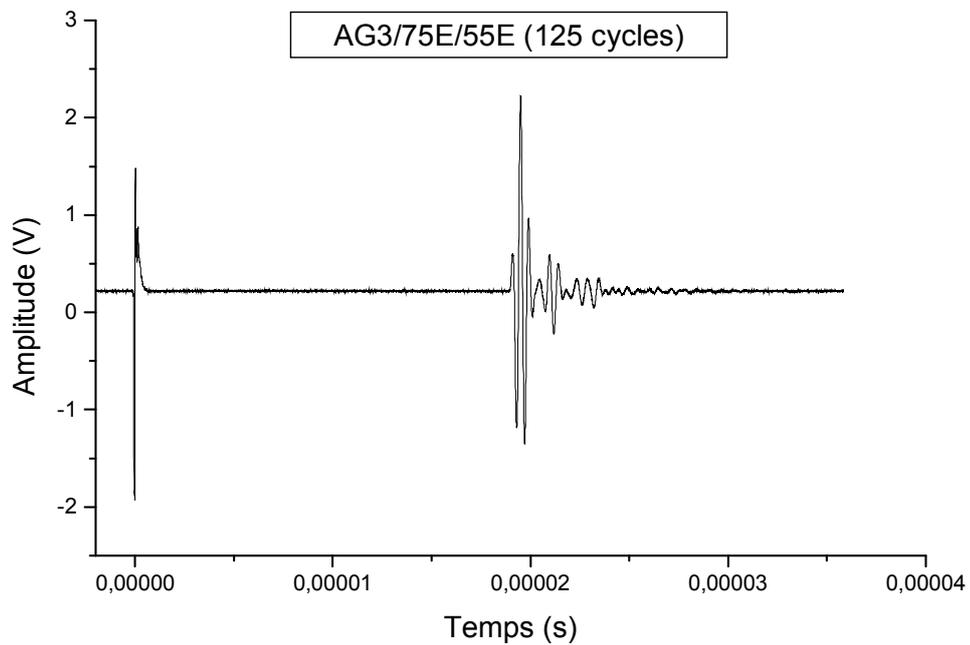


Figure V.5: *Diagramme d'Amplitude du compositeAG3/75E/55E (après 125 cycles).*

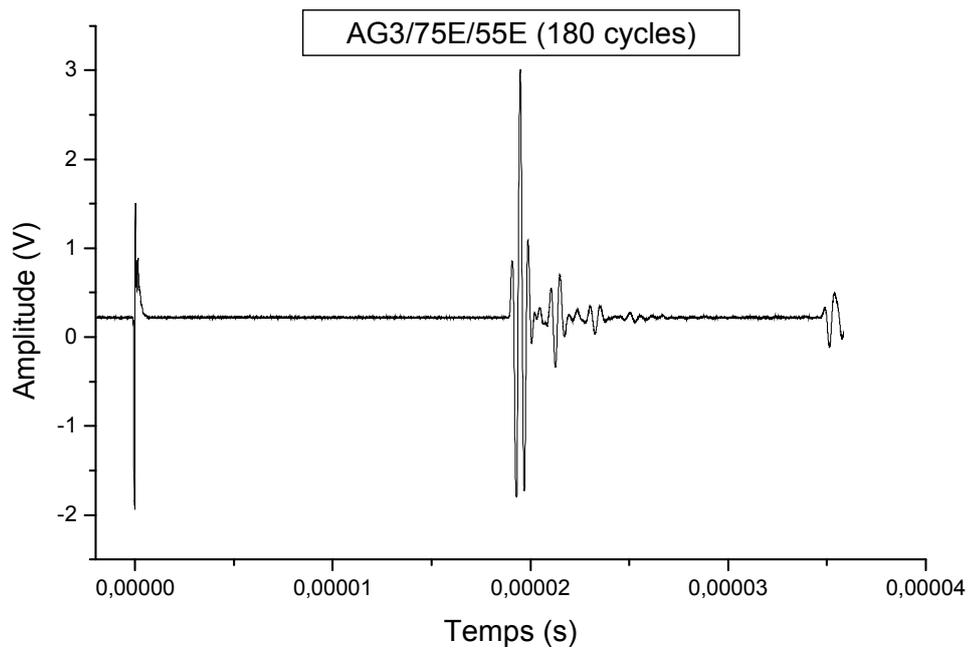


Figure V.6: Diagramme d'Amplitude du composite AG3/75E/55E (après 180 cycles).

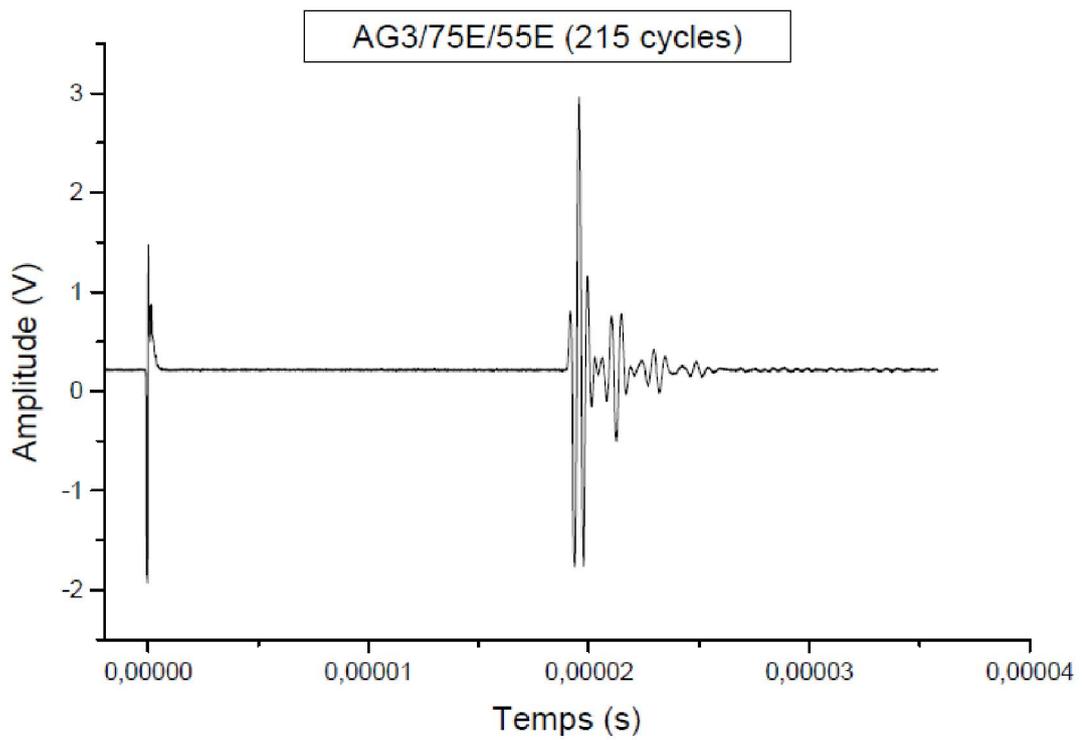


Figure V.7: Diagramme d'Amplitude du composite AG3/75E/55E (après 215 cycles).

c- Cas de l'alliage AU4G

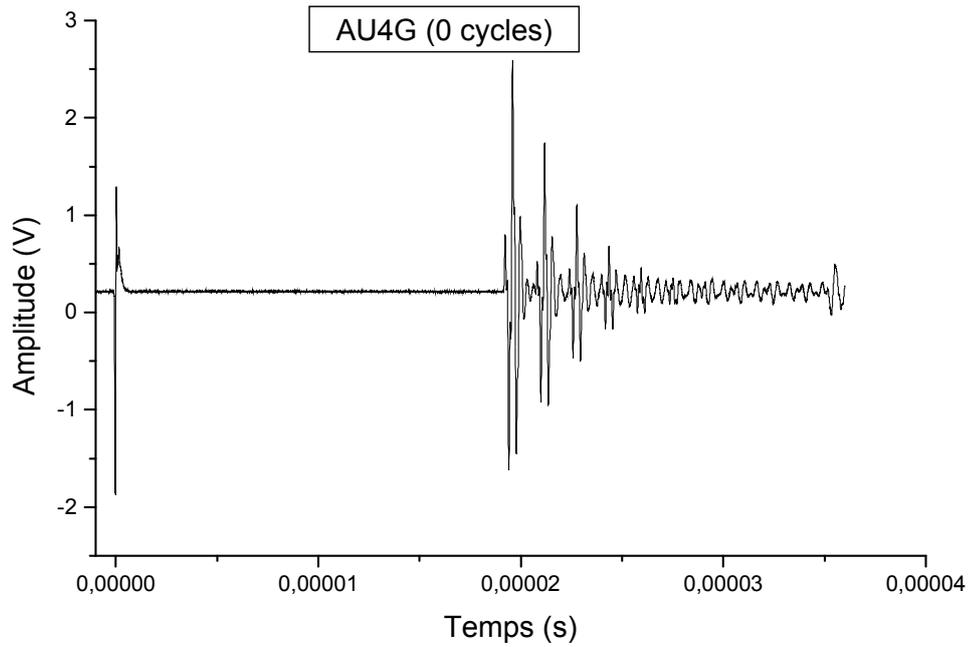


Figure V.8: Diagramme d'Amplitude dans l'AU4G.

d- Cas du couple AU4G/75E/55E

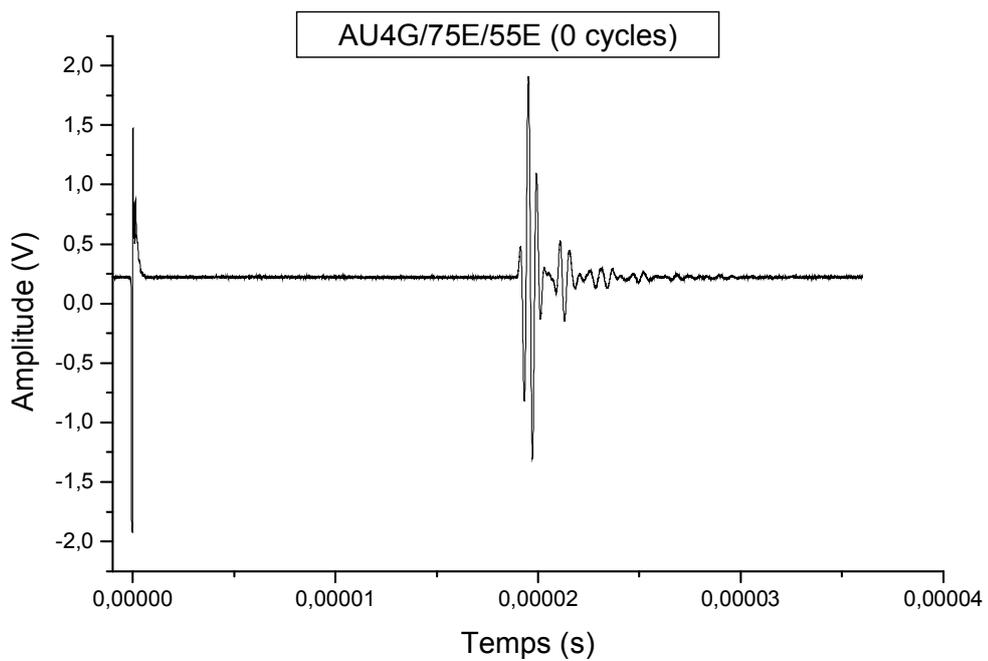


Figure V.9: Diagramme d'Amplitude du composite AU4G/75E/55E.

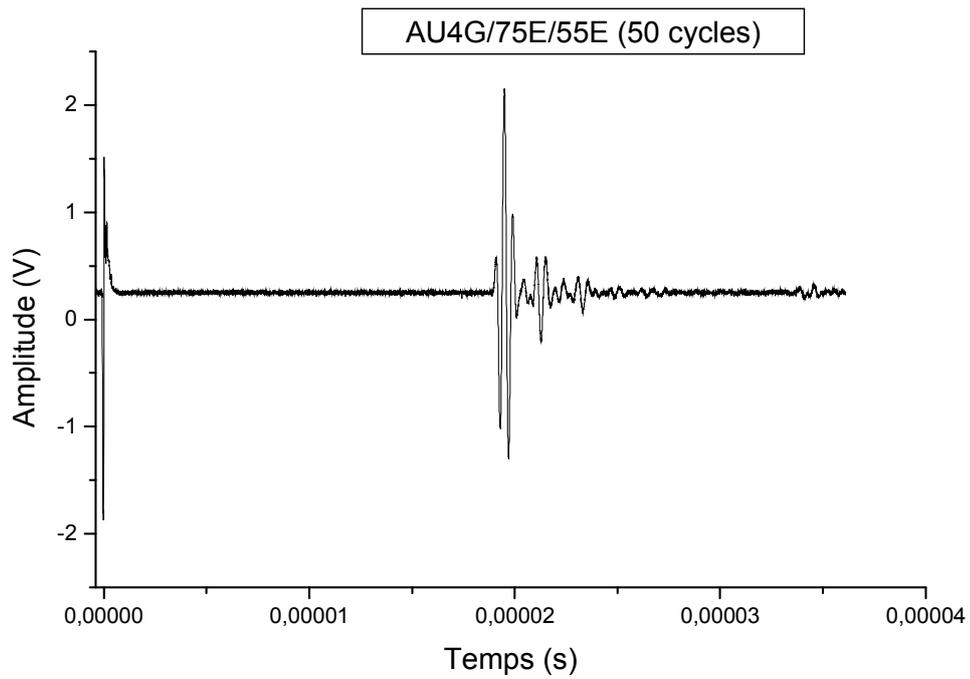


Figure V.10: *Diagramme d'Amplitude du composite AU4G/75E/55E(après 50 cycles).*

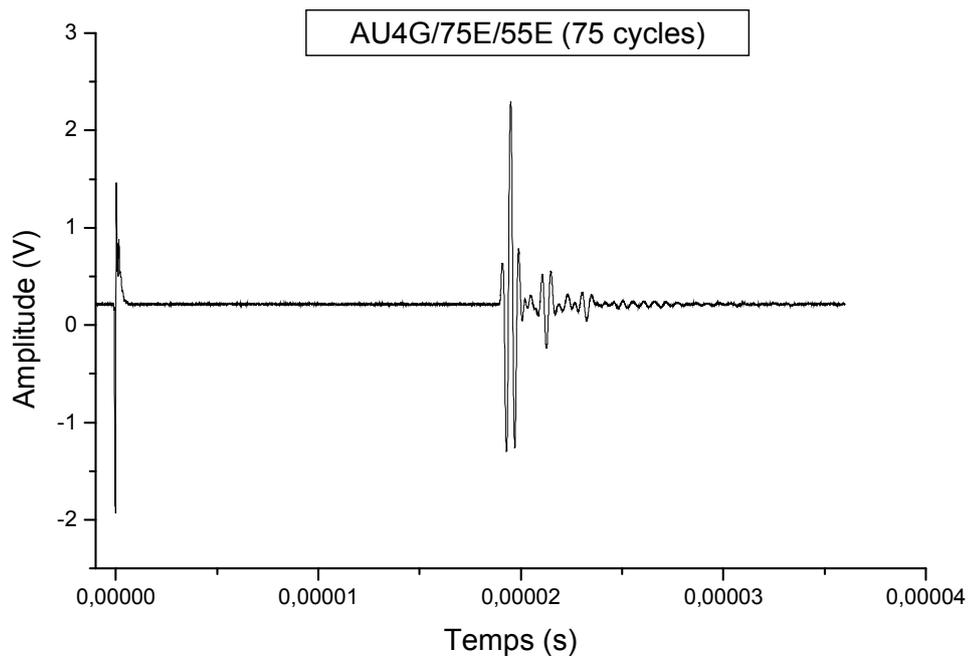


Figure V.11: *Diagramme d'Amplitude du composite AU4G/75E/55E(après 75 cycles).*

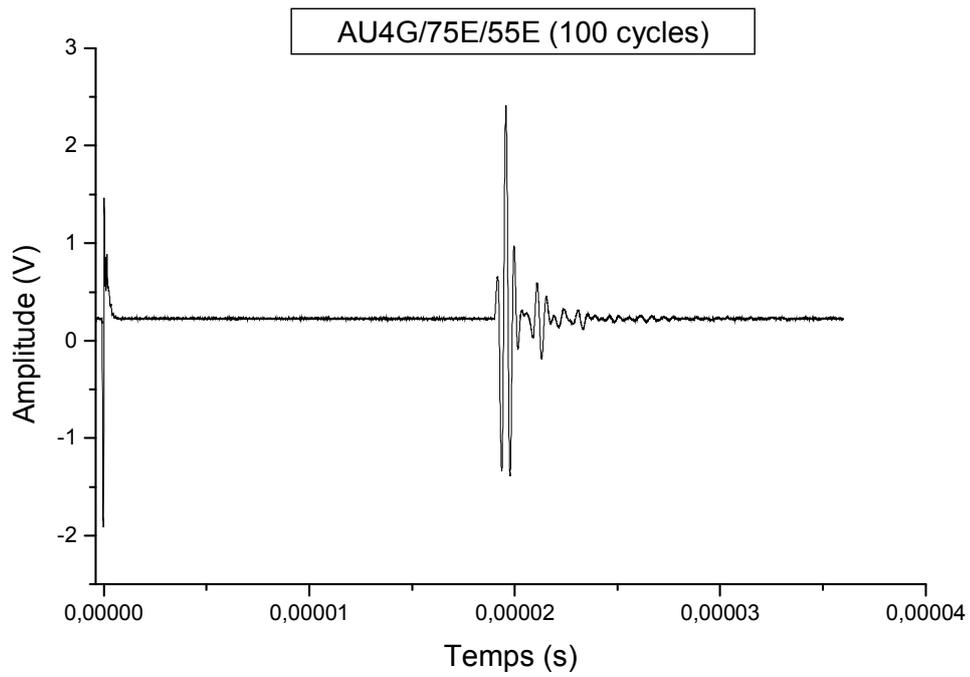


Figure V.12: Diagramme d'Amplitude du composite AU4G/75E/55E (après 100 cycles).

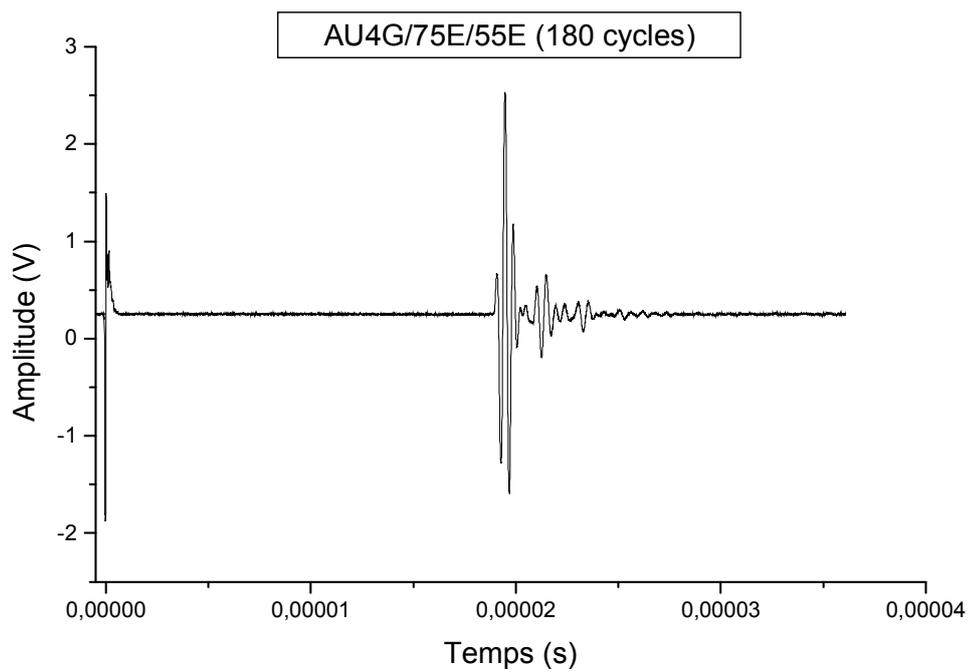


Figure V.13: Diagramme d'Amplitude du composite AU4G/75E/55E (après 180 cycles).

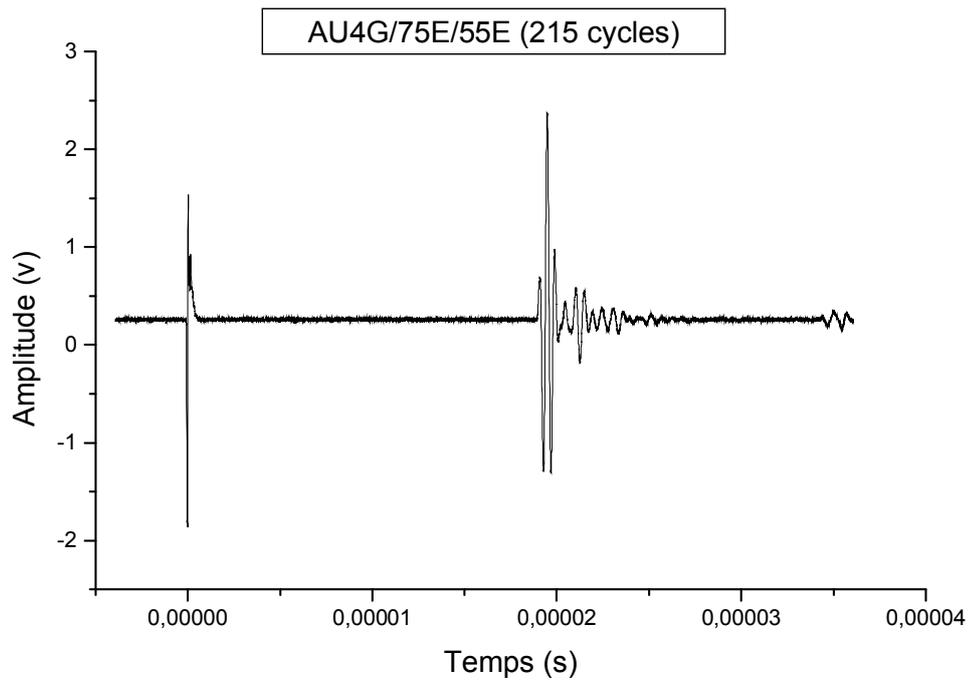


Figure V.14: *Diagramme d'Amplitude du composite AU4G/75E/55E (après 215 cycles).*

V.1.2. Détermination des coefficients d'atténuation

✓ Cas de l'alliage AG3 sans revêtement :

$$\alpha = 6,9444 \text{ (dB/m).}$$

✓ Cas de l'alliage AU4G sans revêtement :

$$\alpha = 6,5790 \text{ (dB/m).}$$

Les valeurs de l'atténuation calculées en fonction du nombre de cycles sont représentées dans les tableaux V.1 et V.2.

✓ L'évolution du coefficient d'atténuation en fonction du nombre de cycles pour le couple AG3/75E /55E

Tableau V.1: *Variation de l'atténuation en fonction du nombres de cycles thermiques du composite AG3/75E /55E.*

Nombre de cycles	Coefficient d'atténuation α (dB/m)
0	20,7258
50	22,2381
100	22,2693
125	23,8787
180	25,0864
215	24,7903

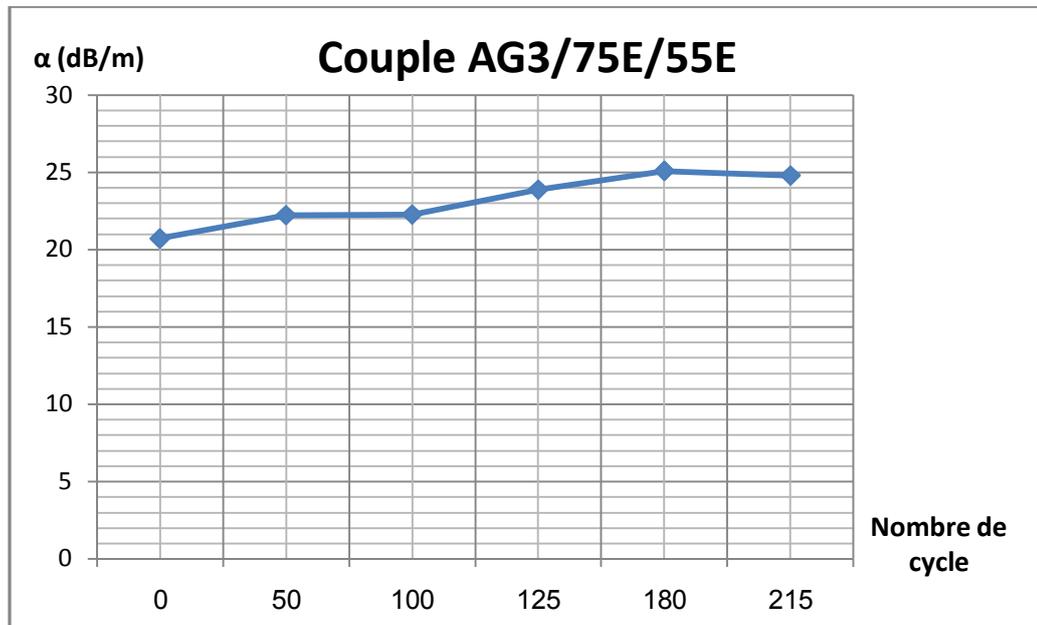


Figure V.15 : Evolution du coefficient d'atténuation en fonction du nombre de cycles thermique AG3/75E/55E.

- ✓ L'évolution du coefficient d'atténuation en fonction du nombre de cycles pour le couple AU4G/75E/55E

Tableau V.1: Variation de l'atténuation en fonction du nombres de cycles thermiques du composite AU4G/75E /55E.

Nombre de cycles	Coefficient d'atténuation α (dB/m)
0	19,3749
50	21,3539
75	22,0913
100	22,1095
180	22,5840
215	23,6092



Figure V.16 : Evolution du coefficient d'atténuation en fonction du nombre de cycles thermique AU4G/75E/55E.

V.1.3. Discussions et interprétations

D'après la détection du signal des amplitudes relatives aux différentes configurations des matériaux étudiés (voir les figures des diagrammes d'amplitudes), on peut avancer qu'on a une bonne adhérence dans tous les cas. Néanmoins, l'amplitude du signal diffère d'un échantillon à un autre en fonction du nombre de cycles thermiques effectués, malgré qu'une partie de l'énergie ultrasonore est absorbée. En conséquence, l'énergie parvenant au récepteur est diminuée, ce qui prouve l'existence d'un défaut qui intercepte le signal.

D'après les figures V.15 et V.16, on remarque une augmentation du coefficient d'atténuation en fonction du nombre de cycles thermiques pour les deux multimatériaux. Ces résultats peuvent être la conséquence de la présence de défauts dans les pièces étudiées qui augmentent avec l'augmentation du nombre de cycles thermiques. Cette augmentation est due probablement à la rupture au niveau des interfaces élaborées.

Pour compléter cette analyse et suivre la qualité de l'adhérence de nos échantillons, nous avons effectué une étude micrographique des deux multimatériaux.

V.2. Analyse micrographique des deux multimatériaux (AG3/75E/55E et AU4G/75E/55E)

Des observations par microscopie optique réalisées sur la coupe transversale des échantillons à base des composites AG3/75E/55E et AU4G/75E/55E après chaque nombre de cycles thermiques effectué.

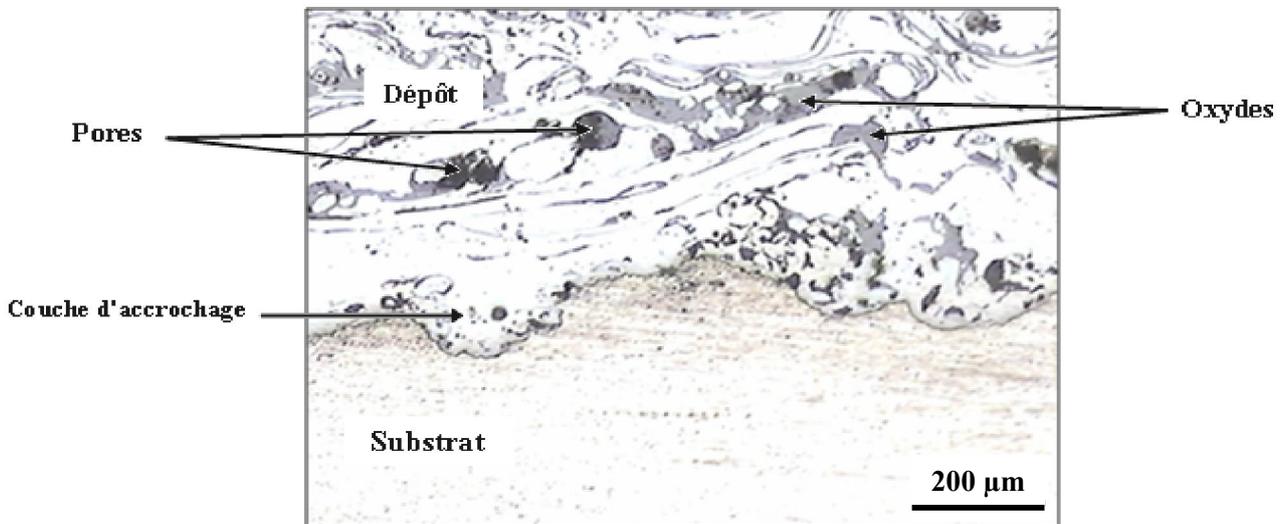


Figure V.17: Micrographie de l'interface AG3 décapé /75 E/thermanit (0 cycles).

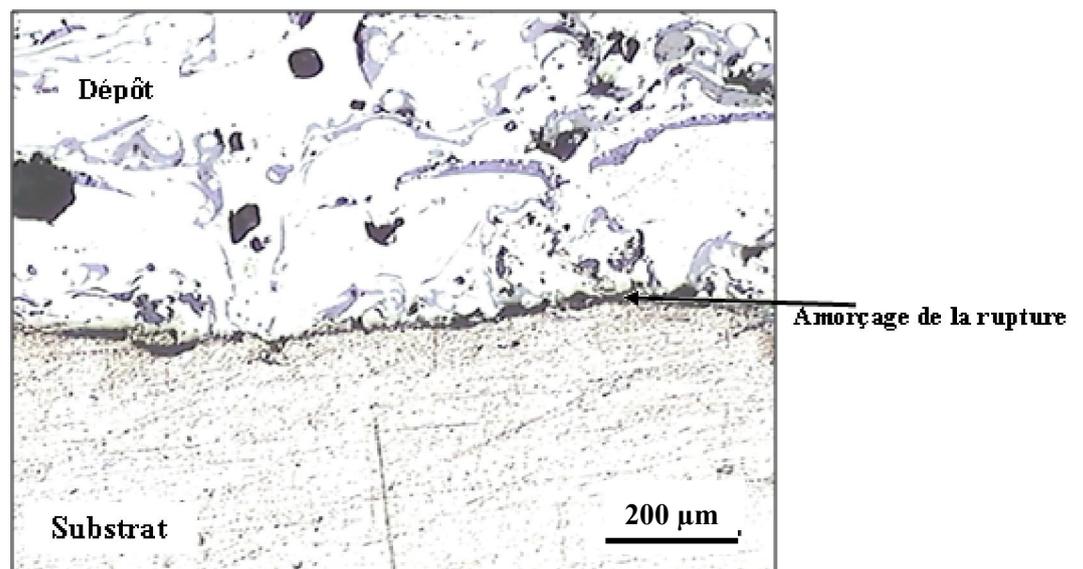


Figure V.18: Micrographie de l'interface AG3 décapé /75 E/thermanit (75 cycles).

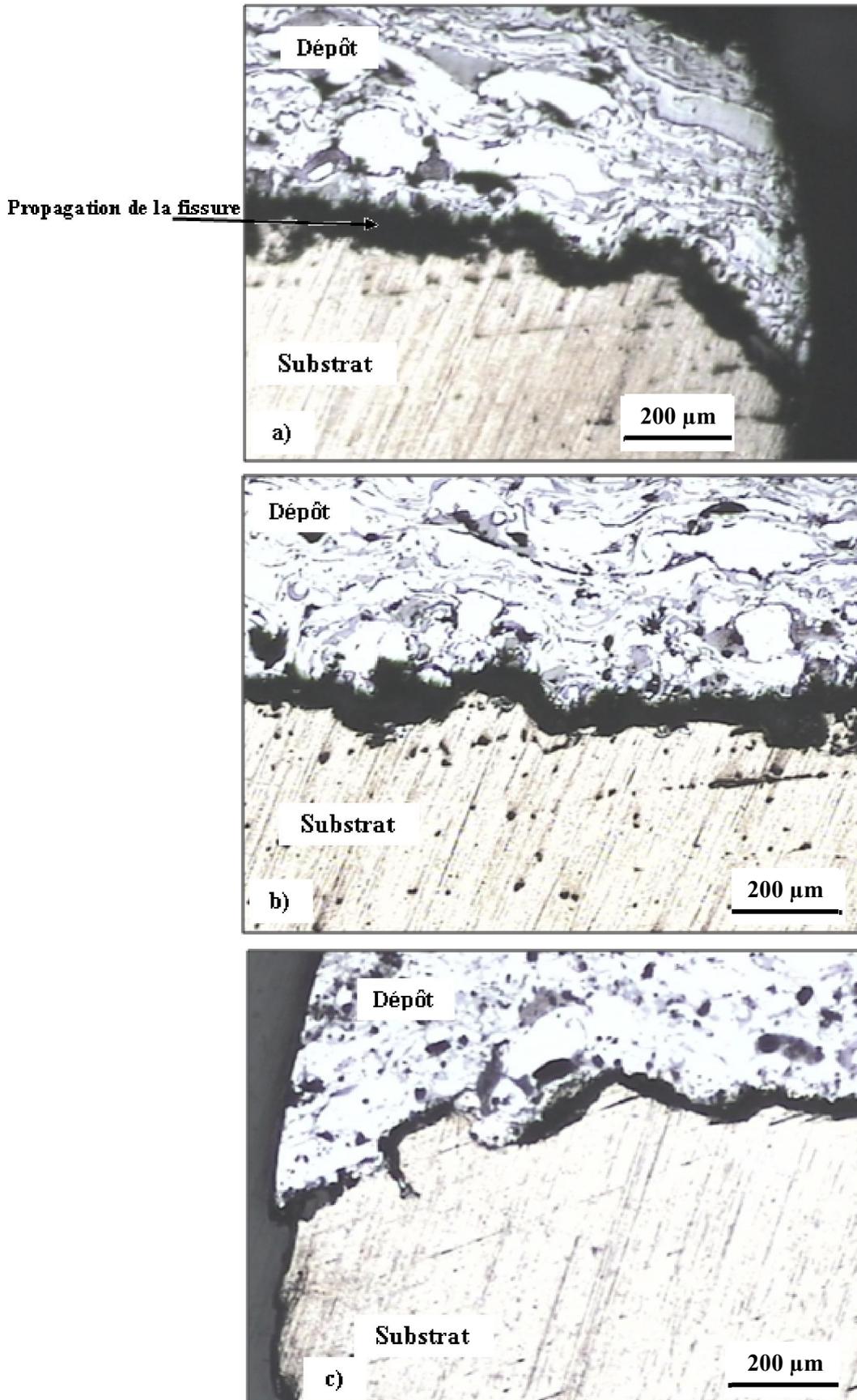


Figure V.19: Micrographies de l'interface AG3 décapé/75 E/thermanit (100 cycles) (a: extrémité gauche, b: extrémité droite, c: milieu de l'échantillon).

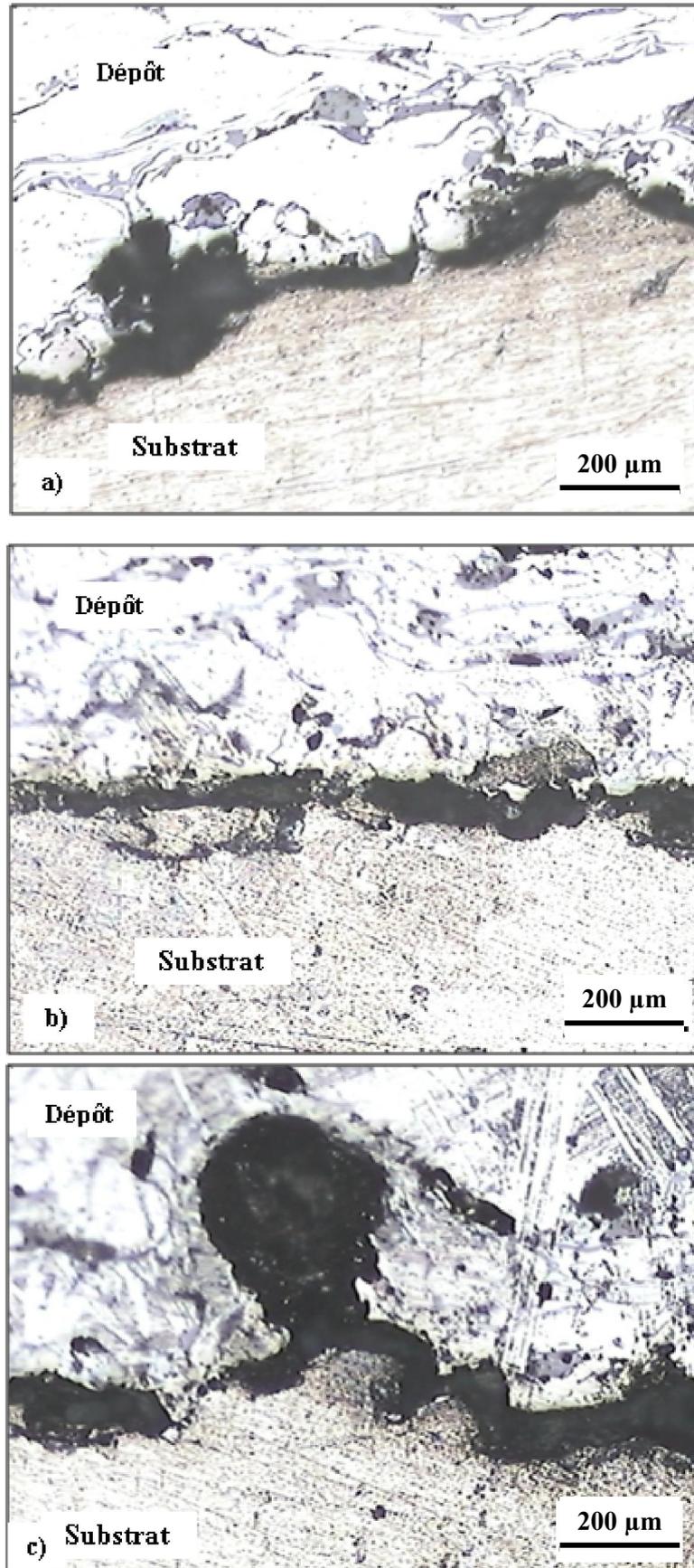
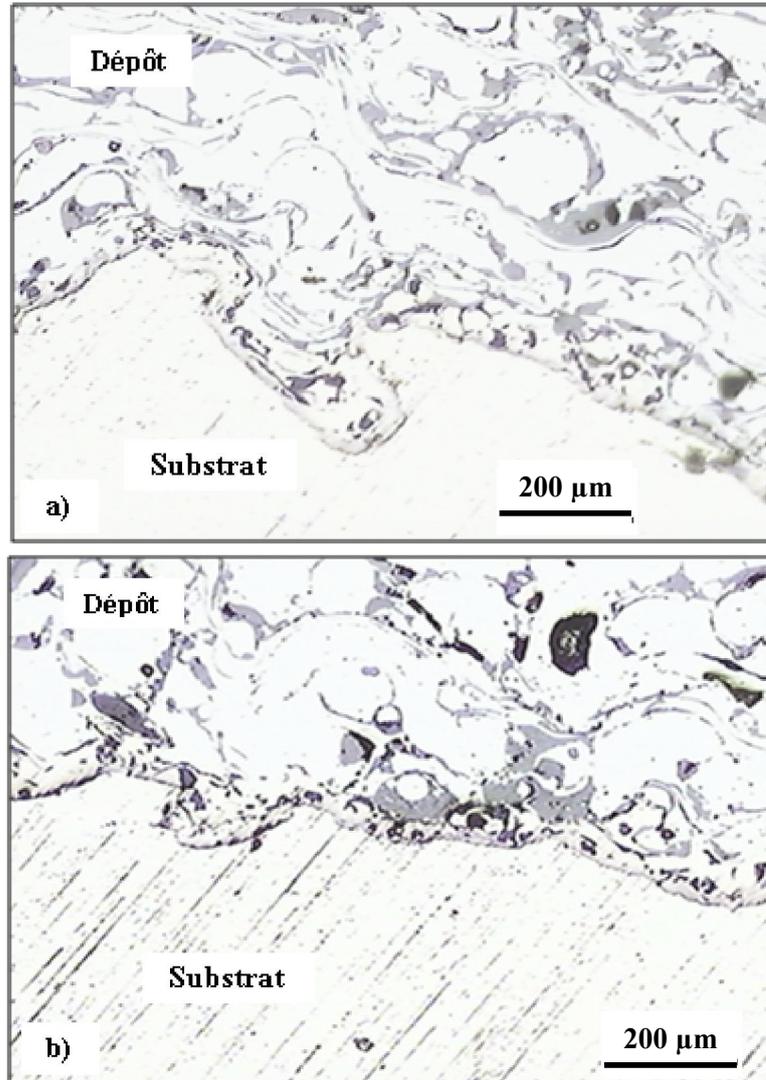


Figure V.20: Micrographies de l'interface AG3 décapé/75E/thermanit (215 cycles).
(a: extrémité gauche, b et c: milieu de l'échantillon).



FigureV.21: *Micrographies de l'interface AU4G décapé /75 E/thermanit (0 cycles). (a et b: milieu de l'échantillon).*

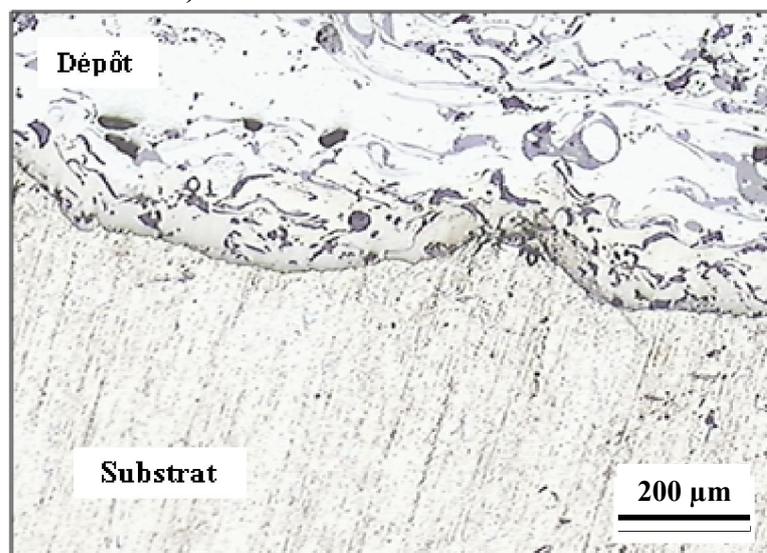


Figure V.22: *Micrographie de l'interface AU4G décapé /75 E/thermanit (75 cycles).*

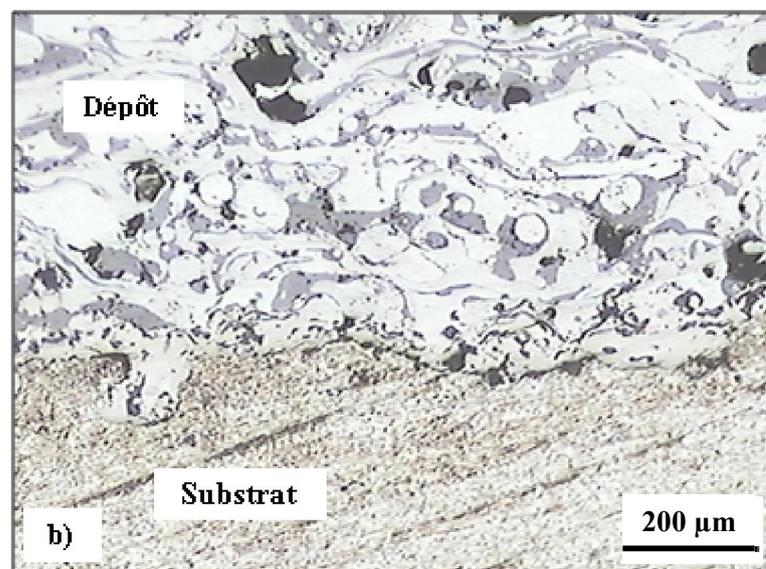
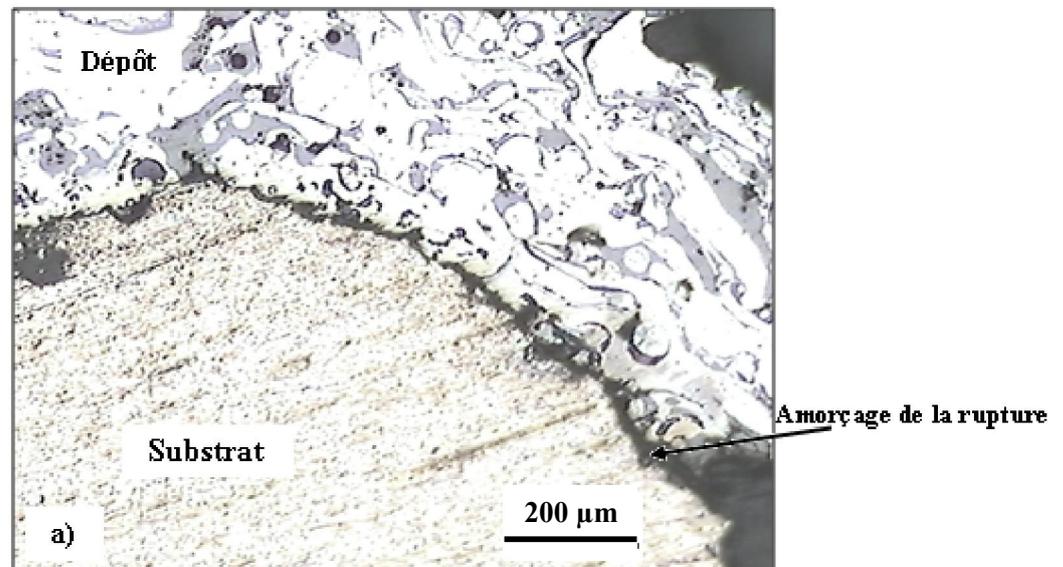


Figure V.23: Micrographies de l'interface AU4G décapé /75 E/thermanit (100 cycles) (a:extrémité droite, b: milieu de l'échantillon).

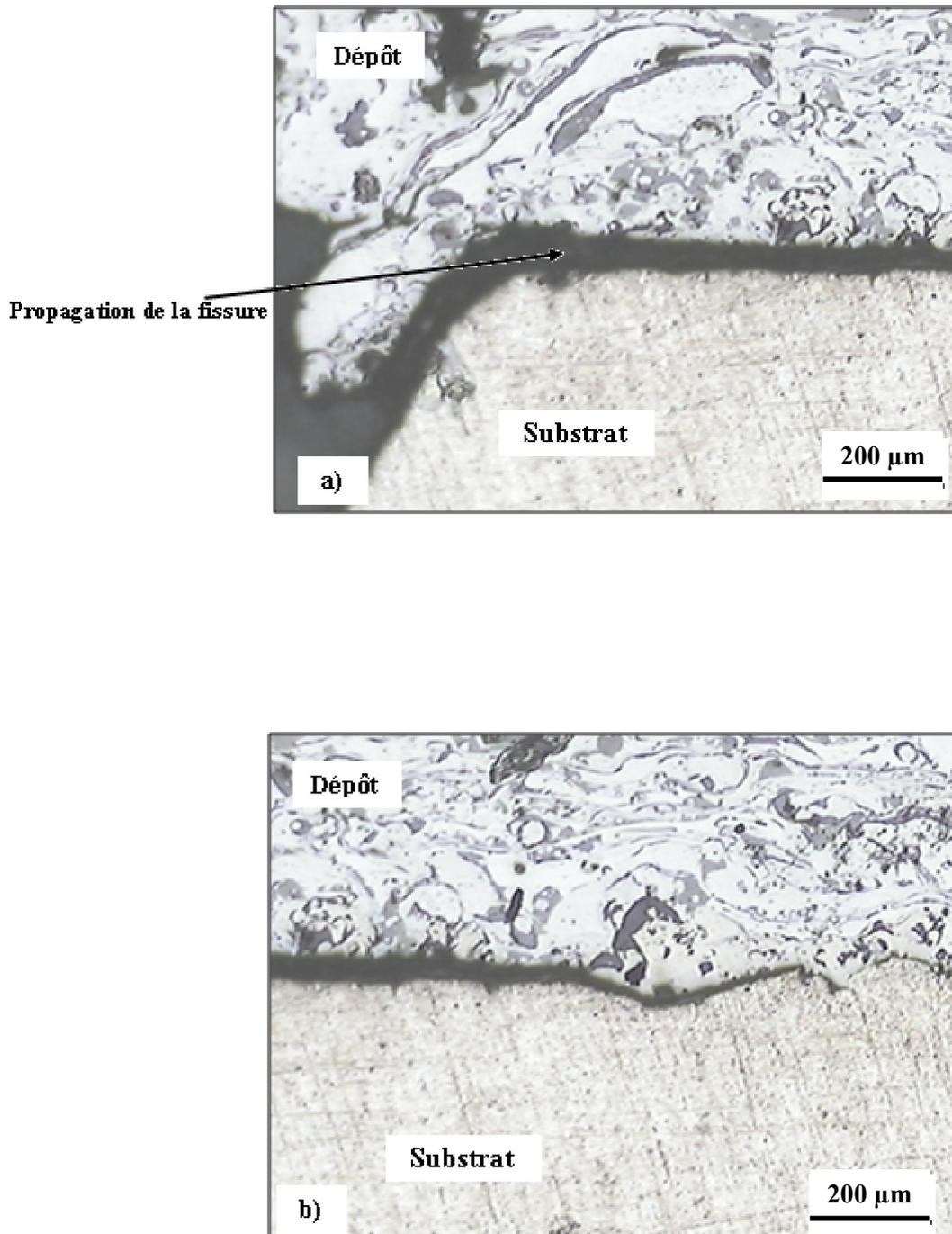


Figure V.24: *Micrographies de l'interface AU4G décapé/75 E/thermanit (215 cycles)*
(a: extrémité gauche, b: milieu de l'échantillon).

V.2.2. Discussions et interprétations

Les observations réalisées par microscopie optique et effectuées selon une coupe transversale dans le cas des deux composites AG3/75E/Thermanit et AU4G/75E/Thermanit (**figures V.17 et V.21**) montrent une structure lamellaire des dépôts élaborés par projection thermique. Les structures blanche et grise indiquent des structures de haute densité avec la présence d'oxydes de projection (plages grises localisés entre les lamelles du dépôt) et de porosités (zones noirs). Les particules sous forme sphérique présentent la matière non fondue.

On a noté une bonne adhérence entre le substrat et le dépôt dans le cas des deux composites étudiés.

Cette bonne adhérence est probablement due au décapage réalisé et de la présence de la sous couche d'accrochage projetée qui joue le rôle de liant de la Thermanit (revêtement finale de protection) sur le substrat.

Après 75 cycles thermique pour AG3/75E/55E et 100 cycles pour AU4G/75E/55E, l'observation des interfaces a montré l'existence de défauts au niveau de l'interface vers le substrat (**Figures V.18 et V.23**); c'est l'amorçage de la rupture.

Cette décohésion est le résultat de l'accumulation des contraintes thermiques formées pendant les différents cycles appliqués. Les propriétés thermiques (coefficient de dilatation thermique...etc.) des différents matériaux influent aussi sur ce comportement.

Après 100 cycles et 215 cycles respectivement pour les composites AG3/75E/55E et AU4G/75E/55E, la rupture au niveau de l'interface est plus marquée et la fissure amorcée se propage d'une manière plus importante (**Figures V.19, V.20 et V.24**).

V.3. Microdureté des multimatériaux AG3/75E/Thermanit et AU4G/75E/Thermanit

Des mesures de la microdureté Vickers ont été prises sur nos échantillons sous une charge de *100gr*. Ces tests concernent les différentes régions du matériau à base des alliages AU4G et AG3, la sous couche d'accrochage Ni-Al et le dépôt Thermanit.

Chaque valeur considérée représente une moyenne de trois essais distincts réalisés pour les mêmes zones.

L'évolution de la microdureté des deux multimatériaux AG3/75E/Thermanit et AU4G/75E/Thermanit en fonction de la profondeur sous différentes conditions est présentée sur **les figures V.25 et V.26**.

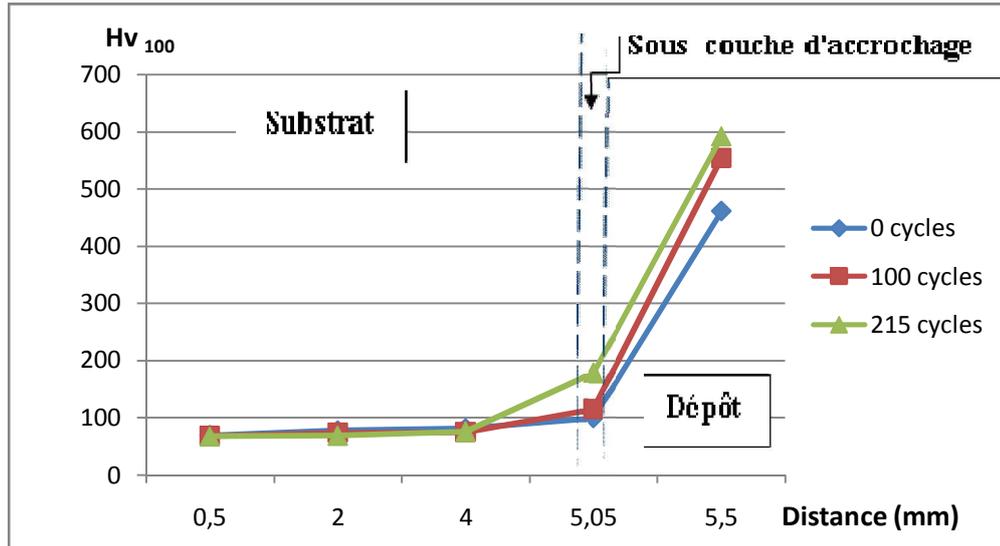


Figure V.25: Evolution de la microdureté du composite AG3/75E/55E en fonction de la profondeur du nombre de cycles thermiques.

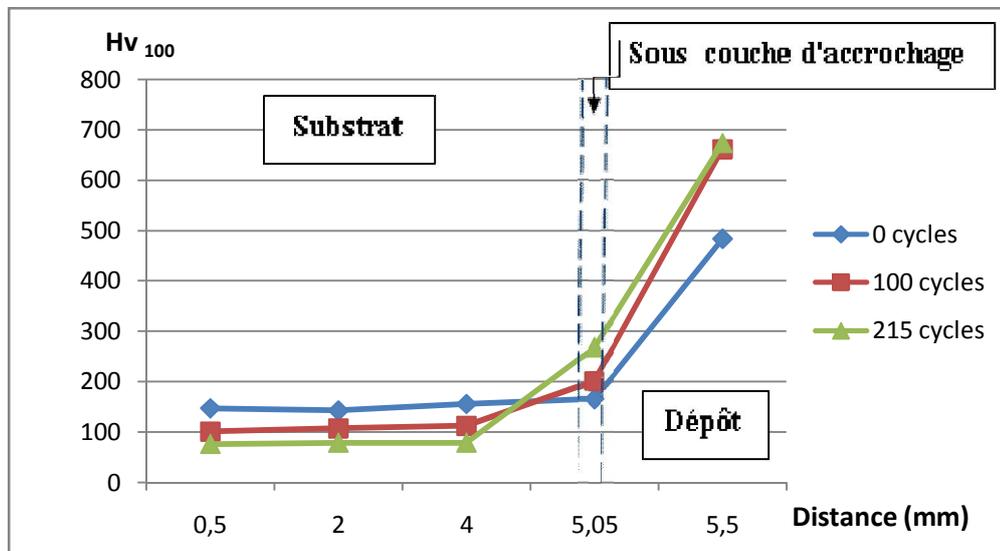


Figure V.26: Evolution de la microdureté du AU4G/75E/55E en fonction de la profondeur et du nombre de cycles thermiques.

V.3.1. Discussions et interprétations

- **Mesure pour 0 cycles thermiques**

Pour les zones proches du dépôt, on note une microdureté supérieure à celle du substrat dans le cas des deux composites (Figures V.25 et V.26). le dépôt réalisé par la projection thermique a amélioré cette propriété mécanique au niveau de la surface de notre matériau.

- **Après 100 et 215 cycles thermiques**

On note une stabilité de la microdureté pour l'alliage AG3 et une diminution de la microdureté au niveau de l'alliage AU4G et ceci en fonction de l'augmentation du nombre de cycles thermiques. Cette diminution est due à un grossissement de la taille des grains.

Au niveau du revêtement, on note une augmentation de la microdureté pour les deux multimatériaux AU4G/75E/55E & AG3/75E/55E. Ce durcissement est dû éventuellement à la densification du revêtement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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

Les revêtements métalliques, en particulier ceux réalisés par projection, apportent des solutions efficaces aux problèmes d'usure, de corrosion...etc. Les couches déposées par cette technique, constituent une bonne barrière thermique de protectrice du matériau de base.

L'adhérence entre le matériau protecteur et le substrat de base reste l'un des principaux problèmes à résoudre pour les multimatériaux ainsi élaborés.

Dans notre cas, afin de garantir une bonne adhérence entre les antagonistes, nous avons entrepris plusieurs démarches : le sablage du substrat, le décapage pour éliminer la couche d'alumine naturelle qui joue le rôle de barrière de diffusion pour l'aluminium et ses alliages et enfin l'utilisation d'une couche d'accrochage 75E pour assurer la liaison du revêtement principal sur le matériau à protéger.

Aussi, pour mener à bien notre étude, nous avons utilisé un dispositif de fatigue thermique. Cet équipement nous permettait de suivre le comportement et la tenue de l'interface sous l'effet de cycles thermiques répétés des deux composites AU4G/75E/55E & AG3/75E/55E réalisés par projection thermique.

Les méthodes de caractérisation utilisées (destructives et non destructives) nous ont permis de dégager les points principaux suivants:

Tests par ultrasons

- *Ces essais ont montré que plus le nombre de cycles thermiques augmente plus l'atténuation augmente => augmentation des défauts.*

Caractérisations par microscopie optique

- *L'examen micrographique de l'interface sous des coupes perpendiculaires à la surface du revêtement met en évidence une structure lamellaire du dépôt.*
- *Dans le cas des deux multimatériaux à base de l'AU4G ou l'AG3, la sous couche d'accrochage joue un rôle primordial lors de la déposition de la Thermanit par projection thermique sur la surface de l'alliage étudié et préalablement décapé à base d'un bain de zinc.*
- *Le bon accrochage AU4G-Zn/dépôt et AG3-Zn/dépôt est noté.*
- *L'augmentation du taux de fissuration en fonction du nombre de cycles thermiques est noté pour les deux multimatériaux (AU4G/75E/55E & AG3/75E/55E).*
- *Le composite AU4G/75E/55E présente une meilleure tenue sous l'effet des cycles thermiques.*

CONCLUSION GENERALE

Microdureté

- *Les mesures de la microdureté Vickers confirment que cette propriété est meilleure dans le cas de la protection de la surface par les dépôts projetés par rapport au substrat brut.*
- *Une augmentation de la microdureté en fonction du nombre de cycles thermiques au niveau du revêtement est notée, on suppose que ce résultat est du essentiellement à une diminution de la porosité (densification) à ce niveau.*

Pour limiter l'endommagement d'une pièce mécanique qui subit des chocs thermiques et augmenter sa durée de vie, la connaissance des contraintes thermiques générées lors de son élaboration et son fonctionnement est nécessaire. Il est donc souhaitable de contrôler et d'agir sur les paramètres tels que la température, le gradient thermique et également la durée de maintien au cours du chauffage et du refroidissement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [01] **A. PRONER.** Revêtements par projection thermique. Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M1645, (2005).
- [02] **B. HANSZ.** Les applications industrielles de la projection thermique. Forum industriel ITSC (1998).
- [03] **M. BENDJEDIA.** Etude de la corrosion d'un acier inoxydable réalisé par projection thermique. Mémoire de fin d'études, ENP Alger (Juin 2008).
- [04] **M. VARDELLE, S.BANSARD, P .FAUCHAIS.** La projection thermique : Formation du dépôt et contrôle en ligne du procédé. Journée Scientifique –Barrières thermiques ONERA (23 mai 2002).
- [05] **A. PRONER.** Métallisation par impact. Technique d'ingénieur, M1640, (2008).
- [06] **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).
- [07] **S. AUDISIO, M. CAILLET, A. GALERIE, H. MAZILLE.** Revêtement et traitement de surface (fonctionnalités, durabilité, procédés). Collection des sciences appliqués de l'INSA de Lyon (Octobre 1998).
- [08] **International Aluminium Institute (IAI) :** <http://www.worldaluminium.org/iai/stats/index.asp>.
- [09] **A. PRONER.** Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie. Techniques de l'ingénieur (Société AREGA), M4661 (2005).
- [10] **M. COLOMBIE, COLL.** Matériaux industriels : Matériaux métalliques. Collection DUNOD-Paris (septembre 2000).
- [11] **Raymond. LOEWY.** L'Aluminium. série de technologie (2009).
- [12] **J. BAILON, J. DORLOT.** Des matériaux, troisième édition. Presses internationales, Québec (2000).
- [13] **R. DEVELAY.** Données numériques sur l'Aluminium non allié. Techniques de l'ingénieur, M433 (2008).
- [14] Institut international de soudure. Recommandation concernant les structures soudées en aluminium et alliage Al-Mg, 2eme édition (1980).
- [15] **J. IDRAC.** Comportement électrochimique d'alliage modèles binaires aluminium-cuivre. Thèse de doctorat, INP Toulouse (2003).
- [16] **Roger DEVELAY.** Aluminium et alliages d'aluminium corroyés : propriétés métalliques. Techniques de l'ingénieur, M438 (2008).

Références bibliographiques

- [17] **Sébastien MORIN.** Effet du magnésium, des traitements thermiques et de la porosité sur les propriétés mécaniques de traction et de fatigue de l'alliage sous pression a380.1. Mémoire d'Ingénieur, université du québec a chicoutimi (Juillet 2002).
- [18] **C. VARGEL.** Le comportement de l'aluminium et de ses alliages. Edition dunod, Paris (1979).
- [19] Revue Métallerie 49 Spécial soudage. Classification des alliages d'aluminium (avril 2003).
- [20] **N. MESRATI, M. LARIBI et D. TREHEUX.** Influence des éléments d'addition sur l'adhérence de la zircone projetée par plasma sur un alliage d'aluminium. A.J.O.T, vol. 10, N°1 (1994), pp.169-182.
- [21] **N. MESRATI, M. LARIBI et D. TREHEUX.** Elaboration par projection thermique et caractérisation d'interface métal/métal et métal/céramique. Algerian journal of technology, international publication vol. 12, N°1 (1997), pp. 91-103.
- [22] **C. DEHMAS.** Etude de l'influence des postes de traitement sur l'adhérence et le comportement mécanique d'un multimatériau réalisé par projection thermique, Projet de fin d'études, ENP Alger (1994).
- [23] **K.L. MITTAL.** Adhesion measurement of thin films. Materials Science and Engineering, Vol.28, Issue 1 (April 1977), p. 165.
- [24] **H. WEISS.** Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment. Surface and Coating Technology (1995).
- [25] **V.V. SOBOLEV, J.M. GUILMANY, J. NUTTING.** Development of substrate coating adhesion in thermal spraying. International Materials Reviews (1997).
- [26] **A. A. VOLINSKI, N.R. MOODY, W.W. GERBERICH.** Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Acta Materialia (2002).
- [27] **C.S. RICHARD, J. LU, J.F. FLAVENOT, G. BERANGER.** Revêtements NiCrAlY projetés par plasma. Effet des contraintes résiduelles sur la ténacité à l'interface. CETIM- Information, N°120 (1991), pp. 67-72.
- [28] **S.Y SHIN, M.W KO, D.C CHO.** Microstructure and mechanical properties of Al6061 joints diffusion brazed using Cu interlayer, Journal of Materials Science Letters, (2002).
- [29] **F. BAHBOU, P. NYLEN, G. BARBEZAT.** A parameter study of the Protal process to optimize the adhesion of Ni5Al coatings. Advances in Technology and Application, Materials Park; U.S.A, OH (2004).

Références bibliographiques

- [30] **S. HEDACQ.** Etude de l'adhérence et de la construction d'un dépôt d'acier inoxydable élaboré par projection plasma sur un substrat polymère. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (2000).
- [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] **E. SILVERI, E. CHASSAING, S.B. GORYACHEV.** Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique. *Journal de Physique IV* (2003).
- [36] **A. SADKI.** Etude de la protection du matériau aéronautique AU4G. Mémoire de magister, ENP Alger (1998).
- [37] **S. BOUFLIGHA.** Comportement en cyclage thermique de l'interface du matériau composite 55E+65E/35CD4 réalisé par projection thermique. Thèse de magister, ENP Alger (2000).
- [38] **K. OURARI.** Evolution microstructurale et mécanique d'un acier allié au chrome-molybdènevanadium (Z160CDV12) en conditions de fatigue thermique. Thèse de magister, ENP Alger (2001).
- [39] **A. LOUCIF.** Comportement en Conditions de Fatigue Thermique d'une Soudure en Acier Inoxydable Duplex de Nuance UNS S 31803. Mémoire de Magister, ENP (2006).