
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE METALLURGIE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

MEMOIRE

DE MAGISTER

PRESENTE PAR

Omar LADJALI

INGENIEUR D'ETAT EN METALLURGIE DE L'ENP

THEME

**COMPORTEMENT EN FATIGUE THERMIQUE DE
BIMATERIAUX A BASE D'ALLIAGE D'ALUMINIUM,
ETUDE EXPERIMENTALE ET MODELISATION.**

Présenté devant le jury :

MR. M. BOUABDALLAH	PROFESSEUR (ENP)	PRESIDENT
MR. N. MESRATI	PROFESSEUR (ENP)	RAPPORTEUR
MR. M.E DJEGHLAL	MAITRE DE CONFERENCE (ENP)	EXAMINATEUR
MR. K. ABADLI	CHARGE DE COURS (ENP)	EXAMINATEUR
MR. M. KEDDAM	MAITRE DE CONFERENCE (USTHB)	EXAMINATEUR

ANNÉE 2009

10, AVENUE HASSEN BADI, EL-HARRACH, ALGER

ملخص

هذا العمل موجه لانجاز المركبين AG3/75E/55E و AU4G/75E/55E بالإسقاط الحراري بواسطة القوس الكهربائي بين سلكين من اجل معالجة السلوك السيء لخلائط الألمنيوم المستخدمة في صناعة الطيران في مواجهة الاجهاد الحراري. بعد انجاز المركبين ، توصلنا الى خصائص جديدة جيدة للمتطلبات الحرارية للسطح المعني.

اهتمامنا انصب حول نمذجة رقمية للسلوك الحراري للمركبين ، بحساب الإجهادات المتبقية المتولدة، بواسطة برنامج حسابي (ABAQUS) ، و التي تحدث عطب التركيب.

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

Abstract

This work is to produce two composite AG3/75E/55E and AU4G/75E/55E by thermal projection using electric arc between two threads to address the bad behavior of aluminum aeronautical alloys against thermal exhaustion.

Following the development of multi-materials, we considered new suitable properties for heat loads of specific surface area.

We are interested to modeling the thermal behavior of those multi-materials , by calculating the residual stresses generated with calculation software (ABAQUS) , which occurred damage to the assembly.

Key words: Thermal projection, Thermal fatigue, Residual stresses, Adhesion, Aluminium 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.

Nous nous sommes intéressés à une modélisation du comportement thermique des multimatériaux, en calculant les contraintes résiduelles engendrées, avec un logiciel du calcul (ABAQUS), qui provoquent l'endommagement de l'assemblage.

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

Dédicace

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

- *À mes très chers et tendres parents, que Dieu les protège ;*
- *À mes frères, mes soeurs, mes neveux et nièces ;*
- *À toute ma famille ;*
- *À tous mes amis et collègues du département de métallurgie, de l'École et de la cité
BOURAOUI;*
- *À tous ceux que j'aime et qui m'aiment, où qu'ils soient.*

Omar LADJALI.

Remerciement

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

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

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

Je tiens à remercier vivement Mr A. SADKI qui nous a fourni les échantillons, Mme K. CHOUGHANE qui a contribué à nous faire le décapage des pièces, le technicien de l'Algérie Métallisation Mr Salah qui n'a ménagé aucun effort lors de la réalisation de la projection thermique et Mr M.L. HATTALI qui m'a beaucoup aidé d'effectuer la partie modélisation pour tous ses conseils et ses orientations.

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

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

Merci à tous.

SOMMAIRE

	Pages
Introduction générale	1
Chapitre I. Fatigue thermique	
I.1 Introduction	3
I.2 Définitions	3
I.3 Contraintes d'origine thermique	4
I.4 Mécanisme de la fatigue thermique	5
I.5 Contraintes thermiques résiduelles	7
I.6 Fissuration d'origine thermique	8
I.6.1 Amorçage	8
I.6.1.1 Amorçage sous contrainte thermique cyclique	8
I.6.1.2 Amorçage par la fragmentation cellulaire de la couche d'oxyde	9
I.6.2 Propagation	9
I.7 Facteurs de la fatigue thermique	10
I.7.1 Nature du cyclage thermique	10
I.7.2 Facteur d'environnements	11
I.7.3 Facteurs thermiques	11
I.7.4 Facteurs géométriques	11
I.7.5 Facteurs métallurgiques	11
I.7.6 Facteurs mécaniques	12
I.8 Conclusion	12
Chapitre II. Traitements de surfaces et projection thermique	
II.1 Différents traitements de surface.....	13
II.2 Projection thermique	14
II.2.1 Principe de fonctionnement	15
II.2.2 Types de projection thermique	16
II.2.2.1 Projection thermique à la flamme	16
II.2.2.2 Projection à arc électrique entre deux fils	19
II.2.2.3 Projection Plasma	20
II.2.3 Caractéristiques générales des dépôts.....	23
Chapitre III. Multimatériaux	
III.1 Les multimatériaux	25
III.2 Les propriétés des multimatériaux	26
III.2.1 Adhérence et Adhésion.....	26
III.2.1.1 Phénomènes à l'origine de l'adhérence.....	27
III.2.1.2 Méthodes de mesure de l'adhérence.....	29
III.2.2 Les contraintes résiduelles.....	30
III.2.2.1 Définition.....	30
III.2.2.2 Différentes échelles de contraintes internes.....	30
III.2.2.3 Méthodes de détermination des contraintes résiduelles	31

Chapitre IV. Procédures expérimentales

IV.1. Matériaux utilisés	32
IV.2. Techniques expérimentales et préparation des éprouvettes	34
IV.3. Fatigue thermique	38
IV.3.1. Dispositif de la fatigue thermique	38
IV.3.2. cycle thermique.....	39
IV.4. Techniques d'analyses.....	40
IV.4.1. Analyse micrographique.....	40
IV.4.2. Etude de la microdureté.....	41

Chapitre V. Résultats et discussions

V.1. Structure du dépôt	42
V.2. Adhérence du dépôt	44
V.2.1 Observation au microscopie optique	44
V.2.2 Observations au MEB.....	50
V.3. Microdureté des composites AU4G/Thermanit et AG3/Thermanit.....	51

Chapitre VI. Modélisation

VI.1. Introduction	53
VI.2. Le Modèle théorique	53
VI.3. Les contraintes résiduelles	54
VI.3.1. Sources des contraintes	54
VI.3.2. Chargement thermique	55
VI.3.3. Equations du problème	56
VI.4. Les données du problème et les conditions aux limites	57
VI.5. Les résultats obtenus	58
VI.5.1. La déformation de la flèche	58
VI.5.2. Les contraintes résiduelles	61
VI.6. Constatations et remarques	66
Conclusion générale et perspectives	67
Références bibliographiques	69

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le choix des matériaux métalliques à l'échelle industrielle nécessite une connaissance approfondie des métaux et alliages métalliques et de leur assemblage, ainsi qu'une maîtrise des techniques d'investigation, d'analyse et d'étude. En effet, la réponse des structures métalliques à des sollicitations appliquées (mécaniques et/ou thermiques) est liée à la microstructure finale obtenue suite aux procédés d'élaboration et à la gamme de fabrication et de mise en forme [1].

Les bonnes caractéristiques mécaniques des alliages d'Aluminium, leur légèreté et leur résistance à la corrosion leur ouvrent un domaine d'application très important dans les industries de pointe, et plus particulièrement en aéronautique. Les problèmes rencontrés aux sollicitations à haute température (fatigue thermique) constituaient un frein pour ces alliages [2], ce qui pousse les chercheurs d'être en mesure d'apporter des solutions intelligentes pour l'amélioration des performances des pièces mécaniques et répondre à la demande d'une clientèle de plus en plus exigeante.

Le cyclage thermique chauffage/refroidissement provoque la fatigue thermique et engendre des contraintes responsables de l'endommagement des structures et de la réduction de leurs durée de vie.

La technique des revêtements par projection thermique est largement exploitée dans l'industrie aéronautique. Les propriétés de certains revêtements ne peuvent être obtenues que par projection thermique, en utilisant principalement les métaux, céramiques, carbures et composites ainsi que les mélanges de divers matériaux [3].

Les revêtements par projection thermique sont appliqués à un substrat pour donner à la surface spécifique une qualité qu'elle n'a pas à l'origine. Ainsi, la résistance apparente d'une pièce est garantie par le substrat, et le revêtement offre des qualités de surface supérieures telles que la résistance à l'usure ou à la chaleur [2-3].

La réalisation de revêtements projetés de haute qualité passe par une bonne cohésion du dépôt et une adhérence élevée des revêtements sur leur substrat. Du fait de leur mode d'élaboration, les microstructures des interfaces dépôt/substrat et particule/particule obtenues par projection thermique sont complexes et les propriétés en dépendant hétérogènes [4].

L'utilisation de la simulation et logiciel du calcul s'est répandue, au cours des dernières décennies, dans divers secteurs industriels tels que l'aéronautique, la construction navale, l'industrie automobile et dans des domaines liés, entre autres, à la mécanique des matériaux et des structures. Parmi les nombreux programmes généraux basés sur la MEF et disponibles pour l'utilisation industrielle citons, principalement dans les domaines de la mécanique des solides, ABAQUS, ANSYS, MARC, NASTRAN, SAMCEF, SYSTUS... Bien que ces logiciels soient initialement conçus pour des gros ordinateurs, ils ont été adaptés ces dernières années pour

exploitation sur micro-ordinateurs au même titre que des programmes modulaires permettant la résolution de problèmes [5] par exemples, les contraintes thermiques, les contraintes mécaniques...

Notre étude comporte trois parties principales :

- Etude bibliographique relative aux techniques de la projection thermique, la fatigue thermique des matériaux et les problèmes du multimatériau surtout au niveau de l'interface substrat/revêtement.
- Etude expérimentale qui comporte la présentation des matériaux et matériels employés, les démarches de préparation des composites (AG3/75E/55E et AU4G/75E/55E) par projection thermique à l'arc électrique entre deux fils et les différentes techniques utilisées pour examiner et analyser l'adhérence du revêtement obtenu avec les deux matériaux de base (microscopie optique, microscopie électronique à balayage, ainsi les tests de la microdureté).
- Modélisation qui consiste à utiliser un logiciel du calcul (ABAQUS 6.1), pour estimer la durée de vie de nos échantillons ayant subi le phénomène de la fatigue thermique, et pour cela, il est nécessaire de connaître les contraintes thermiques qui ont été générées lors de leur fonctionnement. Nous nous sommes intéressés à une modélisation du comportement thermique, en calculant les contraintes résiduelles engendrées dans notre système.

Cette étude sera terminée par une conclusion générale regroupant les principaux résultats obtenus et les perspectives de ce travail.

Chapitre I

FATIGUE THERMIQUE

I.1 Introduction

La fatigue thermique est le problème à l'origine de l'endommagement de nombreuses pièces et des structures industrielles. Lors de ce phénomène, la dégradation des pièces est due aux contraintes d'origine thermique qui se développent pendant l'alternance du chauffage puis du refroidissement qui correspondent généralement aux séquences de démarrage et d'arrêt d'un système ou lorsque la température varie au cours de son fonctionnement.

La fatigue thermique se produit fréquemment dans les structures qui supportent des variations de température et de contrainte, telles que les chambres de combustion des moteurs, les pièces des machines tournantes et les outils de mise en forme des matériaux (cylindres de laminoir, poinçons,...), lingotières, installations travaillant normalement à chaud et subissant des arrêts de fonctionnement (aubes de turbines,...etc.) [6].

I.2 Définitions

Nombreuses définitions ont été données par les chercheurs parmi elles :

D.SPORA [7] : « la fatigue thermique désigne la détérioration progressive, et éventuellement la fissuration des matériaux par l'alternance de l'échauffement et du refroidissement avec une dilatation thermique entièrement ou partiellement empêchée ».

S.MANSON [8] : « lors d'une variation rapide de la température, toute la pièce est portée à une température uniforme, puis elle est immergée brutalement dans un milieu à basse température ; lors de la fatigue thermique, il existe toujours un gradient de température entre la surface et les autres points internes de la pièce, cela est dû au temps de maintien à haute température relativement court.

La fatigue thermique est une caractéristique des matériaux ductiles (aciers, alliages de nickel,...). Elle se produit en général pour des régimes thermiques stationnaires et à des températures moyennement élevées, à $T/T_f \approx 0.5$, T_f étant la température de fusion du métal. Le choc thermique, qui est l'apparition de fissures au premier cycle thermique est une caractéristique des matériaux fragiles (fontes, céramiques,...). Un régime thermique transitoire et brutal est souvent associé à ce dernier cas et se produit même à des températures très basses [9].

I.3 Contraintes d'origine thermique

De nombreuses pièces d'un mécanisme utilisé à hautes températures sont soumises à des variations de température rapides en cours du fonctionnement. Le gradient thermique ainsi créé dans la pièce génère des contraintes thermiques. En effet, la dilatation libre d'un élément est limitée par la dilatation différentielle des éléments voisins qui se trouvent à des températures différentes. L'amplitude de ces contraintes d'origine thermique est en fonction du gradient thermique, la géométrie de la pièce, des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau et la conductivité thermique [8].

Mais des contraintes thermiques peuvent aussi apparaître sans qu'il y ait un gradient de température [8] si:

- ◆ Des forces extérieures empêchent la libre dilatation.
- ◆ La structure est faite de plusieurs matériaux ayant des coefficients de dilatation différents.
- ◆ Des hétérogénéités existent dans la microstructure du matériau.

La théorie élémentaire des contraintes thermiques est bien établie, et plusieurs textes ont été écrit à se sujet. Des solutions analytiques pour des problèmes de contraintes thermiques élastiques, dans une variété de géométrie ont été présentées dans la littérature. Par exemple :

- Les contraintes thermiques dans un cylindre élastique ou tube avec une distribution de température radiale [10] sont données par:

$$\sigma_r(r) = \frac{\alpha E}{(1-\nu)r^2} \left[\frac{r^2 - r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T r dr - \int_{r_i}^r T r dr \right] \quad (I.1)$$

$$\sigma_t(r) = \frac{\alpha E}{(1-\nu)r^2} \left[\frac{r^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_o} T r dr + \int_{r_i}^r T r dr - T r^2 \right] \quad (I.2)$$

Avec :

σ_r : la contrainte radiale (MPa).

σ_t : la contrainte tangentielle (MPa).

α : coefficient d'expansion linéaire thermique (K^{-1}).

E : module de Young (GPa).

ν : Coefficient de Poisson.

$T(r)$: température (K).

r : le rayon (mm).

r_i : le rayon intérieur du tube (mm).

r_o : le rayon extérieur du tube (mm).

- Si on empêche un barreau de se dilater, il apparaît une contrainte thermique de compression qui s'écrit:

$$\sigma_{th} = E.\varepsilon = E.\alpha.\Delta T \quad (1.3)$$

Avec :

ε_T : l'expansion thermique.

α : le coefficient linéaire de l'expansion thermique (K^{-1}).

ΔT : la variation de température causant l'expansion.

Les contraintes dues à un mouvement empêché se rencontrent dans le cas d'une pièce homogène bridée extérieurement et dans celui des pièces non homogènes dont les éléments constitutifs ont des coefficients de dilatation différents. C'est le cas de certains matériaux polycristallins dont le coefficient de dilatation est anisotrope (étain, zinc) ou des matériaux polyphasés dont les phases ont des coefficients de dilatation différents.

I.4 Mécanisme de la fatigue thermique

Le mécanisme de fatigue thermique est mis en évidence à l'aide du diagramme de NORTH COTT et BARON [11]. Celui-ci est uniquement basé sur l'alternance de l'échauffement et du refroidissement, et sur les gradients thermiques dus à la déformation thermique partiellement empêchée. La figure I.1 illustre le principe de ce mécanisme.

Le point O correspond à l'état de contrainte nulle. Lorsque la surface d'une pièce métallique est soumise à un échauffement, la température de la surface augmente localement. Cette différence de température est associée à une différence de dilatation thermique entre les couches successives de la pièce qui provoque un gradient de contrainte thermique compressive. Les contraintes thermiques peuvent être élastiques (branche OA) pour un échauffement faible, puis plastique pour un échauffement plus sévère (branche AB).

A la fin de la phase d'échauffement où la température de la pièce est plus ou moins homogène, le refroidissement provoque une contraction locale de la couche superficielle. Dans ce cas, une contrainte thermique de traction se développe rapidement. Celle-ci peut être élastique pour un refroidissement léger (branche BC), puis plastique pour un refroidissement plus sévère (branche CD).

Quand la déformation plastique se produit, des contraintes thermiques résiduelles de traction apparaissent au cours du refroidissement tandis que des contraintes thermiques résiduelles de compression apparaissent au cours de l'échauffement. Durant le cyclage thermique, ces contraintes se développent et deviennent très importantes. Notons que les fissures par fatigue thermique apparaissent durant l'étape de refroidissement à cause des contraintes thermiques résiduelles de traction qui y sont très importantes. En effet, la vitesse de refroidissement est très rapide que celle de l'échauffement, cela va engendrer des

gradients thermiques beaucoup plus importants au refroidissement, et par conséquent les contraintes résiduelles de traction se développent plus rapidement.

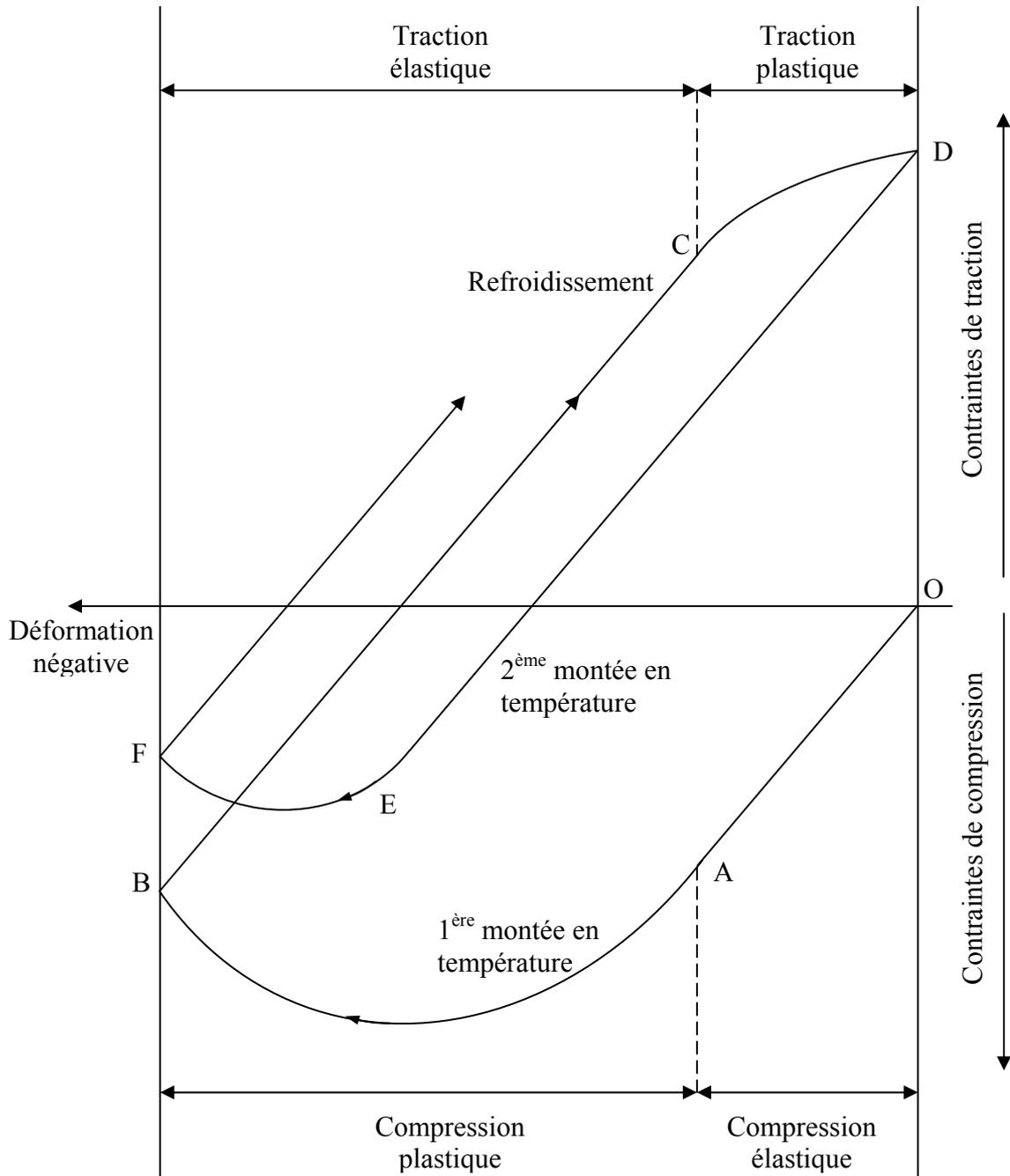


Figure I.1 : Mécanisme de la fatigue thermique, diagramme de NORTH COTT et BARON [11].

I.5 Contraintes thermiques résiduelles

En plus, des charges extérieures, des contraintes résiduelles thermiques ou mécaniques souvent existent dans un composant.

Il est bien connu que les contraintes thermiques résiduelles jouent un rôle crucial dans le comportement de croissance des fissures de fatigue. Ces contraintes peuvent être introduites par plusieurs processus de fabrication comme le soudage.

L'introduction de contraintes thermiques résiduelles compressives à la couche de surface résulte dans le prolongement considérable dans la durée de vie des composants industriels. Par contre, la présence de contraintes résiduelles de traction peut réduire la durée de vie des composants. Les contraintes thermiques résiduelles de traction accélèrent la vitesse de croissance des fissures de fatigue par l'augmentation de l'ouverture de la fissure [12-13].

Dans un matériau biphasés, les contraintes résiduelles microscopiques peuvent différencier l'inégalité de la limite de déformation plastique des deux phases [10].

Dans une microstructure orientée aléatoirement, les contraintes microscopiques des phases constituantes sont reliées à travers la condition d'équilibre suivante:

$$V_{\alpha}\sigma_{\mu\alpha} + V_{\gamma}\sigma_{\mu\gamma} = 0 \quad (1.4)$$

Avec :

V_{α} et V_{γ} : les fractions volumiques des phases α et γ respectivement.

$\sigma_{\mu\alpha}$ et $\sigma_{\mu\gamma}$: les microcontraintes dans les phases α et γ respectivement.

Dans le cas d'un acier inoxydable austénite-ferritique, quand la température s'élève, les contraintes dans la phase austénitique sont déplacées vers la compression et celles dans la phase ferritique vers la traction, dû à la grande expansion thermique de la phase austénitique. Durant le refroidissement, les contraintes sont inversées ce qui a été démontré par la mesure des contraintes résiduelles par rayons X et par la simulation numérique. Les contraintes thermiques microscopiques sont très dépendant de la microstructure locale, c'est-à-dire la morphologie de la phase locale [10].

I.6 Fissuration d'origine thermique

Traditionnellement, la fissure est divisée en trois phases : amorçage, croissance, propagation et finalement la rupture.

L'évaluation de la vitesse de croissance des fissures dans les conditions de fatigue thermique et les prédictions des durées de vie sont très importantes pour déterminer les périodes d'investigations et les programmes de maintenance.

I.6.1 Amorçage

L'amorçage est défini comme l'apparition d'au moins d'une fissure détectable à la loupe binoculaire, c'est-à-dire, d'une longueur en surface de 100 à 150 μm [14].

Plusieurs paramètres peuvent favoriser l'amorçage des fissures lors de la fatigue thermique. L'amorçage typique des fissures prend place dans les hétérogénéités du matériau. Cela peut être par exemple : les bandes de glissement causées par les sollicitations cycliques, les irrégularités superficielles, les joints de grains ou les inclusions.

Il existe deux mécanismes d'amorçage de fissure en fatigue thermique, l'amorçage sous contrainte thermique cyclique, semblable à l'amorçage sous contrainte mécanique cyclique et l'amorçage par la fragmentation cellulaire de la couche d'oxyde. Ce dernier est basé sur la dégradation physico-chimique des matériaux [6,11].

I.6.1.1 Amorçage sous contrainte thermique cyclique

La surface d'une pièce métallique, sollicitée localement par des échauffements et des refroidissements, subit un cyclage du type compression-traction dû à la nature cyclique des contraintes thermiques. Celles-ci peuvent être voisines ou supérieures à la limite d'élasticité.

Dans certains grains et après un certain nombre de cycles, des bandes de glissement se manifestent comme des irrégularités (intrusions et extrusions) sur la surface sollicitée. La figure I.2, indique le mécanisme principal de formation des irrégularités superficielles.

Par ailleurs, les extrusions finissent par être écrasées et ne se développent plus. Quant aux intrusions, elles peuvent être, considérées comme des microfissures. Elles représentent des sites préférentiels, d'une part pour l'action du milieu corrosif, et d'autre part pour la concentration des contraintes [6,11].

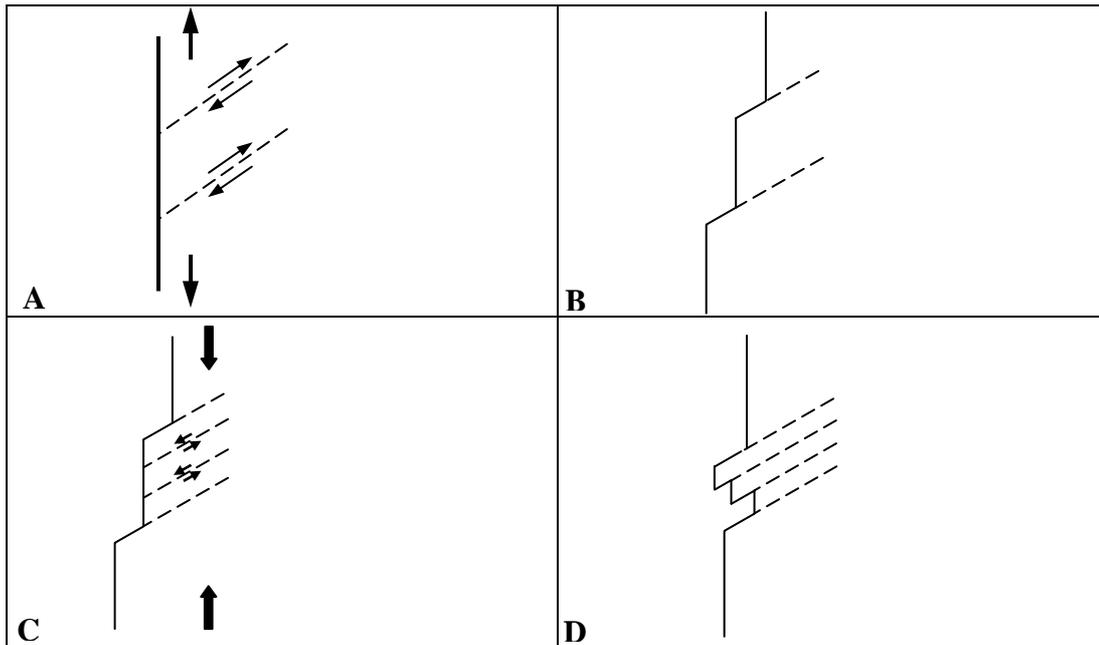


Figure 1.2 : Mécanisme d'amorçage des fissures sous contrainte thermique cyclique [11].

I.6.1.2 Amorçage par la fragmentation cellulaire de la couche d'oxyde

Ce mécanisme est essentiellement basé sur la différence entre les propriétés physiques de la couche d'oxyde et le matériau sous-jacent, notamment le coefficient de dilatation thermique. La couche d'oxyde se fissure alors sous l'effet des contraintes thermiques et favorise par corrosion locale l'initiation de la fissure de fatigue thermique dans le métal lui-même.

En plus, la densité des fissures et leur amorçage dépendent de la sensibilité relative à l'oxydation. Dans beaucoup d'applications à haute température, l'oxydation est de première importance. Le matériau est ainsi particulièrement susceptible à l'oxydation surtout si le métal est exposé à haute température pendant une longue période.

Généralement, l'oxydation tendra à se localiser préférentiellement aux joints de grains, aux joints de macles et dans les bandes de glissement. Les résultats expérimentaux ont montré que les fissures se sont initiées rapidement à cause de la formation d'oxydes et parce que la plupart des fissures de fatigue sont remplies d'oxydes [15].

I.6.2 Propagation

Les premières fissures apparues commencent à se propager, tandis que de nouvelles apparaissent. Puis, le réseau commence à se former par coalescence des fissures existantes. Il y a alors formation de cellules à l'intérieur desquelles l'apparition de nouvelles fissures n'est plus possible. Enfin, dans une dernière phase, le réseau ne semble plus évoluer de façon significative en surface où les fissures périphériques se propagent encore plus et il est complètement constitué.

Ce dernier continue cependant à se propager, mais uniquement en profondeur, et non plus en surface. Cette propagation en profondeur se traduit par l'ouverture de plus en plus grande des fissures principales du réseau, signe d'un état biaxial de contraintes de traction [6,14]. La croissance des fissures dépend du matériau, de l'environnement et de la sollicitation.

Le mode de propagation peut-être intergranulaire ou transgranulaire. Dans l'un ou l'autre, les fissures d'origine thermique privilégient la propagation à travers les phases durcissantes qui s'agglomèrent aux joints de grains, d'où la prépondérance de l'aspect intergranulaire [11].

I.7 Facteurs de la fatigue thermique

On peut classer les facteurs de la fatigue thermique en deux types [6,11]:

- ☞ **Facteurs intrinsèques** : propres au matériau telles que les caractéristiques physiques, métallurgiques, mécaniques et géométriques.
- ☞ **Facteurs extrinsèques** : nature du cyclage thermique et l'environnement.

I.7.1 Nature du cyclage thermique

Les paramètres d'un cyclage thermique sont :

- La température maximale : T_{\max}
- La température minimale : T_{\min}
- La température moyenne : $T_{\text{moy}} = (T_{\max} + T_{\min})/2$
- Le différentiel thermique : $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$
- La vitesse de variation de la température
- Le temps de maintien

Les paramètres ΔT et T_{moy} sont les facteurs principaux à prendre en considération dans les études de fatigue thermique. Le premier indique la sévérité du cyclage et le second indique le niveau auquel le cyclage est stationnaire.

L'augmentation du différentiel thermique engendre une augmentation des contraintes thermiques et l'augmentation de la température moyenne influe directement sur les caractéristiques mécaniques du matériau. Ceci provoque un endommagement rapide du matériau et réduit sa durée de vie [11].

Sur des éprouvettes maintenues longtemps à haute température, les effets du fluage ainsi que des effets métallurgiques dépendant du temps se font sentir. Des expériences menées sur l'acier inoxydable de type 347 montrent que le nombre de cycles à rupture diminuait quand le temps de maintien à haute température augmentait. Toutefois, il y a

dispersion considérable dans les résultats et l'interprétation est difficile parce que plusieurs facteurs sont affectés par l'augmentation des temps de maintien. En particulier, les temps de maintien très lents, qui reflètent beaucoup la réalité de travail des pièces et, donc, des effets métallurgiques que cela entraîne [9].

I.7.2 Facteur d'environnements

La croissance des fissures par fatigue tend à accélérer dans les environnements agressifs. Pour les tests de fatigue conduits à l'air libre, on a constaté des vitesses élevées de croissance des fissures que les tests dans le vide. Selon le milieu on peut avoir de la fatigue-corrosion ou bien de la fatigue corrosion sous contrainte [10].

I.7.3 Facteurs thermiques

Les grandeurs thermiques sont d'une grande importance pour le choix des matériaux confrontés aux problèmes de la fatigue thermique, parmi ces grandeurs [11] :

- **La conductivité thermique K** : à un accroissement de la conductivité thermique, correspond alors une diminution des gradients thermiques générés et donc des contraintes induites aussi.
- **Le coefficient de dilatation thermique α** : ce paramètre est important puisque les contraintes thermiques lui sont proportionnelles.

Un coefficient de dilatation élevé, engendre la réduction de la durée de vie du matériau, car plus la dilatation est importante et plus la résistance est réduite.

I.7.4 Facteurs géométriques

Les grandes dimensions d'une pièce provoquent des localisations thermiques considérables, des gradients thermiques importants entre la couche superficielle et les couches plus profondes, la présence d'entailles, d'angles vifs ou de fissure qui engendrent la concentration de contraintes thermiques. Comme conséquence, on aura une diminution de l'endurance du matériau [6,16].

I.7.5 Facteurs métallurgiques

La structure métallurgique est d'une grande importance pour la tenue à la fatigue, car elle présente des sites préférentiels pour l'amorçage et la croissance des fissures. L'existence de ces sites est due à la grande fragilité des particules de seconde phase et à la création localement des niveaux de contraintes élevés [9]. Ces sites dépendent de la nature des phases, leurs proportions et leurs distributions.

L'influence des joints de grains comme sites préférentiels d'oxydations n'est pas négligeable aussi. Ceci a pour conséquence, la création d'entailles d'oxydes conduisant à des concentrations de contraintes qui favorisent par la suite l'amorçage des fissures.

I.7.6 Facteurs mécaniques

La résistance à la fatigue thermique augmente si on arrive à réduire l'amplitude de la déformation plastique induite au cours du cyclage thermique. Ceci s'obtient par un choix d'un matériau ayant une limite d'écoulement élevée à toutes températures du cyclage thermique. Pour les grandes valeurs de déformations thermiques, le comportement d'un matériau est dominé par la ductilité à la température de service, tandis que pour les faibles déformations, la résistance mécanique se montre plus importante. Ainsi, la résistance à la fatigue thermique est améliorée si la ductilité peut être augmentée sans diminuer la résistance. La nature antagoniste de ces deux comportements incite donc à un compromis pour une bonne tenue à la fatigue [9].

I.8 Conclusion

Le cyclage thermique d'un élément crée un champ de contraintes et de déformation qui évolue progressivement jusqu'à un état critique à partir duquel on assiste à l'apparition de microfissures qui se propagent et pouvant provoquer la décohésion totale de l'élément.

Chapitre II

***TRAITEMENTS DE SURFACE
ET PROJECTION THERMIQUE***

Dans ce chapitre, nous tâcherons de donner un aperçu sur les traitements de surface par projection thermique, son principe général de fonctionnement, les différents équipements et procédés utilisés ainsi que les domaines d'utilisation.

Nous donnerons un aperçu sur les différents dépôts pouvant être obtenus, leur formation et leur structure en plus de quelques caractéristiques générales (adhérence, dureté, matériaux projetables et gaz de projection...)

Le but des traitements de surface est fort variable: ils peuvent tendre à améliorer les propriétés optiques (ou l'aspect esthétique), la résistance à la corrosion sèche ou humide, la tenue de surface soudée, les conductivités, les propriétés mécaniques, la résistance au frottement et à l'usure [17].

II.1 DIFFERENTS TRAITEMENTS DE SURFACE

On entend par traitement de surface toutes les opérations mécaniques, chimiques, électrochimiques ou physiques qui ont pour conséquence de modifier l'aspect ou la structure de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données [18].

Les techniques de traitement de surface se répartissent en quatre grandes familles comme montre le tableau II.1:

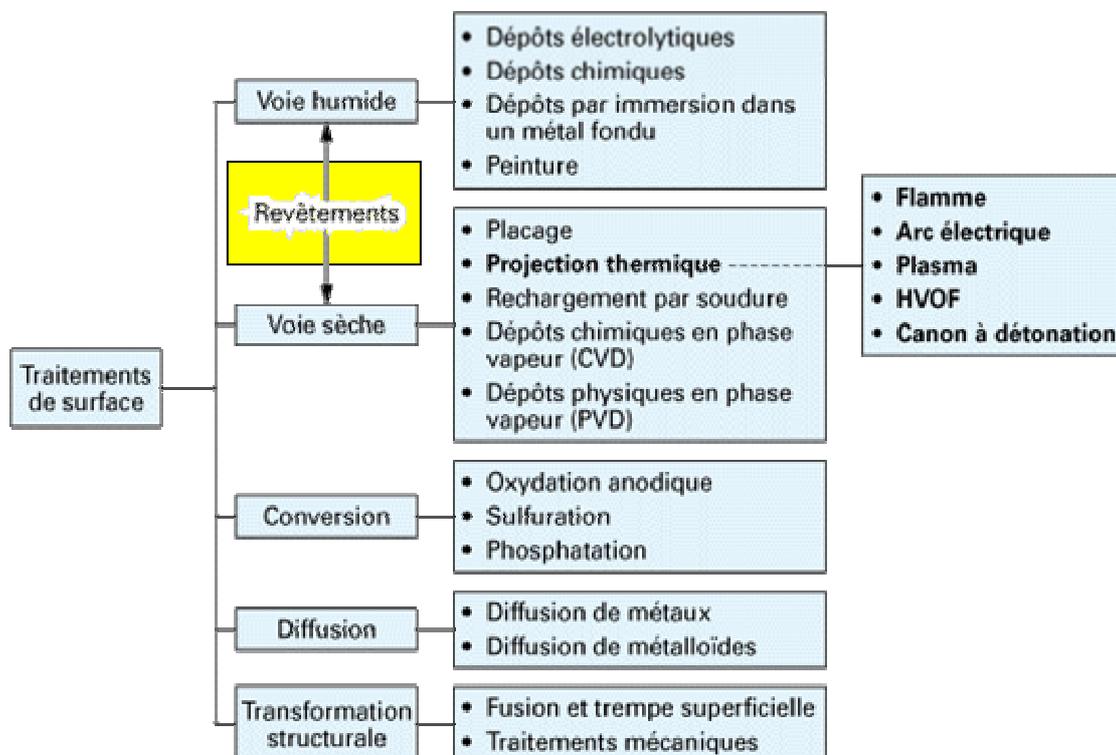


Tableau II-1 : Principales techniques utilisées en traitement de surface [18].

Le choix d'un procédé est directement issu d'un certain nombre de facteurs, parmi lesquels on peut citer [19-21]:

- 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.

Le tableau II-2 donne les propriétés et caractéristiques des revêtements.

Type de dépôt		Principe	Liaison	Épaisseur (mm)	Porosité moyenne (%)	Interaction avec le substrat
Projection thermique	Flamme	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,05 à 2	5 à 15	Non
	Arc électrique	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,5 à 3	5 à 15	Non
	Plasma	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,1 à 1	2 à 10	Non
	HVOF	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,1 à 1	< 3	Non
	Canon à détonation	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,1 à 1	< 3	Non
	Projection avec refusion	Refusion sur support après projection	Mécanique + diffusion	0,5 à 1,5	< 2	Diffusion

Tableau II-2 : Propriétés des principaux types de rechargement [18].

II.2 PROJECTION THERMIQUE

C'est après la Seconde Guerre mondiale que le domaine d'application de la projection thermique s'est élargi à l'industrie mécanique (apport de revêtement d'acier dans le cadre de la rénovation de pièces usagées), puis à l'industrie aéronautique [18].

Depuis l'invention d'origine de SCHOOP du chalumeau oxyacétylénique en 1909, de nombreuses évolutions ont permis une diversification et un large accroissement des potentialités de la technique. La recherche de propriétés de surface spécifiques sur les pièces en service, dont les conditions d'emploi sont de plus en plus sévères, a permis le développement de nouveaux procédés [plasma, HVOF High Velocity Oxygene Fuel...] et de nouveaux matériaux associés (céramiques, carbures, composites, superalliages...)[18].

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

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

Les revêtements par projection thermique sont appliqués à un substrat pour donner à une surface spécifique une qualité qu'elle n'a pas à l'origine. Ainsi, la résistance apparente d'une pièce est garantie par le substrat, et le revêtement offre des qualités de surface supérieures telles que la résistance à la corrosion, à l'usure ou à la chaleur [18-19].

Si la protection anticorrosion reste le cas d'application le plus fréquent, certains secteurs comme l'automobile présentent des applications multiples, parmi lesquelles on peut citer à titre d'exemples : soupapes, segments de piston, anneaux de synchro, disques d'embrayage, sondes lambda, cylindres, pompes, platines d'alternateurs, plaquettes de freins... [18-22].

II.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le matériau d'apport solide sous forme de poudre ou de fil est porté à l'état liquide ou pâteux au moyen d'une source de chaleur appropriée (flamme ou arc) (fig.II.1). Il est pulvérisé sous forme de gouttelettes au moyen d'un courant gazeux. Ce courant gazeux peut être constitué soit par un gaz auxiliaire qui est généralement de l'air, parfois de l'argon ou de l'azote, mélangé aux gaz provenant de la combustion (flamme oxy-gaz) ou de l'ionisation des gaz de ceux-ci (plasma d'arc).

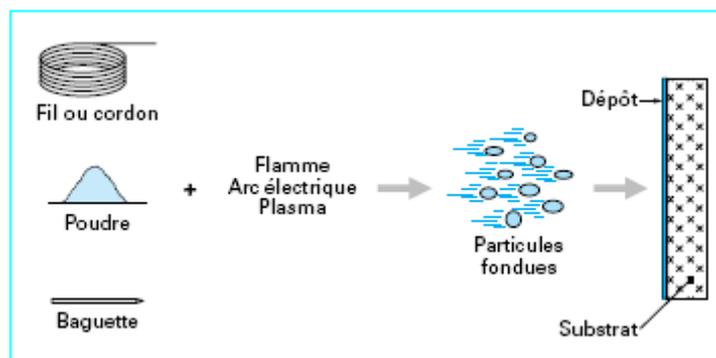


Figure II.1 : Principe fondamental de la projection thermique [18].

Les particules provenant de la pulvérisation sont véhiculées à grande vitesse [20]:

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

Les particules vont s'écraser sur le support placé à une distance convenable. Au moment de l'impact sur le substrat les particules se présentent à l'état pâteux, au moins en périphérie.

Les particules fondues doivent être à une vitesse assez grande pour qu'elles puissent s'étaler sur le substrat et y former un dépôt par empilements successifs (fig. II.2); la source d'énergie doit donc être suffisamment puissante pour fournir l'énergie nécessaire à la fusion rapide du matériau (transfert thermique) et délivrer un jet gazeux susceptible de véhiculer les particules (transfert cinétique) [19].

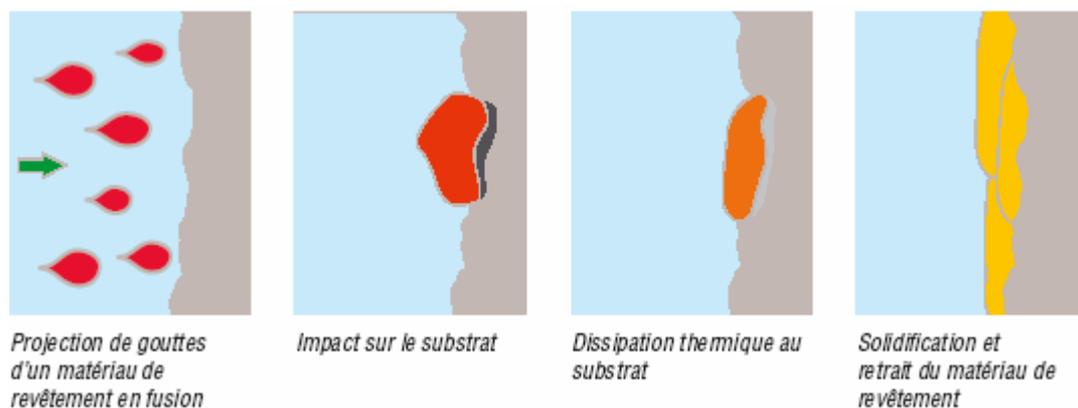


Figure II.2 : Principe de formation des couches [22].

Deux sources d'énergie sont employées pour déposer les matériaux suivant la technique de projection thermique : *la flamme ou le courant électrique*.

La grande variété des matériaux projetables confère à la projection thermique un large domaine d'utilisation ; que ce soit l'amélioration des propriétés mécaniques des surfaces, la résolution des problèmes de corrosion, d'isolation ou de conduction qu'elle soit électrique ou thermique.

Dans la plupart des cas, le revêtement assure plusieurs fonctions à la fois. Par exemple, une bonne résistance au frottement devra être associée à une bonne conductibilité thermique ou une bonne résistance à la corrosion.

II.2.2 TYPES DE PROJECTION THERMIQUE

II.2.2.1 Projection thermique à la flamme

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de projection flamme. La température d'une flamme varie de 2800 °C (oxypropane) à 3150 °C (oxyacétylène). Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2 800 °C et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme.

Le matériau de revêtement est soit un fil, soit une poudre qui est passée dans une flamme au gaz d'oxygène-fuel. Les particules en fusion et atomisées sont éjectées dans un jet dirigé par la buse d'un pistolet de projection. En raison de la vitesse relativement basse des particules, l'exposition à l'oxygène est augmentée et donc le contenu en oxydes de ces revêtements est relativement élevé ; l'adhésion et la densité sont modérées (une fusion subséquente pour augmenter la densité est possible).

Les matériaux revêtus à la flamme sont utilisés pour une protection contre la corrosion et/ou pour la protection contre l'usure des structures et composants, un renforcement de la surface et la réparation des axes usés pour le revêtement des petites pièces et des joints [22].

A. Projection flamme-poudre

☞ Torches à gaz :

Ces torches sont des chalumeaux oxy-gaz équipées d'un récipient contenant la poudre. Celle-ci tombe par gravité et est entraînée par les 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.

Ces chalumeaux sont peu onéreux et sont très appréciés pour leur facilité d'emploi. Ils restent un outil privilégié des services maintenance et des petites entreprises pour résoudre des problèmes de rattrapage de côtes, d'abrasion ou de corrosion par exemple.

Les matériaux d'apport sont des alliages dits « autofusibles » à base Ni ou Co (alliés à des éléments tels que Cr, B, Si) et chargés éventuellement en carbures [18].

☞ Pistolets flamme-poudre (fig. II.3):

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

Les pistolets flamme-poudre sont de deux types :

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

La vitesse des particules projetées est faible (**30 m/s**) et la distance entre buse et substrat est comprise entre **100** et **200 mm** (afin que la poudre ait un temps de séjour suffisamment long pour être fondue). Ce procédé permet des dépôts de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ **2 à 3 kg/h**, sans échauffement important du substrat.

Les matériaux les plus utilisés restent les alliages autofusibles, la refusion après projection permettant d'améliorer l'adhérence et de diminuer la porosité. La projection d'aciers, d'alliages à bas point de fusion, de céramiques ou de polymères est également possible. Ce matériel est plus répandu que le précédent, et reste d'un coût très abordable. Il

est apprécié pour son niveau sonore faible et est utilisé dans tout type d'industrie pour des applications telles que l'isolation thermique ou électrique, usure, corrosion sur pièces neuves ou usagées [18].

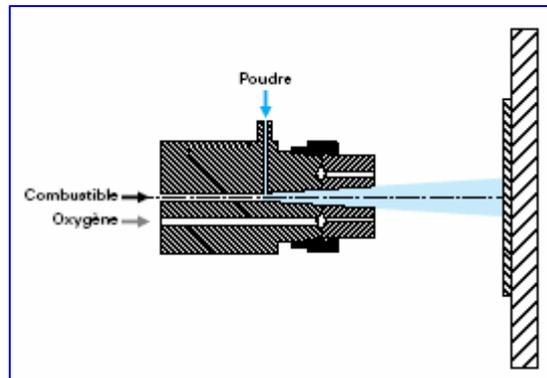


Figure II-3 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre [18].

B. Projection flamme-fil

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme ne sert en projection flamme-fil qu'à faire 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.

Les pistolets de projection flamme-fil se composent de deux parties (fig.II.4):

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

La vitesse des particules est d'environ 150 m/s et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres, à des taux horaires très variables suivant les matériaux, les diamètres de fil utilisés et les propriétés de dépôts recherchées : de 1 kg/h, pour certaines céramiques préparées sous forme de cordon souple ou de baguette, à plus de 30 kg/h pour des fils anticorrosion tels que le zinc.

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

- Métaux : Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo, aciers ordinaires, aciers inoxydables ;
- Alliages de base Zn, Cu, Ni ou Sn ;
- Céramiques sous forme de cordon ou de baguette : NiAl, NiCrBSi, $Al_2O_3-TiO_2$, Cr_2O_3 , ZrO_2-CaO .

La grande diversité des produits d'apport permet son utilisation dans tous les domaines industriels : automobile, aéronautique, infrastructure, sidérurgie, fonderie, papeterie, etc.

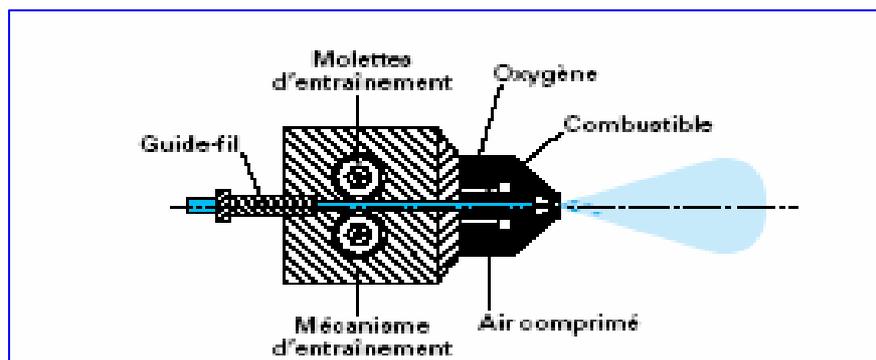


Figure II-4 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [18].

C. 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.

Les alliages utilisés pour ces dépôts sont des alliages dits «autofusibles», généralement des alliages à base Ni ou Co contenant des éléments d'addition tels que B (> 1 %), Si (2 à 5 %), Cr (10 à 20 %), et pouvant être chargés en carbures (jusqu'à 70 %).

Les matériels utilisés sont les *torches à gaz* avec lesquelles les opérations de projection et de refusion sont réalisées simultanément, ou les *pistolets flamme-poudre* ou *flamme-fil*. La refusion est alors réalisée soit à l'aide d'une torche oxyacétylénique ou oxypropane, soit à l'aide d'un dispositif à induction.

La mise en œuvre de ce procédé est relativement simple, mais nécessite de prendre un certain nombre de précautions [18]:

- Veiller à ce que l'écart solidus/liquidus des matériaux d'apport soit suffisant (au moins 30°C), afin de permettre une refusion régulière de la surface traitée (c'est-à-dire sans que le métal coule) ;
- Veiller à ce que la température de fusion du matériau d'apport soit inférieure à celle du substrat ;
- Respecter les règles classiques du soudage du matériau de base, en particulier en ce qui concerne la température de préchauffage afin d'éviter la fissuration en réduisant l'effet de trempe ;
- Veiller à contrôler la vitesse de refroidissement pour, d'une part, éviter la fissuration du métal d'apport eu égard à son coefficient de dilatation différent de celui du métal de base et, d'autre part, réduire les tensions internes.

II.2.2.2 Projection à arc électrique entre deux fils

Le principe consiste à créer un arc entre deux fils métalliques agissant en tant que

deux électrodes. Un jet d'air comprimé, situé dans l'axe du point de création de l'arc, propulse le métal fondu sur le substrat (FigII.5).

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

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

Les propriétés des dépôts obtenus sont meilleures que pour la projection à la flamme, en raison d'une vitesse de particule plus élevée [22].

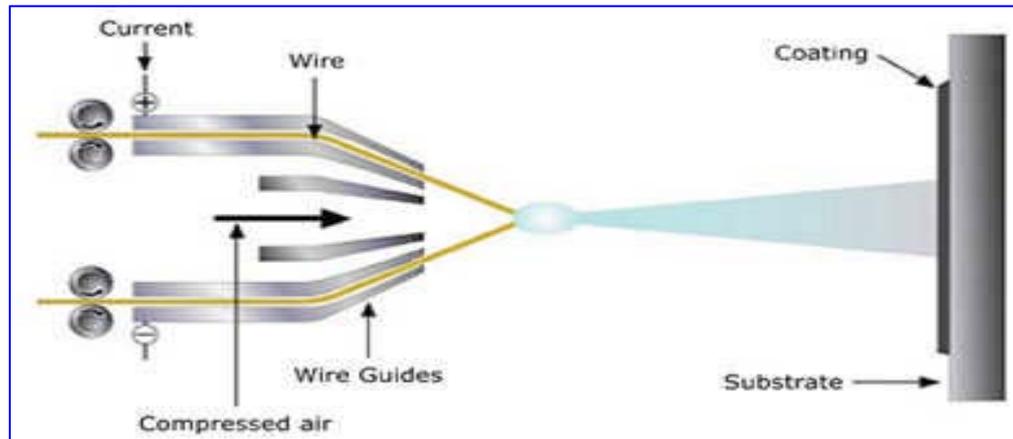


Figure II.5: Principe de la projection à arc électrique entre deux fils [22].

Les caractéristiques des dépôts sont les suivantes [18]:

- Porosité de 5 à 10% ;
- Epaisseur 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.

II.2.2.3 Projection Plasma

Le plasma est considéré comme le 4e état de la matière.



C'est un gaz ionisé constitué de molécules, d'atomes, d'ions et d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre. Un plasma Ar/H₂ sera ainsi constitué des espèces suivantes : Ar, H, H⁺, Ar⁺, e⁻.

Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont :

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

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

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

La projection de plasma est la méthode la plus commune de revêtement par projection thermique, et est appliquée comme projection plasma air (**Air Plasma Spraying (APS)**) ou comme projection sous atmosphère contrôlée [23].

Un arc électrique se forme entre une cathode et la buse concentrique du pistolet pulvérisateur (fig.II.6). Un mélange de gaz et de flux élevé le long de l'électrode est ionisé par l'arc, et forme le plasma. Ce jet de plasma est projeté hors de la buse, où la poudre du matériau de revêtement est injectée dans le jet de plasma. La chaleur et la vitesse du jet de plasma fait fondre rapidement et fait accélérer les particules pour les conduire sur le substrat et former un revêtement. Les revêtements par jet de plasma ont une structure plus dense que les revêtements projetés à la flamme [22].

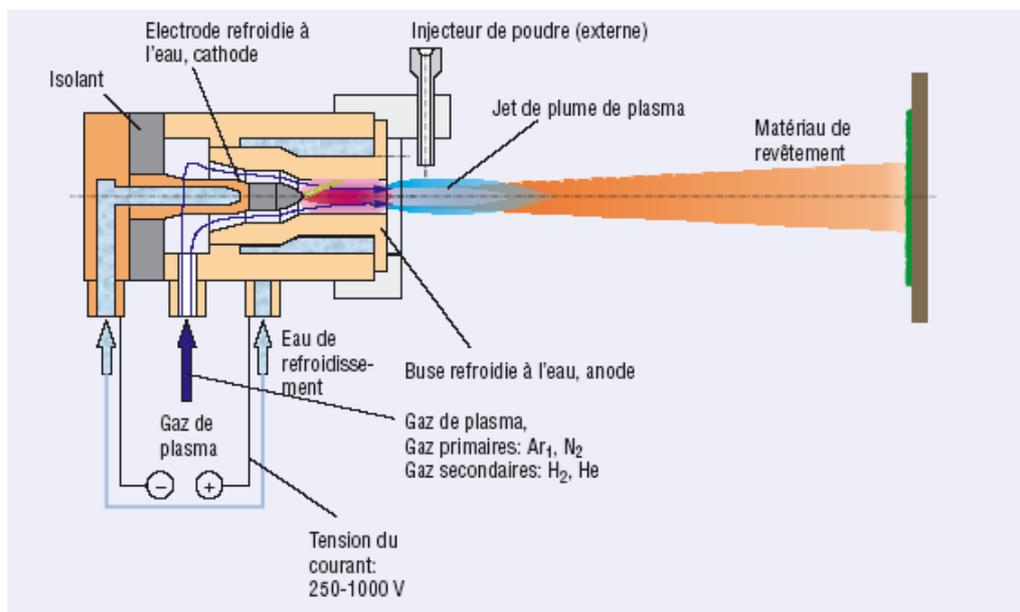


Figure II.6: Principe de fonctionnement d'une torche plasma [22].

La projection plasma comporte l'avantage de pouvoir être utilisée sur les matériaux avec des points de fusion élevés tels que la céramique ou les métaux réfractaires. Il s'agit d'une méthode de projection polyvalente pour des revêtements de haute qualité et utilisés pour un vaste choix d'applications y compris les revêtements sur les surfaces de traction, les revêtements pour barrière thermique sur les chambres à combustion, les turbines, les vannes et les pales. Aussi, les revêtements biocompatibles d'hydroxylapatite pour les implants et les revêtements de céramique sur les rouleaux d'imprimerie [18,24-25].

Les principales caractéristiques des différents procédés de projection thermique sont regroupées dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Principales caractéristiques des différents procédés de projection thermique [18].

Caractéristiques	Projection flamme-poudre	Projection flamme-fil	Arc électrique	Plasma	HVOF	Canon à détonation
Source de chaleur	flamme oxyacétylénique	flamme oxyacétylénique	arc électrique	plasma	flamme oxyacétylénique	flamme oxyacétylénique
Température de flamme (° C)	3 000	3 000	6 000	12 000	3 000	3 000
Transport des particules	gaz flamme	air comprimé	air comprimé	gaz plasma (Ar/H)	gaz flamme	gaz flamme
Vitesse des particules (m/s)	40	150	250	200	700	950
Forme du produit d'apport	poudre	fil-cordon	fil	poudre	poudre	poudre
Taux horaire de dépôt (kg/h)	1 à 3	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement moyen (1) (%)	50	70	80	70	70	70
Force d'adhérence (MPa)	20 à 40	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Taux de porosité (%)	10 à 20	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0,5 à 2	0,5 à 2
Épaisseur déposée (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,2 à 3	0,05 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1
Exemples de matériaux d'apport	<ul style="list-style-type: none"> • métaux • céramiques • carbures dans matrice métallique 	<ul style="list-style-type: none"> • métaux • céramiques • carbures dans matrice métallique 	<ul style="list-style-type: none"> • métaux 	<ul style="list-style-type: none"> • métaux • céramiques • carbures 	<ul style="list-style-type: none"> • métaux • carbures 	<ul style="list-style-type: none"> • carbures • céramiques

(1) Pourcentage de poudre projetée qui adhère au matériau.

II.2.3 CARACTERISTIQUES GENERALES DES DEPOTS

➤ Structure métallurgique

Les dépôts sont généralement stratifiés, s'ils ne sont pas traités à posteriori. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1% à 25% suivant les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules non fondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur)

En raison de la très grande vitesse de refroidissement des particules au contact du substrat, leur structure métallurgique est du type trempée, généralement à phase unique. Ceci permet d'expliquer que la structure d'origine du matériau peut se trouver modifiée après dépôt. A titre d'exemple, on peut citer le cas de l'alumine, projetée sous forme alpha et qui se retrouve sous forme gamma dans le dépôt. Une autre conséquence de ces cycles thermiques sévères est la présence possible de microfissures intragranulaires à l'intérieur des dépôts [18].

➤ Méthodes non-destructrice et destructrice de caractérisation des revêtements

En dépit des progrès considérables réalisés ces dernières années, les méthodes non destructrices de caractérisation des revêtements, ne sont toujours pas en mesure d'offrir une description suffisamment précise d'un système multicouches. Ce manque de précision ne s'applique pas uniquement aux mesures d'épaisseur du revêtement, mais aussi aux examens de morphologie de la couche (porosité, inclusion d'oxydes, structure de l'interface, etc.). A cause de ces limites, il semble probable que les méthodes destructrices habituellement employées pour une caractérisation des revêtements continueront de jouer un rôle important dans la qualification de processus et le contrôle qualité dans un avenir proche. Des informations précises sur les profils d'épaisseur de revêtements et leurs propriétés morphologiques sont grandement recherchées, particulièrement lors de l'évaluation d'un nouveau processus de revêtement ou lorsque les paramètres de processus ont changé. Cependant, des données d'une précision suffisante ne sont pas facilement obtenues par les techniques non destructrices [18].

Enfin, lors des projections réalisées dans l'air, les particules et le substrat sont soumis au phénomène d'oxydation (fig.II.7). Il n'est ainsi pas rare de constater une augmentation du taux d'oxygène pendant la projection : par exemple, le tungstène projeté par plasma atmosphérique à partir de poudre contenant 200 ppm d'oxygène voit ce taux passer à 5000 ppm dans le dépôt [18,22].

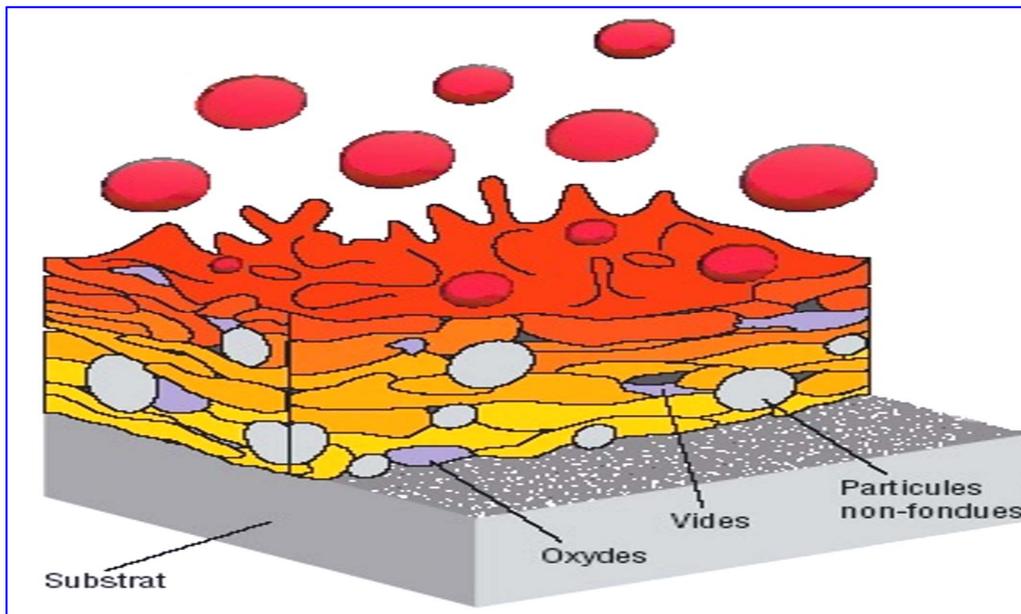


Figure II.7 : schéma représentant la coupe d'un dépôt projeté [22].

➤ Adhérence

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

Les mécanismes influençant l'adhérence et l'édification du revêtement sont [24]:

- Propreté et étendue de la surface à revêtir ;
- Rugosité ou topographie ;
- Température de projection et du substrat ;
- Temps (réaction, refroidissement) ;
- Vitesse de projection (énergie cinétique) ;
- Propriétés et réactions physico-chimiques des matériaux utilisés.

Chapitre III

MULTIMATERIAUX

Pour satisfaire aux besoins industriels avec des matériaux dont la surface présente des propriétés particulières, telles que la résistance à la fatigue, à l'usure et la corrosion à température ambiante et aux hautes températures, les industries vont s'orienter vers les différentes techniques de protection par traitements de surface, en utilisant autres matériaux qui peuvent intervenir comme un élément protecteur contre l'agressivité du milieu.

Ces traitements donnent naissance à des matériaux appelés multimatériaux. Cette famille, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau de base à l'échelle technique et même 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 sont situés à l'interface [13].

Plusieurs travaux [26-27] ont été effectués à ce propos pour minimiser le maximum de ces problèmes en utilisant des sous-couches d'accrochages.

III.1 Les 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 [28].

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

a- 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) [28].

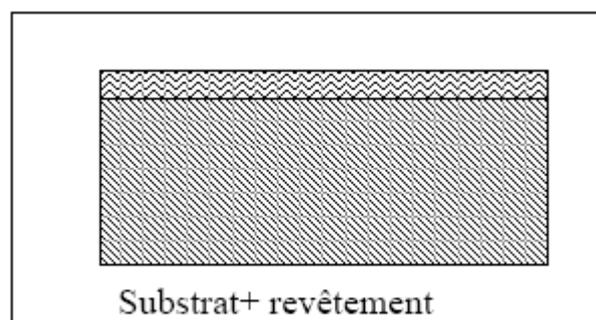


Figure III.1 : Revêtement monocouche [28].

b- Les revêtements bicouches

Appelés « duplexes », constitués d'un revêtement assurant la protection vis-à-vis du milieu externe, associé à une sous couche d'accrochage (fig. III.2) qui peut jouer d'une part le rôle de barrière chimique et d'autre part d'accommoder les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux [28].

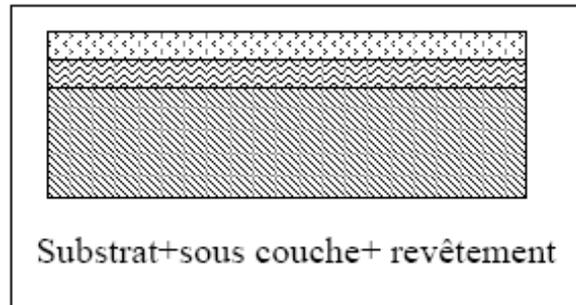


Figure III.2 : Revêtement bicouche [28].

c- 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) [28].

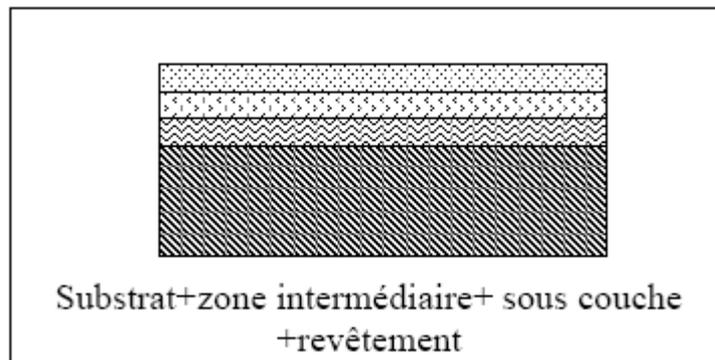


Figure III.3 : Revêtement multicouche[28].

III.2 Les propriétés 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.2.1 Adhérence et Adhésion

L'adhésion représente tous les phénomènes microscopiques liant deux corps et l'adhérence en est la mesure [29].

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

γ_{DS} l'énergie d'interface.

III.2.1.1 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 [30].

L'étalement de particules liquides sur un substrat est souvent employé, mettant en oeuvre des phénomènes de *mouillage* [31].

➤ 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 [31-32]. 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 : γ_L l'énergie libre de surface du liquide.

Le mouillage total, réalisé pour $\theta = 0$, correspond donc au maximum du travail d'adhésion. D'autre part, le mouillage peut être accompagné de transferts de masse à l'interface [31]. L'étalement du liquide peut, en effet, être contrôlé par de la diffusion superficielle.

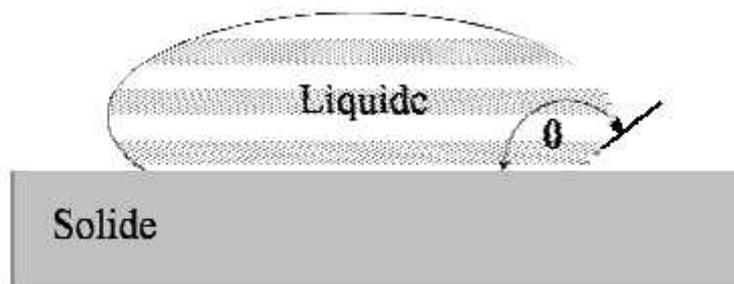


Figure II.4 Goutte de liquide sur un solide et définition de l'angle de mouillage [31].

➤ 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 [33]. La formation de phases intermédiaires fragiles aux interfaces peut conduire à une mauvaise adhérence des revêtements [33-34] ou au contraire l'améliorer [35].

➤ 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 [36-38].

L'adhérence par ancrage mécanique peut résulter plus précisément de l'accroissement de l'énergie mécanique dû à la déviation de la rupture sur les irrégularités de l'interface au cours de l'essai d'adhérence.

Dans le cas de revêtements obtenus par projection, l'ancrage mécanique peut également résulter de la contraction des particules lors de leur refroidissement (figure III.5.b).

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

La meilleure adhérence des dépôts réalisés sur des substrats rugueux peut également être issue d'une augmentation de l'aire de contact qui permet de multiplier le nombre de sites favorables à la formation de liaisons [39-40].

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.

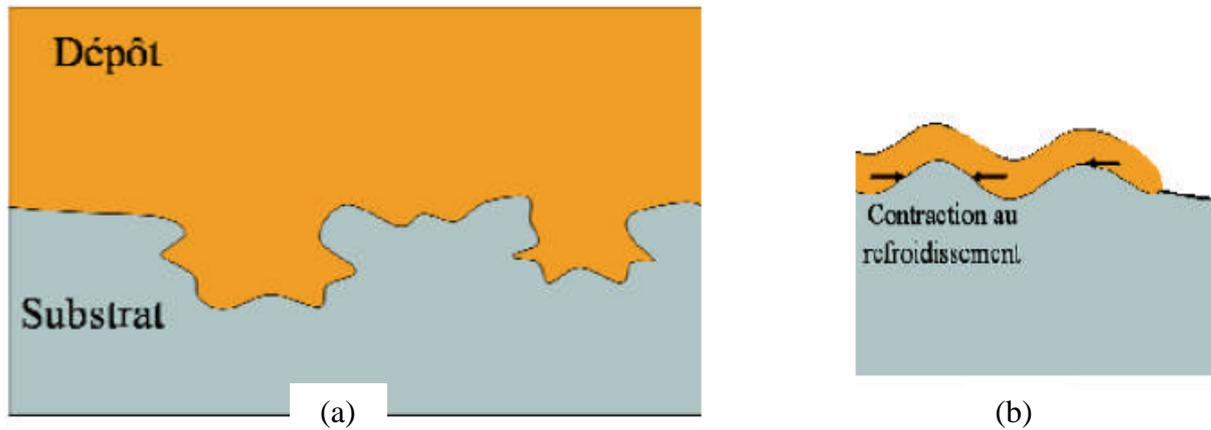


Figure III.5 : Illustration de l'accrochage mécanique [37].

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

➤ **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 ($<0,5 \text{ nm}$) [40].

III.2.1.2 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 [41] :

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

III.2.2 Les contraintes résiduelles

III.2.2.1 Définition

Les contraintes résiduelles sont des contraintes multiaxiales statiques qui existent dans un système isolé macroscopique soumis à aucune force ni moment extérieur et qui se trouvent en équilibre mécanique. Les causes de leur naissance sont les procédés de fabrication et de finition de telle façon, que toute déformation non uniforme génère des contraintes résiduelles à toute échelle de la structure. Ces déformations proviennent sous l'effet thermique, métallurgique et mécanique (grenailage...). Ces différents traitements introduisent à la surface des pièces des contraintes résiduelles néfastes qui vont à leur tour augmenter les contraintes de service [42], et conduisent donc à une mauvaise tenue à la fatigue.

III.2.2.2 Différentes échelles de contraintes internes

On distingue trois niveaux de contraintes internes lorsque l'on se déplace de l'échelle du réseau à l'échelle macroscopique [42-43].

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

Elles proviennent d'une répartition non statique des contraintes internes du deuxième ordre. Cette hétérogénéité est engendrée par l'existence, dans le volume de matière considéré, d'un gradient de déformation dont l'origine peut être : chimique, physico-chimique, thermique ou mécanique.

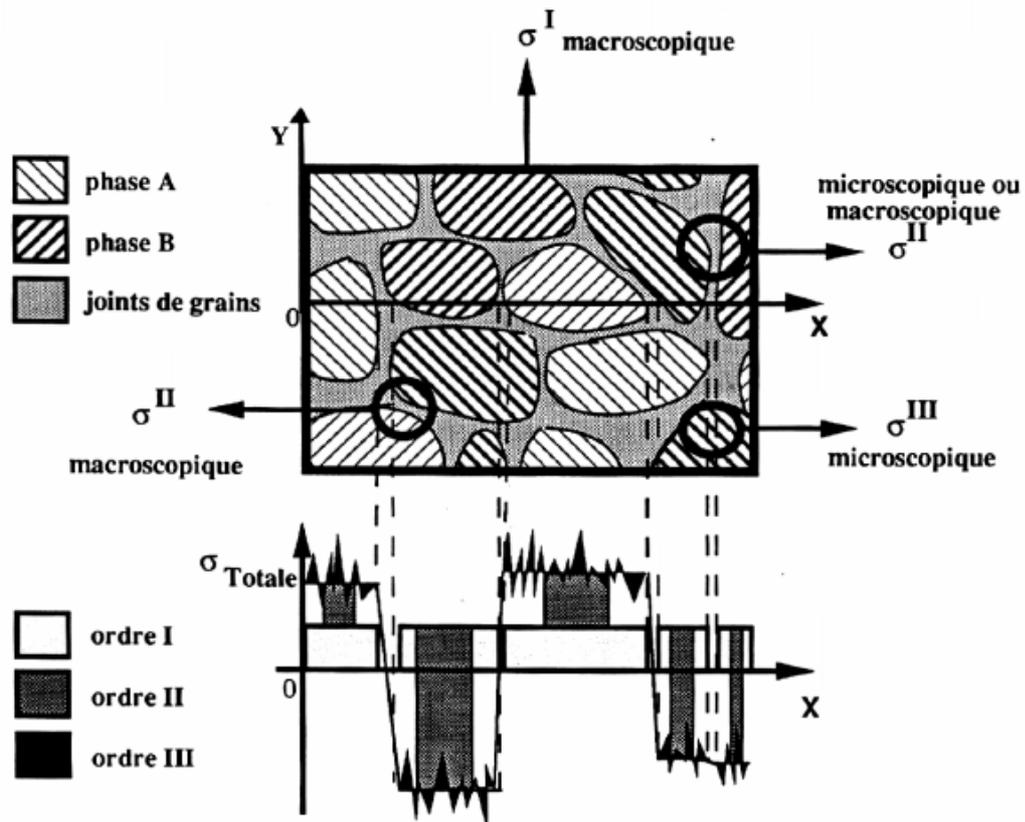


Figure III.6 : Illustration des différents ordres de contraintes. [43]

La Figure III.6 illustre le champ de contraintes internes dans un échantillon selon une direction x , tel que [43]:

$$\sigma_R = \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III} \quad (III.3)$$

III.2.2.3 Méthodes de détermination des contraintes résiduelles

Expérimentalement, il est très difficile de faire une séparation d'ordre. Pour cela, on parle souvent de macrocontraintes (position des pics de la diffraction RX) et de microcontraintes (profils des pics). Ces contraintes résiduelles sont d'autant plus insidieuses qu'elles ne sont généralement pas détectables et jusqu'à maintenant, il n'existait pas de méthodes simples permettant de les mesurer sans détruire la structure. A ce jour, les méthodes les plus utilisées pour leur détermination, se résument entre autre par [42]:

- Méthode de TROU ;
- Méthode d'enlèvement de couches ;
- Méthode de TREPAN ;
- Méthode par diffraction des RX.

Chapitre IV

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Dans ce chapitre, on va présenter les matériaux utilisés, la procédure d'élaboration des multimatériaux (la technique de la projection thermique) par un pistolet à fil ainsi que le processus relatif au traitement de fatigue thermique des multimatériaux préparés.

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

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

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**.

➤ Substrats

Les substrats utilisés sont :

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

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

Tableau IV.1 : Analyse spectrochimique de l'AU4G [44].

Eléments	Cu	Mn	Mg	Si	Al
Composition (% en masse)	4	0,5	0,7	0,5	Reste

- ✚ **AG3** : un alliage moins dur que l'AU4G, mais cela n'empêche pas son utilisation en carrosserie, car les premiers carrossiers d'automobile ont été en AG3, cet alliage est mis en forme à l'état recuit, il peut être soudé par tous les procédés connus, ce qui rend la construction et la réparation aisées.

L'analyse spectrale d'un échantillon de cet alliage sur l'appareil D.V.4, donne la composition chimique suivante (tableau IV.2) :

Tableau IV.2 : Analyse spectrochimique de l'AG3.

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).

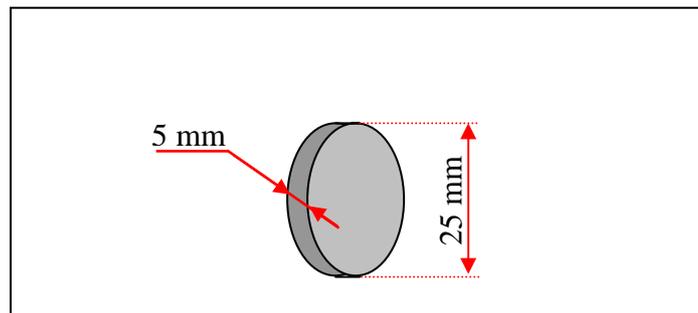


Figure IV.1 Dimensions de l'éprouvette étudiée.

➤ **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 déposition 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 : composition chimique de la Thermanit [44].

Éléments	C	Fe	Ni	Cr	Mn
Concentrations (% 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. Techniques expérimentales et 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.

- **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.

Les paramètres utilisés pour élaborer les couches protectrices sont représentés dans le tableau IV.4

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

	AU4G		AG3	
	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)
Ni	80	8	80	8
Zn	80	3-5	80	3-5
Ni-Zn	80	5	80	5

Procédés du décapage :

- Pour le Zn, les pièces ont subi un traitement thermo-chimique dans un bain de zinate.
- Pour le Ni, le dépôt est réalisé chimiquement par réduction en présence de l'hypophosite de sodium (HPO_4 , Na^+).
- Pour la codéposition Zn-Ni : **5 g/l** de sulfate de Zn + **27 g/l** de sulfate de Ni.

- ✓ **Dégraissage :**

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

- ✓ **Sablage :**

Parmi les différentes méthodes de rugosification, 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 7 bars, les particules pénètrent les interstices de la surface rugueuse et pour ainsi dire s'agrippent à ses aspérités.

- **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.2.

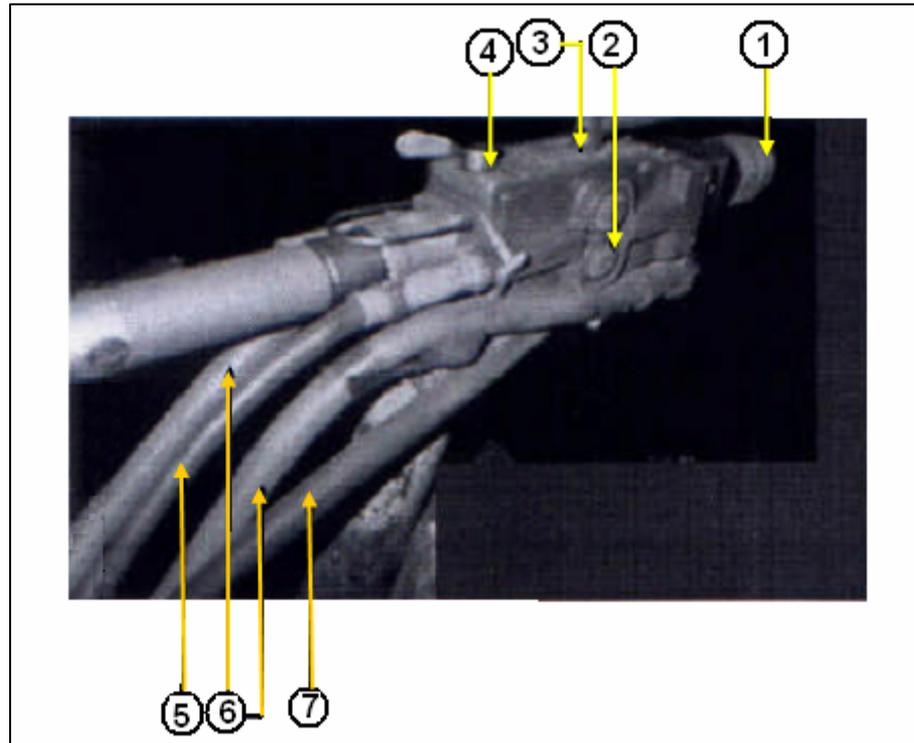


Figure IV.2 : Pistolet de projection à arc entre deux fils « ARC SPRAY 234» [13].

- 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.

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.3)

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

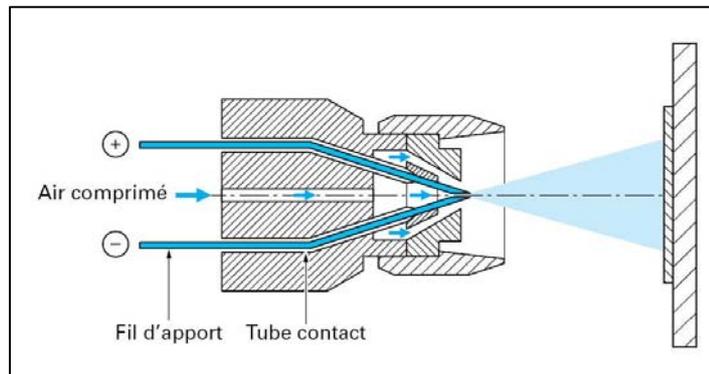


Figure IV.3 : Représentation d'un pistolet à arc électrique [18].

Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu, sous des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités allant de 100 à 500 A. L'application d'un courant électrique sur les fils génère un arc électrique qui permet de les fondre (température d'environ 6000 °C). Les fils fondus sont alors pulvérisés grâce à un jet d'air comprimé et projetés sur le substrat pour former le dépôt.

- **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.9.

Tableau IV.9 : Paramètres de mise en service du pistolet.

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

Certains autres paramètres de projection (distance de projection, vitesse de rotation de la cible, débit de matière projetée, angle de projection...) qui ont une influence sur la qualité du revêtement, sont présentés dans le tableau IV.10.

Tableau IV.10: 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

Des études se font sur l'optimisation des paramètres de projection et leurs influences sur la qualité finale du multimatériau réalisé, particulièrement sur la distance de projection et la vitesse de rotation de la cible (porte échantillons). La figure IV.4 montre clairement l'évolution de la dureté en fonction de la distance de projection, ce qui explique la cohésion entre les gouttes (particules) du métal projeté.

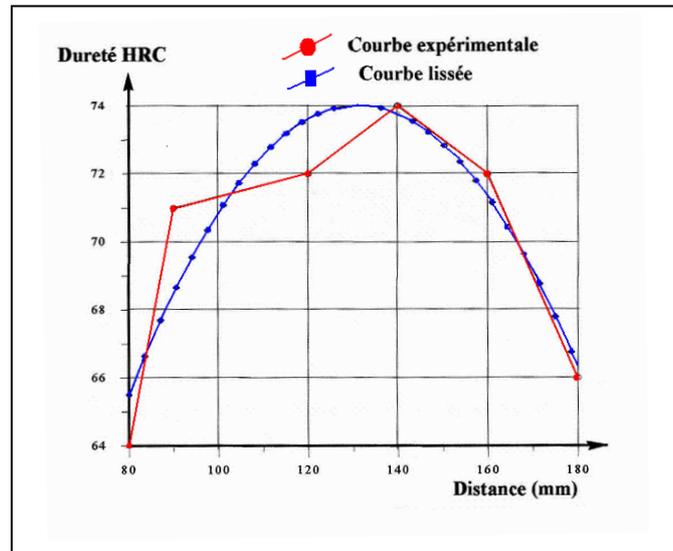


Figure IV.4 : Evolution de la dureté en fonction de la distance de projection [44].

- ***l'échantillon après le revêtement :***

La forme finale de nos échantillons est présentée sur la figure IV.5

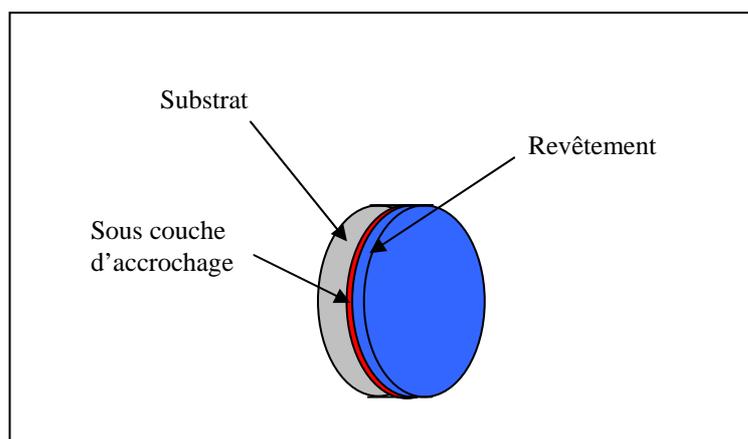


Figure IV.5 : Forme finale de l'échantillon après revêtement

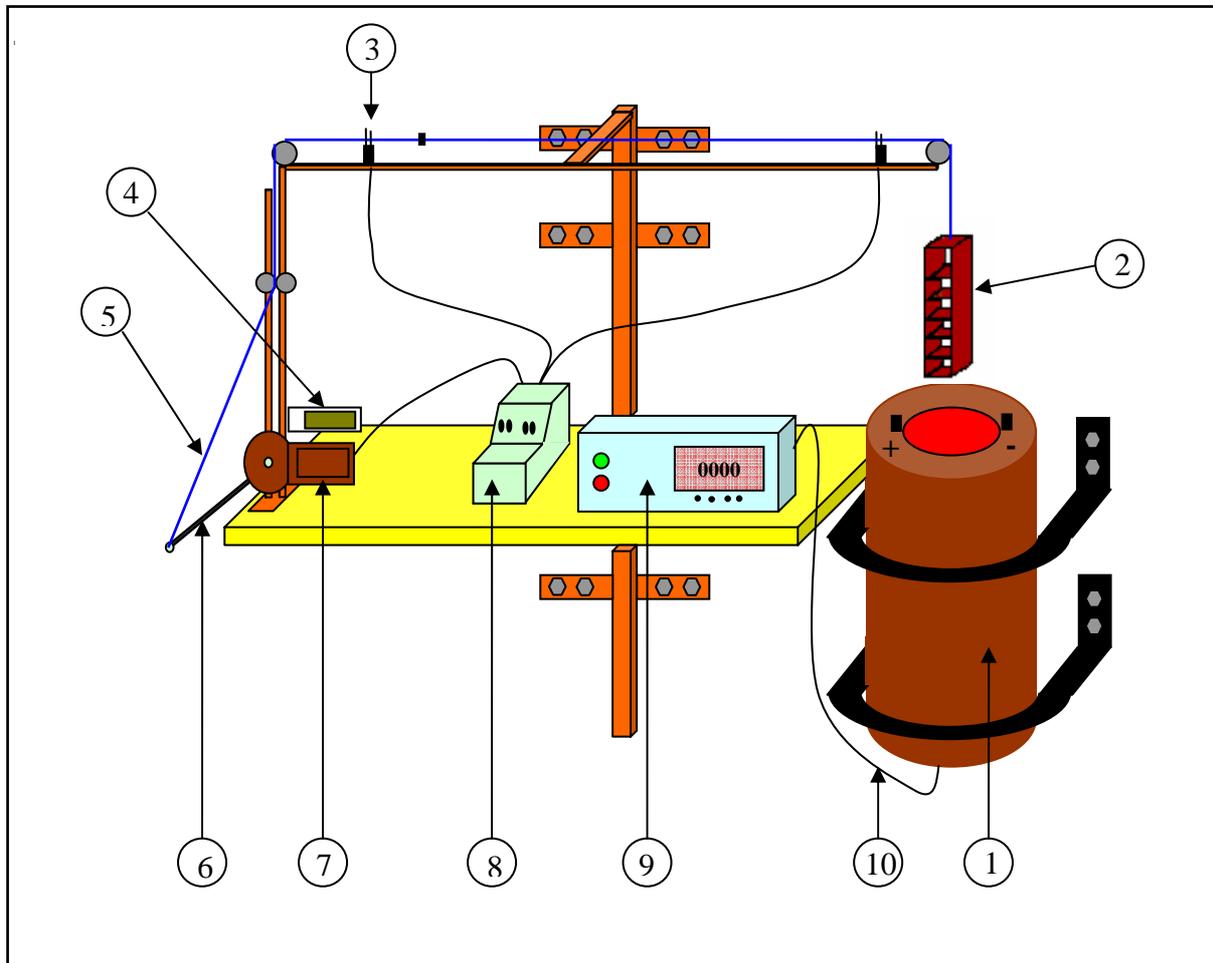
IV.3. Fatigue thermique :**IV.3.1. Dispositif de la fatigue thermique :**

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.

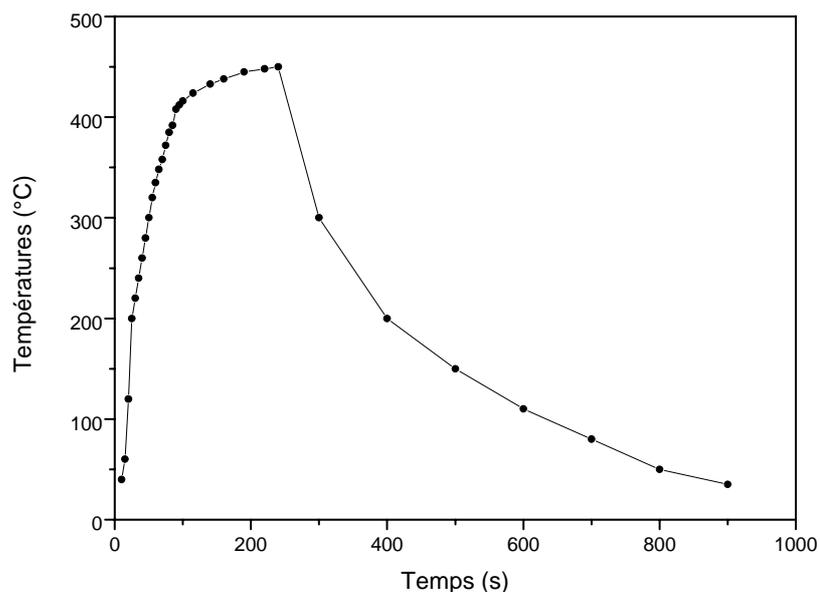
- **Principe de fonctionnement du dispositif**

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'intérieur du four. Ces cycles thermiques sont réalisés à l'aide d'un système électromécanique composé d'un moteur électrique à courant, le mouvement de porte échantillons 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 avec le thermorégulateur.

IV.3.2. Le cycle thermique

La connaissance des paramètres de traitement consiste d'abord de tracer le cycle thermique c'est-à-dire l'évolution de la température pendant les opérations de chauffage et de refroidissement, et pour cela on a fixé solidement un thermocouple sur un échantillon percé par une perceuse de diamètre égale au celui de 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, on a procédé à des essais de cyclage thermique, dont lesquelles on a relié le thermocouple avec un régulateur de température pour suivre l'évolution de la température en fonction du temps, ce dernier est calculé 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*.



IV.3.3. 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.

Le choix de la température de cycle a été guidé par les considérations suivantes [9,16]:

- 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.

Avant de commencer les essais de fatigue, on a procédé un traitement de recuit pour éliminer les contraintes résiduelles dues aux chocs thermiques créés par la projection thermique, donc les échantillons ont subi un chauffage de deux heures à 200 °C suivi d'un refroidissement lent à l'air. Ce dernier permet d'abaisser la concentration des contraintes internes, en diminuant la probabilité d'amorçage des fissures causant la rupture de nos matériaux pendant le cycles thermique.

Tableau IV.11 : Paramètres de la fatigue thermique.

Température maximale T_{Max} (°C)	450
Température minimale T_{Min} (°C)	35
Temps de chauffage (s)	300
Temps de refroidissement (s)	600

IV.4 TECHNIQUES D'ANALYSES

Parmi les moyens utilisés pour la caractérisation, il y a le microscope optique et la microscopie électronique à balayage (MEB), les mesures de la microdureté. Ces techniques permettent d'avoir des informations sur la morphologie ainsi que l'adhérence du dépôt au niveau de l'interface.

IV.4.1 Analyse micrographique

Des observations par microscopie optique et électronique à balayage ont été effectuées suivant 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).

Un microscope métallographique de type AXIOVERT 40MAT(ZEISS) en lumière directe permet l'observation des échantillons, avec un grandissement qui varie de 5X à 100X. Ce microscope s'accompagne d'une caméra. 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.

Le microscope électronique à balayage (MEB) utilisé est de type PHILIPS 35.

Avant d'aller aux observations par microscope, il faut préparer la surface des échantillons.

- **Polissage :**

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

On fait subir aux surfaces à observer des polissages mécaniques, vise à les rendre planes et exemptes de toutes rayures, graisses ou déformations nuisibles et gênantes.

Cette opération consiste à faire passer les surfaces des échantillons à observer sur des papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus faible en commençant avec P.80 jusqu'au plus fin P.1200, cela se fait en présence d'un arrosage abondant avec de l'eau pour écarter d'éventuelles risques d'échauffement de la pièce.

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

Un nettoyage à l'acétone et un séchage par flux d'air chaud terminent le polissage mécanique. Notons aussi que cette même procédure a été suivie pour préparer les échantillons sur lesquels les mesures de microdureté ont été effectuées.

IV.4.2 Etude de la microdureté

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

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

Chapitre V

Résultats et discussions

Le premier objectif de notre étude est d'obtenir un dépôt d'acier inoxydable dense à double intérêt une bonne résistance à la fatigue thermique pour la protection du substrat et de bonnes propriétés mécaniques. Un tel dépôt doit présenter une *faible porosité* et contenir *peu d'oxydes* car ces derniers sont généralement néfastes à l'adhérence du dépôt sur la pièce à protéger.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents résultats obtenus au cours de l'analyse et de la caractérisation des dépôts projetés thermiquement.

1. Structure du dépôt



Figure V.1 : Image des échantillons préparés.

Le revêtement élaboré par projection thermique est obtenu par empilements successifs de gouttelettes du matériau fondu. Ils possèdent alors une structure lamellaire.

Les particules fondues s'écrasent et s'étalent sur le substrat ou sur des particules déjà déposées en formant de fines lamelles qui se conforment aux irrégularités de la surface.

Le temps de solidification d'une particule projetée est de l'ordre de la microseconde [2].

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

La formation d'un dépôt résulte de la combinaison du phénomène d'écrasement et de solidification rapide des particules fondues sur le substrat, de la distance et de la vitesse de la torche par rapport à la surface à traiter. Les réactions chimiques des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleur avec le substrat et/ou la sous couche d'accrochage déposée affectent aussi la qualité du dépôt (formation des oxydes), et en particulier le taux de porosité, le taux d'impuretés, les contraintes résiduelles et la structure métallurgique.

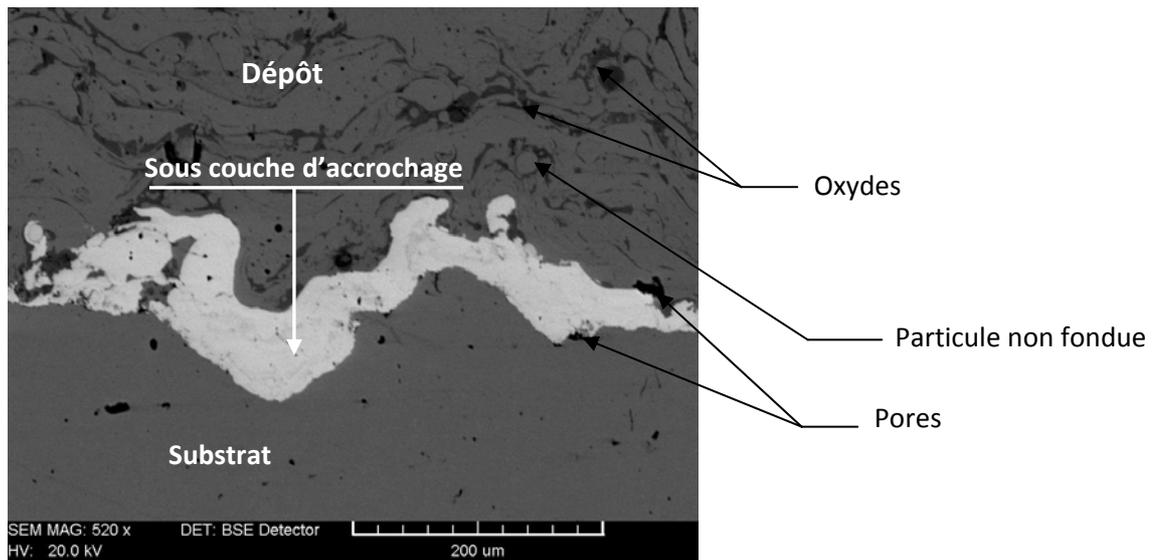


Figure V.2 : Microstructure du dépôt obtenue par MEB.

L'observation d'une coupe transversale de l'échantillon préparé au microscope électronique à balayage conduit à noter que le dépôt présente une structure lamellaire de différentes tailles et de forme avec des pores, des particules non fondues et des oxydes.

Le revêtement réalisé par projection thermique comporte souvent des pores, des particules non fondues, des microfissures et des oxydes. La porosité provient soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1% à 25% suivant les procédés et les matériaux utilisés [2]. La Figure V.2 représente une coupe d'un revêtement brut de dépôt.

En raison de la grande vitesse de refroidissement des particules au contact du substrat, leur structure métallurgique est caractéristique des matériaux trempés, et se trouve généralement monophasée [2].

2. Adhérence du dépôt

2.1 Observations en microscopie optique

Pour aborder les phénomènes de liaison entre un revêtement et son substrat, on distingue deux notions différentes : l'adhésion et l'adhérence [2].

- L'adhésion est l'ensemble des liaisons physico-chimiques pouvant s'exercer à l'interface entre deux corps en contact. Elle représente l'énergie associée aux liaisons mises en jeu.
- L'adhérence est une notion macroscopique regroupe les phénomènes accompagnant la propagation d'une fissure.

Plusieurs mécanismes interviennent sur l'adhésion tels que : la diffusion, les réactions chimiques, les forces électrostatiques, l'accrochage mécanique, etc....

A cause de la solidification rapide des particules, leur vitesse de refroidissement et la microstructure lamellaire des dépôts, l'accrochage mécanique semble être le mécanisme principal qui gère l'adhérence [39].

- **Influence du sablage sur l'adhérence :**

Le sablage permet la création d'une surface rugueuse. Après le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à revêtir afin de permettre aux particules en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique.

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

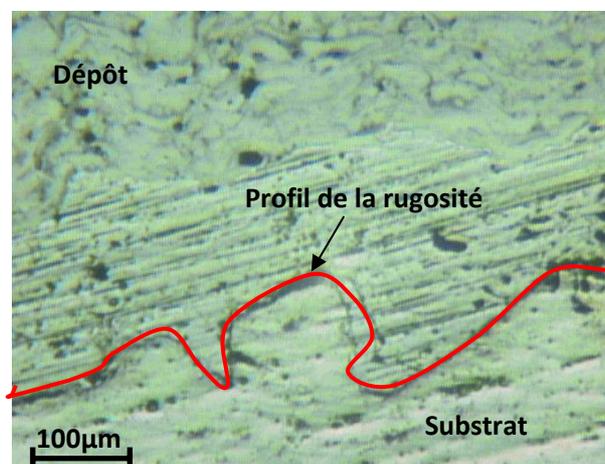


Figure V.3 : Etat de la surface après sablage.

La figure V.3 montre le rôle du sablage avant la projection et met en évidence l'accrochage mécanique Substrat/dépôt. L'adhérence des dépôts réalisés sur des surfaces rugueuses issue d'une augmentation de l'aire de contact qui permet de multiplier le nombre de sites favorables à la formation de liaisons qui assurent la bonne cohésion entre les deux matériaux [39-40,45-47].

La mise en jeu du mécanisme des liaisons mécaniques qui correspond à la contraction et à la solidification des particules étalées sur les anfractuosités du substrat sablé [40].

- **Influence du décapage**

Cette opération concerne en premier lieu, l'élimination de la couche d'oxyde formée en surface du substrat et la mise à nu sans alternation du métal de base. En deuxième lieu, le recouvrement des surfaces à revêtir par un film passivant, qui empêche la formation des couches néfastes pour la qualité du produit.

Dans notre cas, les deux substrats l'AU4G et l'AG3 sont recouverts, par voie électrolytique, d'une couche de Zinc, Nickel ou Zinc-Nickel. Le revêtement Thermanit a été projeté thermiquement avec et sans couche d'accrochage, pour voir l'influence du décapage sur l'adhérence métal/revêtement.

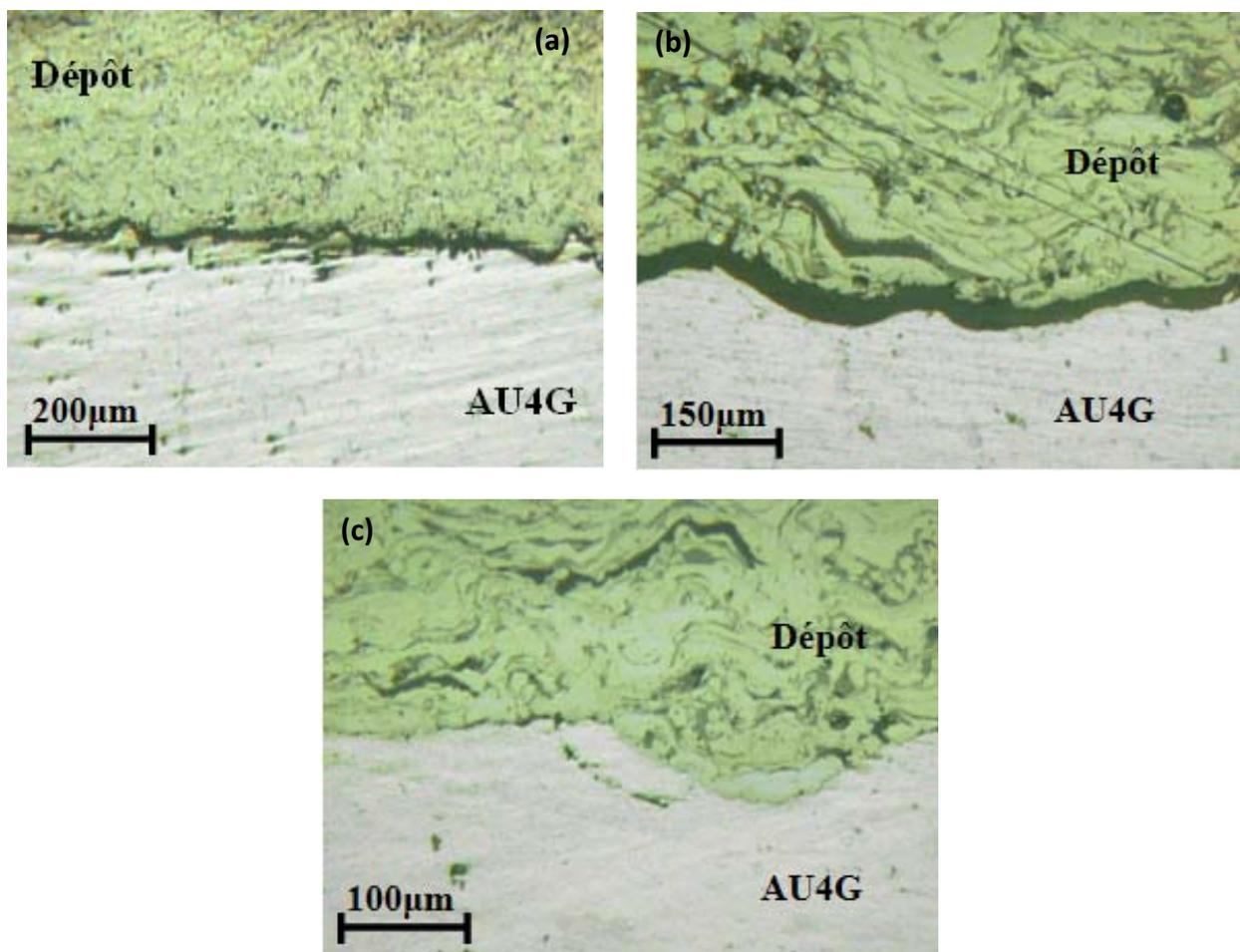


Figure V.4 : Micrographies de l'alliage AU4G décapé par Zn (a), Ni (b) et Zn-Ni (c).

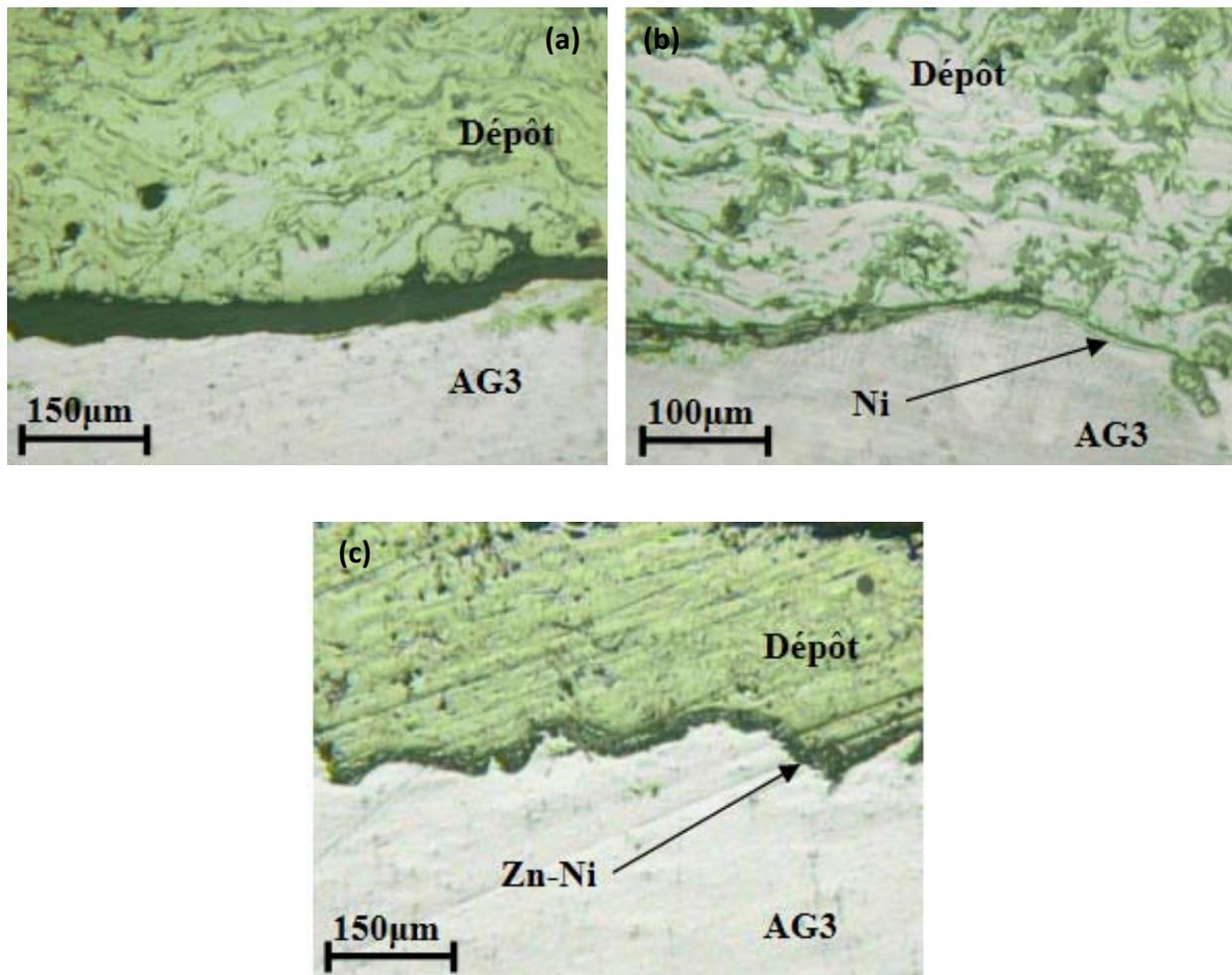


Figure V.5 : Micrographies de l'alliage AG3 décapé par Zn (a), Ni (b) et Zn-Ni (c).

Les couches protectrices réalisées sur les deux substrats à savoir Zn, Ni et Zn-Ni présentent des résultats différents (Fig. V.4 et 5) :

- Pour AU4G, les couches de Zn et de Zn-Ni favorisent l'accrochage mécanique.
- Pour AG3, les couches de Ni et Zn-Ni présentent une bonne adhérence.

Le bon accrochage entre AU4G et Zn, AG3 et Ni justifie la bonne adhésion du dépôt avec le substrat, dans les deux cas.

Le mauvais contact entre la couche protectrice crée des oxydes et des microfissures (pores) au niveau de l'interface, ces derniers provoquent des concentrations de contraintes, qui s'avèrent très importantes et se multiplient lors de la projection thermique, donc la décohésion de notre revêtement projeté.

- **Influence de la sous couche d'accrochage**

Pour les matériaux comme les métalliques dont l'adhérence est faible, et dans le cas où les coefficients de dilatation sont très différents entre le matériau projeté et le substrat, on utilise des sous-couches d'accrochages connues pour leurs bonnes valeurs d'adhérence, telles que l'aluminure de nickel, le molybdène ou l'alliage Ni-Al.

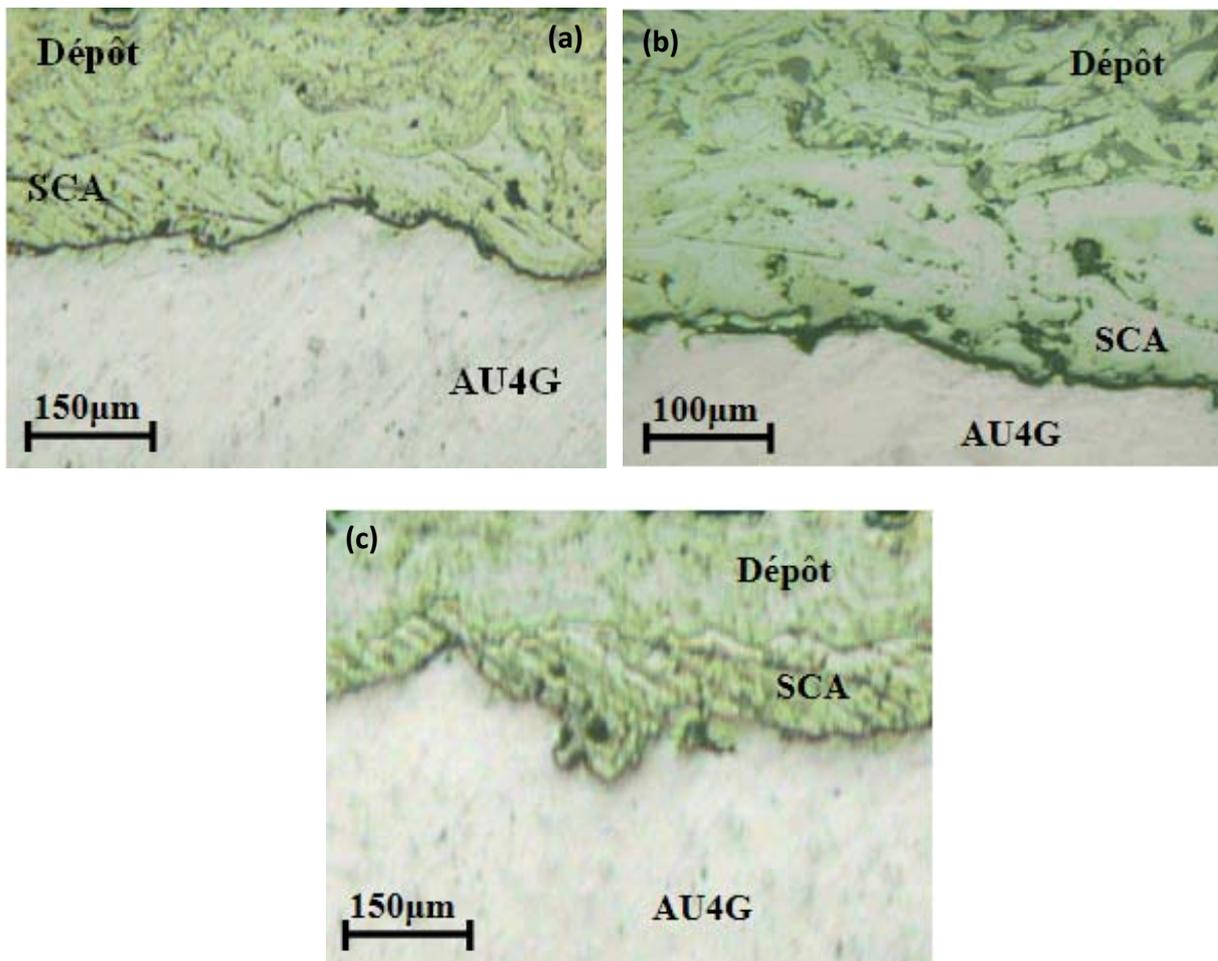


Figure V.6 : Micrographies de l'alliage AU4G revêtu avec une sous couche de Ni-Al, décapé par Zn (a), Ni (b) et Zn-Ni (c).

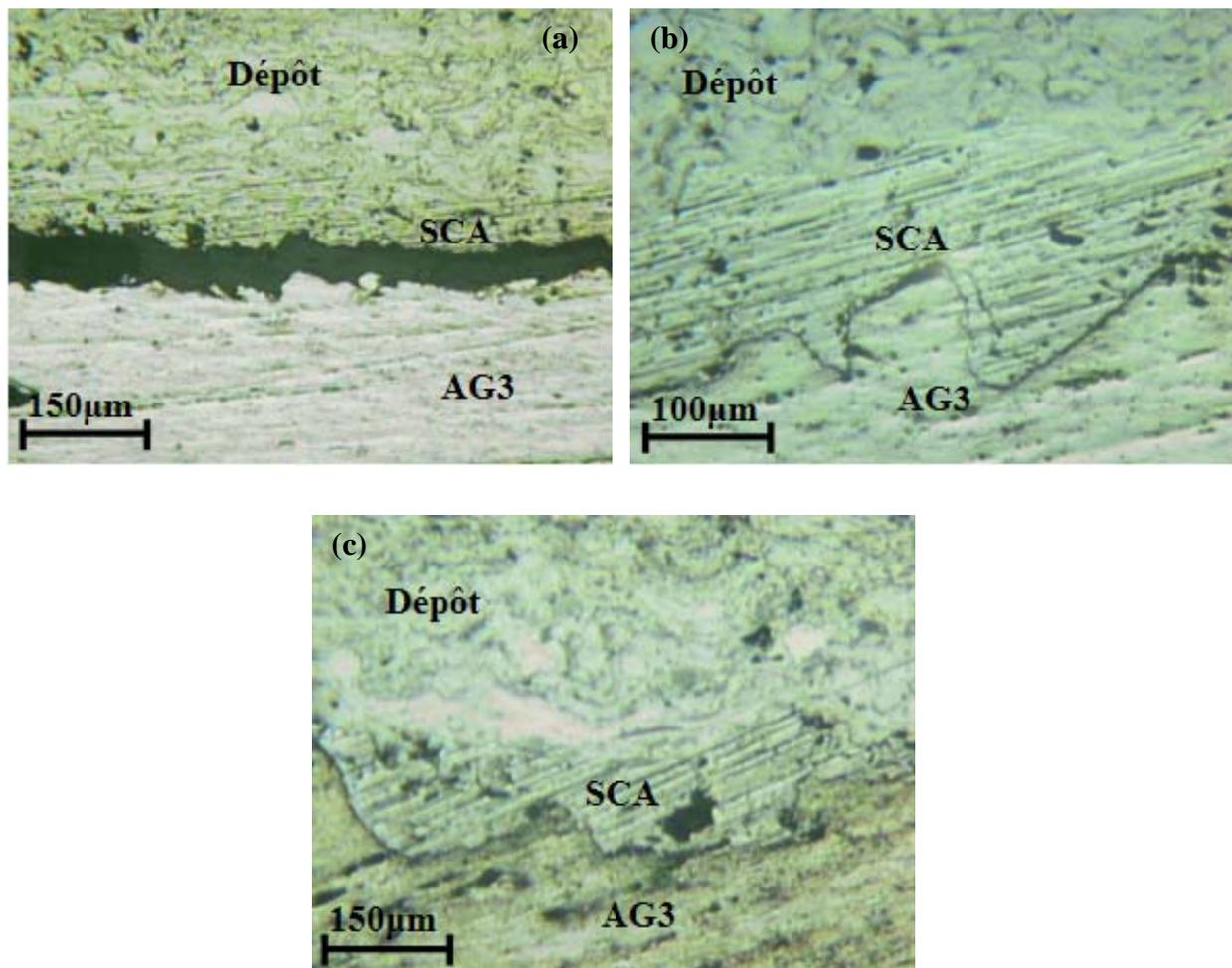


Figure V.7 : Micrographies de l'alliage AG3 revêtu avec une sous couche de Ni-Al, décapé par Zn (a), Ni (b) et Zn-Ni (c).

Que ce soit les deux multimatériaux à base de l'AU4G ou l'AG3, la sous couche d'accrochage joue un rôle primordial sur la déposition de la Thermanit par projection thermique sur les couches chimiques du décapage de Zinc, de Nickel ou de Zinc-Nickel.

Le mécanisme d'adhérence par liaison métallurgique, qui résulte de la fusion et de l'interdiffusion d'espèces au niveau de l'interface conduisant à la formation d'une phase métallique ne peut se produire que pour une température de substrat égale au moins à 0,6 fois sa température de fusion ($T_f = 550-640^\circ\text{C}$ pour AU4G et $T_f = 590-645^\circ\text{C}$ pour AG3), soit dans notre cas environ 350°C , même si, localement et pendant quelques dixièmes de microsecondes, les températures à l'impact sont proches de la température de fusion [48].

Le substrat atteint pendant le tir des températures comprises entre 100 et 200°C [48], insuffisantes pour conduire à la formation des liaisons métalliques à l'interface entre les différents éléments. Les composés présents dans l'interface métal/dépôt sont des oxydes, ce qui empêche la bonne cohésion.

La pré-fissuration de projection peut être attribuée à la présence de contraintes résiduelles dans le revêtement. Les régions non adhérentes peuvent également correspondre aux endroits où les mécanismes responsables de l'adhérence n'ont pu être mis en place. En effet, les températures des particules projetées ou du substrat peuvent ne pas être assez élevées pour entraîner une bonne mouillabilité de la sous couche d'accrochage Ni-Al sur les alliages d'aluminium [4] et assurer l'adhérence du revêtement.

Des pores ont également été formés à l'interface. Ils résultent probablement d'un mauvais empilement des particules, comme dans le reste du revêtement. Ils constituent toutefois des amorces de ruptures potentielles lorsqu'ils sont localisés à l'interface.

Les pores se distinguent des pré-fissures par leur longueur à l'interface. Le défaut d'adhérence est considéré comme une pré-fissure.

2.2 Observations au Microscope Electronique à Balayage

Les dépôts élaborés par projection thermique sollicités aux hautes températures réagissent généralement plus que les matériaux à base d'acier inoxydable. Ce comportement est essentiellement lié à la porosité dans les dépôts, et à l'hétérogénéité chimique provoquée par l'oxydation du chrome et de fer pendant la projection.

Aussi, la microstructure des dépôts de la THERMANIT réalisés par arc se présente sous forme d'une matrice grise avec des inclusions et des trous noirs (fig. V.8).

Les inclusions contiennent essentiellement trois phases : une phase appauvrie en chrome, de l'oxyde de chrome et de l'oxyde de Fe-Cr [48]. La phase appauvrie en chrome est généralement séparée ou mélangée avec l'oxyde de chrome alors que l'oxyde de Fe-Cr est dispersé de manière aléatoire dans la matrice d'acier inoxydable.

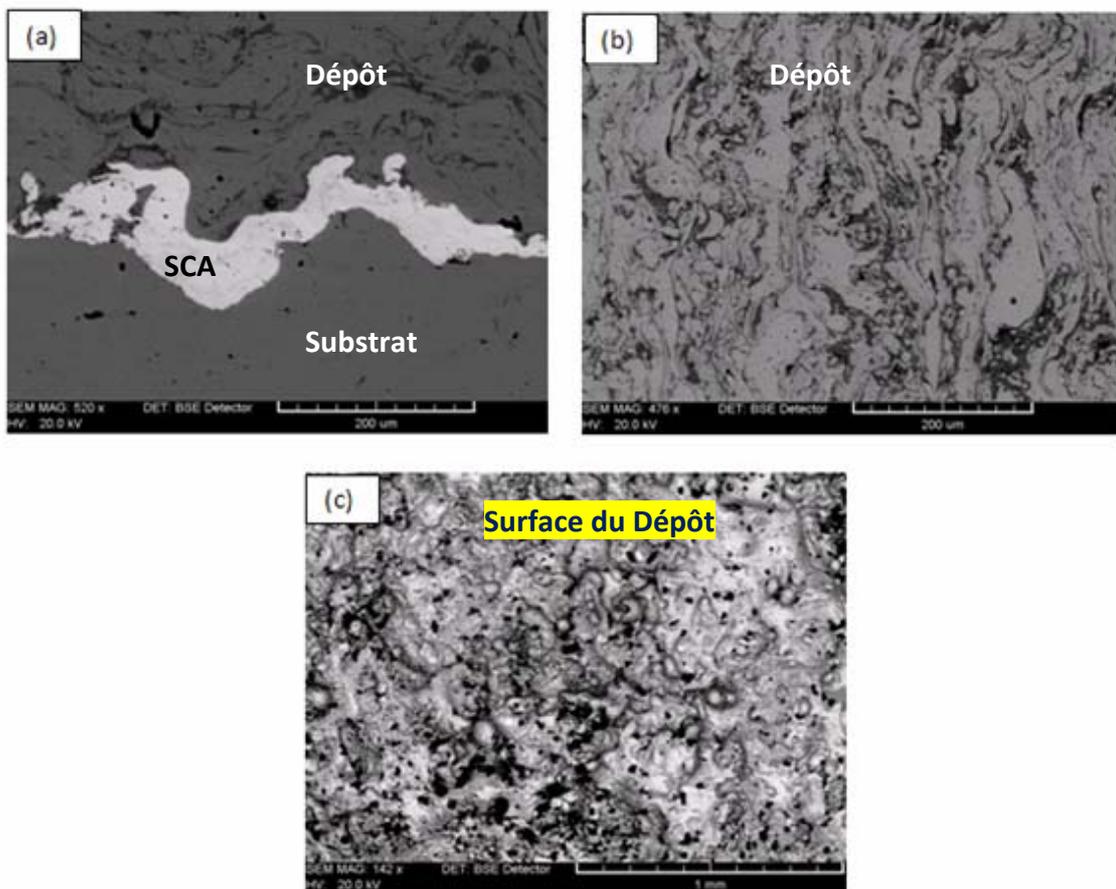


Figure V.8 : Micrographies MEB du dépôt thermanit réalisé par projection.

- a) Multimatériau avec ses 3 constituants.
- b) Structure du dépôt (coupe transversale).
- c) Structure du dépôt (vue de la surface de projection).

S.NOUROUZI [4], a montre que la quantité d'oxyde pour une projection thermique à arc-fil à haute pression avec l'air comprimé, ne dépasse pas les 12 % (en volume) et la porosité est inférieure à 4 % (en volume). Ces résultats ont été déterminés par analyse d'image des coupes transversales des dépôts.

Des microfissures peuvent se former très facilement dans les lamelles du dépôt à cause des contraintes en tension qui apparaissent lors du refroidissement des lamelles. De telles microfissures conduisent à une augmentation de la porosité.

Dans la figure V.8 b, les structures blanche et grise indiquent des structures de haute densité, les particules sous forme sphérique présentent de la matière non fondue, les zones noirs sont des pores formés lors de la projection et les plages grises montrent les différents oxydes localisés entre les lamelles du dépôt.

La figure V.8.c met en evidence l'origine de la porosité, lorsqu'on ajoute une passe sur un revêtement qui presente un taux de porosité important, avec un volume d'oxyde piégé à l'intérieur de ces pores, on obtient une densité moïn importante du dépôt.

3. Microdureté des composites AU4G/Thermanit et AG3/Thermanit

Des mesures de la microdureté Vickers ont été prises sur nos échantillons sous une charge de 200g. Ces tests concernent les différentes régions à savoir le matériau de base (AU4G et AG3), la sous couche d'accrochage (Ni-Al) et le dépôt Thermanit.

Chaque valeur considérée représente une moyenne de trois essais distincts sur le même niveau.

L'évolution de la microdureté des deux composites en fonction de la distance à la surface revêtue est présentée sur les figures V.9 et V.10.

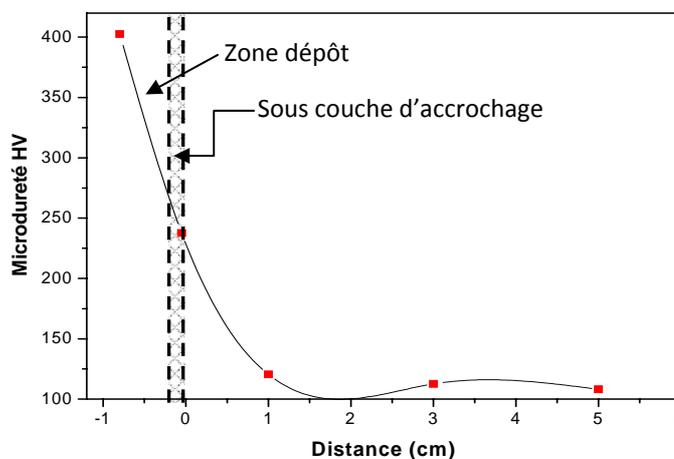


Figure V.9 : Profil de la microdureté du multimatériau à base de l'AU4G.

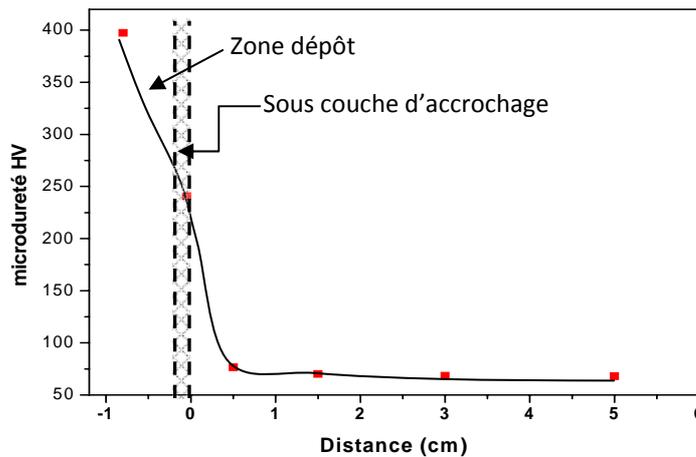


Figure V.10 : Profil de la microdureté du multimatériau à base de l'AG3.

Les profils de la microdureté présentent une évolution identique, pour les deux matrices (AU4G/Thermanit et AG3/Thermanit).

Pour les zones proches de dépôt, on note une microdureté supérieure à celle du substrat pour les deux cas de figures. Ceci prouve qu'on a amélioré une des propriétés mécaniques au niveau de la surface de notre matériau qui est la résistance mécanique.

Chapitre VI

Modélisation

VI.1. Introduction

La fiabilité des pièces mécaniques destinées aux travaux ou sollicitations à haute température est un point sensible du développement. Du fait de leur mode de fonctionnement et de leur environnement, ces composants subissent des contraintes (selon la nature de sollicitations) plus importantes que dans les applications industrielles conventionnelles. Il est donc important de connaître ces contraintes si l'on désire estimer leur durée de vie et ainsi fiabiliser le système dans son intégralité [49].

Tout concepteur ou fabricant, tente d'imposer un niveau de durabilité minimum du produit ou système qu'il conçoit. Si on prend l'exemple d'une pièce dans un réacteur d'avion, la durabilité se traduit par le nombre de vols minimum à atteindre avant une défaillance irréversible.

Pour évaluer la durée de vie d'une pièce mécanique qui subit une fatigue thermique, il est nécessaire de connaître les contraintes thermiques ayant générées lors de son fonctionnement. C'est donc logique que nous nous intéressions à une modélisation du comportement thermique, en calculant les contraintes résiduelles engendrées dans notre système.

La simulation numérique par éléments finis est un outil puissant dont l'utilisation doit permettre la prédiction de la répartition spatiale des contraintes résiduelles lorsque les méthodes analytiques sont inefficaces.

Le champ d'investigation dans ce domaine est vaste et connaît un essor particulier ces dernières années en relation avec l'amélioration permanente des logiciels et des stations de calculs disponibles dans les laboratoires. Dans notre cas, nous avons utilisé le logiciel ABAQUS. Cet outil, recèle un grand nombre de possibilités parmi lesquelles existe la modélisation du comportement élastique, élasto-plastique et élasto-visco-plastique des matériaux.

Ainsi, il est question d'appliquer cette méthode aux multimatériaux à base d'alliage d'aluminium (AU4G) avec un revêtement d'acier inoxydable projeté thermiquement. Il s'agit de valider les différents résultats expérimentaux sur la base d'une géométrie simple (Figure VI.1).

VI.2. Le modèle théorique

La modélisation des contraintes d'origines thermiques est conduite sur la pièce de géométrie simple (Figure VI.1). La démarche calculatoire entreprise est la suivante :

La première étape d'une modélisation des contraintes résiduelles d'origine thermique est le maillage en éléments finis de la structure à analyser. Puis intervient le calcul du chargement thermique et finalement le calcul des contraintes et déformation

au cours de ce chargement. Le maillage et la géométrie des mailles doivent prendre en considération les symétries éventuelles des pièces et peuvent être affinés, si on le désire, aux endroits caractérisés par une discontinuité (bord et interface) qui peuvent être source de forts gradients ou de concentration de contraintes. Un maillage fin sera plus précis mais augmente en conséquence le temps de calcul.

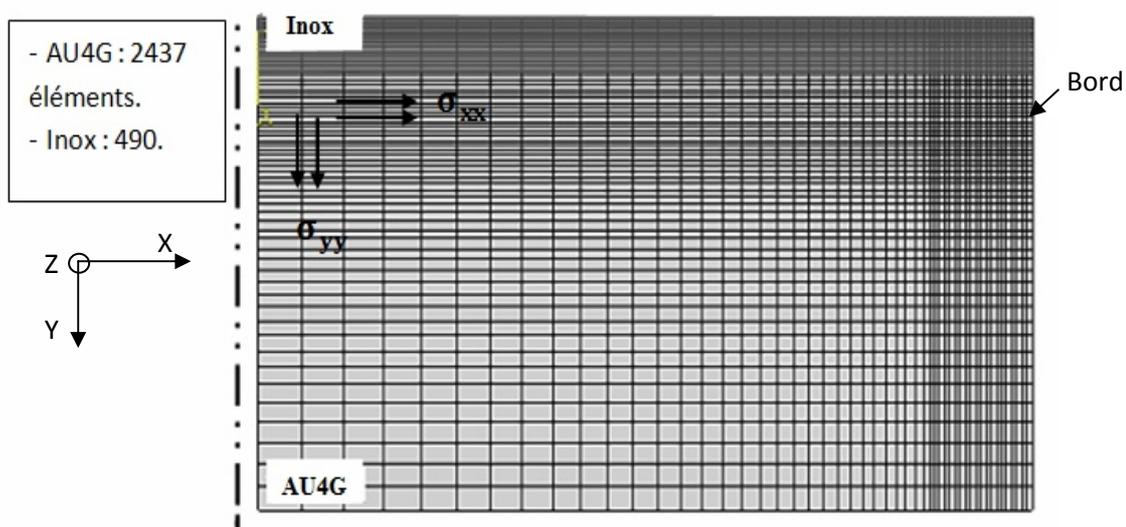


Figure VI.1 : Maillage bidimensionnel de l'échantillon.

Le maillage et les solutions numériques sont obtenus en utilisant ABAQUS 6, logiciel de simulation numérique qui utilise l'approche en éléments finis (EF) afin d'obtenir les solutions des équations différentielles partielles de l'équilibre de la forme lagrangienne. Le comportement plastique des matériaux implique une réponse non linéaire. La solution est obtenue après un certain nombre d'incréments suivi de plusieurs itérations afin d'obtenir l'équilibre. Dans notre analyse nous avons supposé que les contraintes étaient planes.

Pour des raisons de symétrie de géométrie de ses couples, nous avons étudié le quart de l'échantillon du bimatériau.

VI.3. Les contraintes résiduelles

VI.3.1 Sources des contraintes

- ❖ Les contraintes thermiques créent des dislocations au niveau de l'interface et même dans le revêtement, ces dislocations sont mobiles et se multiplient [49]. Les sources de dislocations doivent vraisemblablement provenir de défauts se trouvant aux interfaces (rugosité, impureté...) ou de joints inter-lamelle.
- ❖ Il existe un différentiel de coefficient de dilatation entre les deux matériaux ; l'alliage de l'aluminium et l'acier inoxydable. Lors du refroidissement de la pièce,

ce différentiel induit une déformation thermique pouvant permettre une accommodation par émission de dislocations.

- ❖ La concentration de lacunes mobiles est assez importante dans l'interface et la couche projetée à haute température. Lorsque la température diminue, ces lacunes s'agglomèrent pour former des nanotrous pouvant être des amorfes de fissures.
- ❖ La vitesse de refroidissement du multimatériau conditionne des déformations à cause de la différence de la limite d'élasticité et la température de transition ductile-fragile des deux matériaux constituant la pièce [49-50].

VI.3.2 Chargement thermique

Au cours des essais de fatigue, l'échantillon subit un cycle thermique composé d'un chauffage jusqu'à 450 °C et d'un refroidissement lent à l'air libre jusqu'à 35 °C.

L'examen des cartographies des isothermes au cours du refroidissement, confirme que le refroidissement est tellement lent que le gradient thermique est négligeable. Cela confirme l'hypothèse implicite qui consiste à négliger la genèse des contraintes résiduelles qui sont issues d'un gradient de température entre deux zones distinctes de la pièce (Figure VI.2).

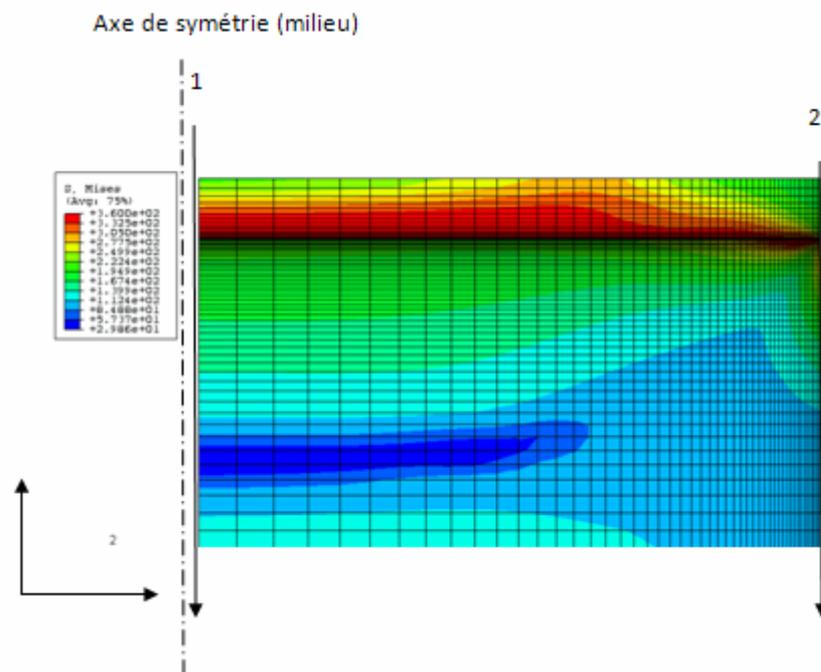


Figure VI.2 : Cartographies des isothermes.

VI.3.3 Equations du problème

Les contraintes résiduelles d'origine thermique sont susceptibles de conduire à l'endommagement du matériau, ces contraintes dirigent vers deux mécanismes ; la plasticité et la fissuration [43].

Dans le cas des matériaux isotropes [49]:

- La dilatation thermique est la même dans toutes les directions,
- μ_1 et μ_2 sont les allongements de deux matériaux en question, entre la température T_c de chauffage et l'état non contraint à la température T :

$$\diamond \text{ Pour le revêtement : } \mu_1 = l_0 \cdot \alpha_1 \cdot (T - T_c) \quad (\text{VI.1})$$

$$\diamond \text{ Pour le substrat : } \mu_2 = l_0 \cdot \alpha_2 \cdot (T - T_c) \quad (\text{VI.2})$$

α_1 et α_2 : Les coefficients de dilatation des deux matériaux.

l_0 : La longueur de la pièce.

La différence d'allongement entre le substrat et son revêtement sera alors :

$$\mu_{\square} = \mu_1 - \mu_2 = l_0 (\alpha_1 - \alpha_2)(T_c - T) \quad (\text{VI.3})$$

La déformation thermique ε du revêtement sera :

$$\varepsilon = \frac{(\mu_2 - \mu_1)}{l_0} = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_c - T) = \Delta\alpha(T_c - T) \quad (\text{VI.4})$$

➤ Contraintes thermiques

On peut supposer que la déformation thermique est accommodée uniquement dans le joint. On peut supposer aussi que [43]:

- La relation entre contraintes et déformations est donnée par la loi de l'élasticité linéaire (Loi de Hooke)
- La déformation thermique induit une contrainte plane selon le plan (Oxy).

Dans le cas d'un matériau isotrope, on a les relations suivantes [49]:

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz} = \sigma_{xx} \\ \lambda\varepsilon_{xx} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{yy} + \lambda\varepsilon_{zz} = \sigma_{yy} \\ \lambda\varepsilon_{xx} + \lambda\varepsilon_{yy} + (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} = 0 \end{cases}$$

λ et μ sont les coefficients de Lamé

Dans notre cas, les déplacements en x et y sont égaux dans le plan (Ox, Oy) et s'écrivent

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_T$$

On a donc :

$$\varepsilon_{zz} = \frac{-2\lambda\varepsilon_T}{(\lambda + 2\mu)} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 2\mu \cdot \varepsilon_T \frac{(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + 2\mu)}$$

La contrainte thermique dans le joint revêtement/substrat est donc :

$$\sigma_T = \frac{E \varepsilon_T}{(1-\nu)}$$

$$\sigma_T(T) = \frac{E \cdot \Delta\alpha}{((1-\nu)(T_c - T))} = \frac{E \cdot \Delta\alpha \cdot T_c}{((1-\nu)) \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)} \quad (IV.5)$$

VI.4. Les données du problème et les conditions aux limites

Les matériaux en question possèdent les propriétés présentées dans le tableau VI.1, les constantes élastiques E et ν , la limite d'élasticité σ_y , les coefficients d'expansion thermique α ainsi que les propriétés thermiques telles que la conductivité thermique et la chaleur spécifique pour chaque matériau en fonction de la température sont nécessaires pour la simulation.

Les dimensions de l'échantillon sont montrées dans le chapitre IV et les paramètres du cyclage thermique sont représentés dans le cycle thermique dans le chapitre IV.

Tableau VI.1 : Les propriétés physiques et mécaniques des matériaux étudiés.

	AU4G	Thermanit
Densité (g/cm ³)	2.79	7.89
Module de YOUNG (GPa)	75	197
Module de poisson	0.33	0.33
Conductivité thermique (W/M.°C)	134	16.2
Chaleur spécifique (0 à 100°C)(J/kg.°C)	920	500
Coeff de dilatation (0 à 100°C) 10 ⁻⁶ K ⁻¹	23	15.4

Hypothèses simplificatrices :

- Les propriétés thermomécaniques des matériaux sont invariables avec la température telles que le module de Young, le coefficient de Poisson et le coefficient de dilatation.
- L'effet du fluage (model élasto-plastique) du matériau est négligé, c'est à dire qu'on a pris en considération le domaine élastique, mais cette démarche n'est généralement pas satisfaisante car elle conduit à des valeurs de contraintes largement surestimées qui dépassent parfois la contrainte à la rupture du matériau.
- La rugosité de l'interface est négligée durant les calculs.
-

VI.5. Les résultats obtenus

VI.5.1 La déformation de la flèche

- *Principe de la Méthode de la flèche*

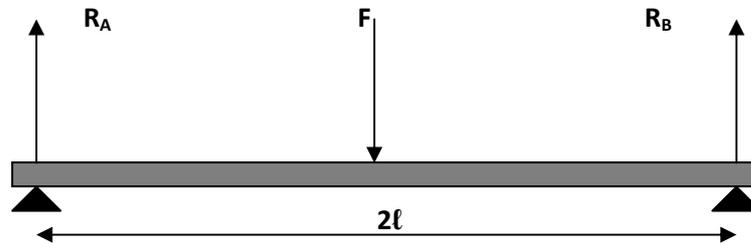


Figure VI.3 : Schéma du calcul théorique de la flèche [51].

- Equilibre des forces $F = R_A + R_B$
 - Equilibre des moments en A $F \cdot l = R_B \cdot 2 \cdot l$
- } $R_A = F/2$

$$d^2f/dx^2 = - M(x)/E \cdot I = F \cdot x / 2 \cdot E \cdot I$$

$$df/dx = F \cdot x^2 / 4 \cdot E \cdot I + C$$

Calcul de C :

$$df(l)/dx = 0 = F \cdot l^2 / 4 \cdot E \cdot I + C \implies C = - F \cdot l^2 / 4 \cdot E \cdot I$$

D'où

$$df/dx = (F / 4 \cdot E \cdot I) \cdot (x^2 - l^2)$$

$$f(x) = (F / 4 \cdot E \cdot I) \cdot x \cdot (x^2 / 3 - l^2)$$

Flèche f :

$$f(l) = F \cdot l^3 / 6 \cdot E \cdot I \tag{VI.6}$$

❖ Cas d'une force répartie

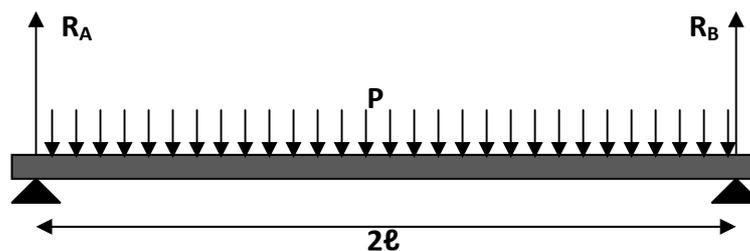


Figure VI.4 : Calcul théorique de la flèche dans le cas d'une force répartie [51].

Pour une force répartie, la formule est identique en remplaçant $F = P \cdot \ell$

$$f(\ell) = P \cdot \ell^4 / 6 \cdot E \cdot \ell$$

$$\sigma = M \cdot e / \ell \cdot 2 = F \cdot \ell \cdot e / 4 \ell$$

$$f(\ell) = F \cdot \ell^3 / 6 \cdot E \cdot \ell = 2 \cdot \sigma \cdot \ell^2 / 3 \cdot E \cdot e$$

$$\sigma = f \cdot 3 \cdot E \cdot e / 2 \cdot \ell^2 \quad (\text{VI.7})$$

avec : 2ℓ : longueur de l'éprouvette.

f : la flèche mesurée.

e : épaisseur de l'éprouvette.

E : module de Young du matériau étudié.

- **Courbes de la flèche**

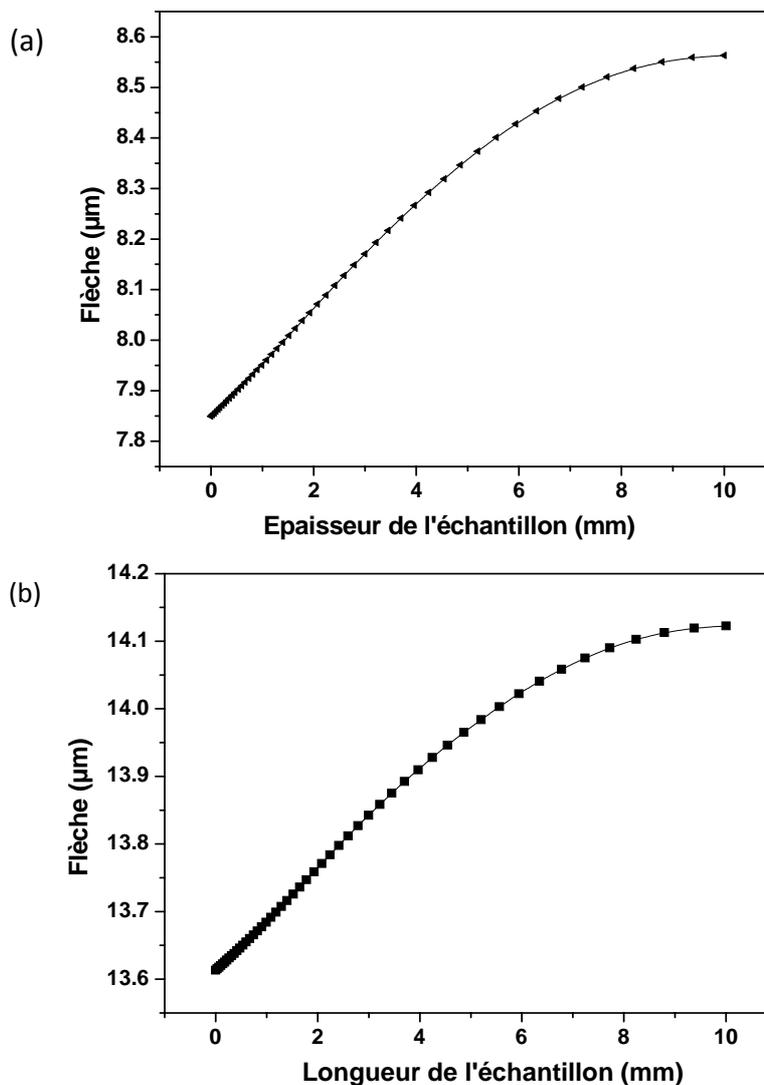


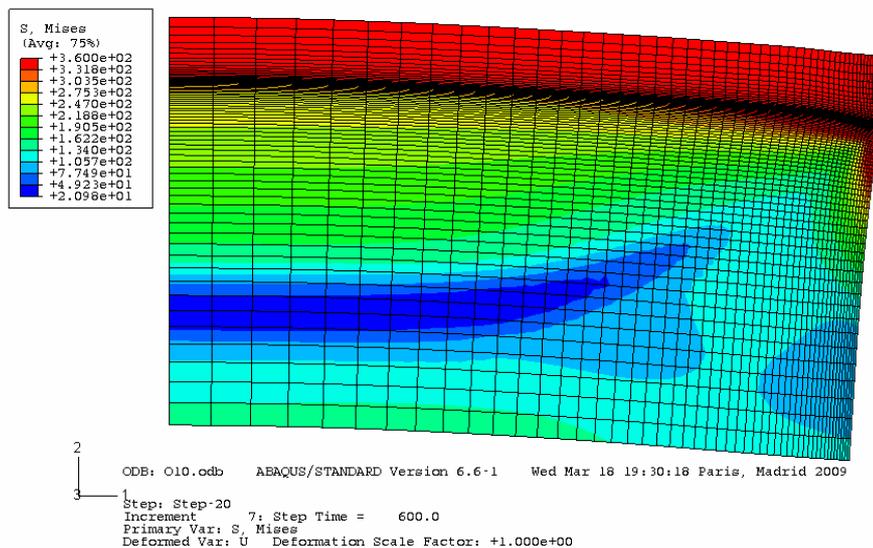
Figure VI.5 : Courbe de la flèche (a) pour un cycle et (b) pour 10 cycles.

Les courbes de la flèche nous donnent une répartition ou plutôt un champ des contraintes concentrées sur le bord. La courbure de la pièce (figure VI.6) sert à montrer que sous l'effet des contraintes on peut avoir cette déformation : tension sur la face supérieure et compression sur la face inférieure.

Le nombre du cycle augmente la déformation de la pièce donc les contraintes résiduelles deviennent importantes ce qui explique par la suite la dégradation de notre matériau et la décohésion totale de revêtement réalisé.

- **Cartographies de la flèche**

Fleche-1cycle :



Fleche-10cycles :

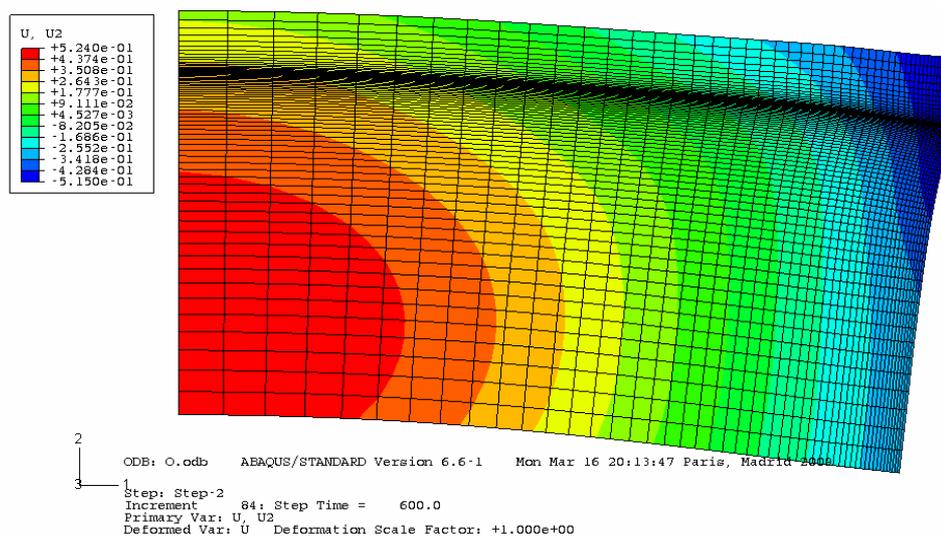


Figure VI.6 : Cartographies de la flèche pour un et dix cycles de fatigue.

Les deux cartographies isothermes montrent la concentration des contraintes thermiques au niveau du bord de la pièce au cours de refroidissement lent.

VI.5.2 Les contraintes résiduelles

L'analyse des contraintes résiduelles a été faite sur le bord libre et le milieu de l'échantillon (selon la direction 1 et 2 sur la figure VI.2) à l'aide de la méthode de diffraction des rayons X.

- **Méthode de diffraction des RX**

Les méthodes de diffraction des rayons X et de neutrons sont très utilisées pour déterminer les contraintes résiduelles dans le cas des matériaux cristallins et polycristallins, de l'assemblage de matériau organique/inorganique et pour les matériaux organiques contenant des charges cristallines.

Le principe de ces méthodes revient à mesurer les variations du déplacement aux raies de diffraction correspondant à la famille de plans (hkl) et de relier ce déplacement aux contraintes par la loi de Hooke en élasticité linéaire [43,52].

Le principe est de prendre comme jauge de déformation la distance d_{hkl} entre les plans cristallographiques (hkl) du réseau cristallin. En fonction de l'orientation de ces plans, la présence d'un champ de contraintes va se traduire par une variation des distances inter réticulaires notée Δd . Cette variation Δd est calculée par différenciation de loi de Bragg ($\lambda = 2 \cdot d \sin \theta$). Il s'en suit l'estimation de la déformation (ε) [50]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = -\Delta \theta \cdot \cot \theta \quad (\text{VI.8})$$

Avec :

ε : Déformation.

θ : Angle de Bragg.

Cette relation montre que la mesure de la déformation se fait à partir de la détermination de déplacement angulaire ($\Delta \theta$), c'est-à-dire du déplacement des raies de diffraction correspondant à la famille de plans (hkl) déformés.

La méthode par diffraction des neutrons est similaire à celle des rayons X. Cette méthode correspond à une mesure dite en volume car la profondeur examinée est plus grande que celle en rayons X. Elle nécessite une durée de mesure importante. La technique par diffraction des neutrons est encore en voie de développement [50].

- **Courbes des contraintes résiduelles**

Les résultats obtenus sont représentés sur les figures VI.7, 8, 9 et 10. Ces courbes illustrent respectivement la variation des contraintes résiduelles parallèles (σ_{xx}) et de cisaillement (σ_{xy}) de multimatériau et perpendiculaires (σ_{yy}) et (σ_{zz}) en fonction de la distance à la surface extérieure. Les mesures ont été ôté au bord et sur le coté de l'échantillon.

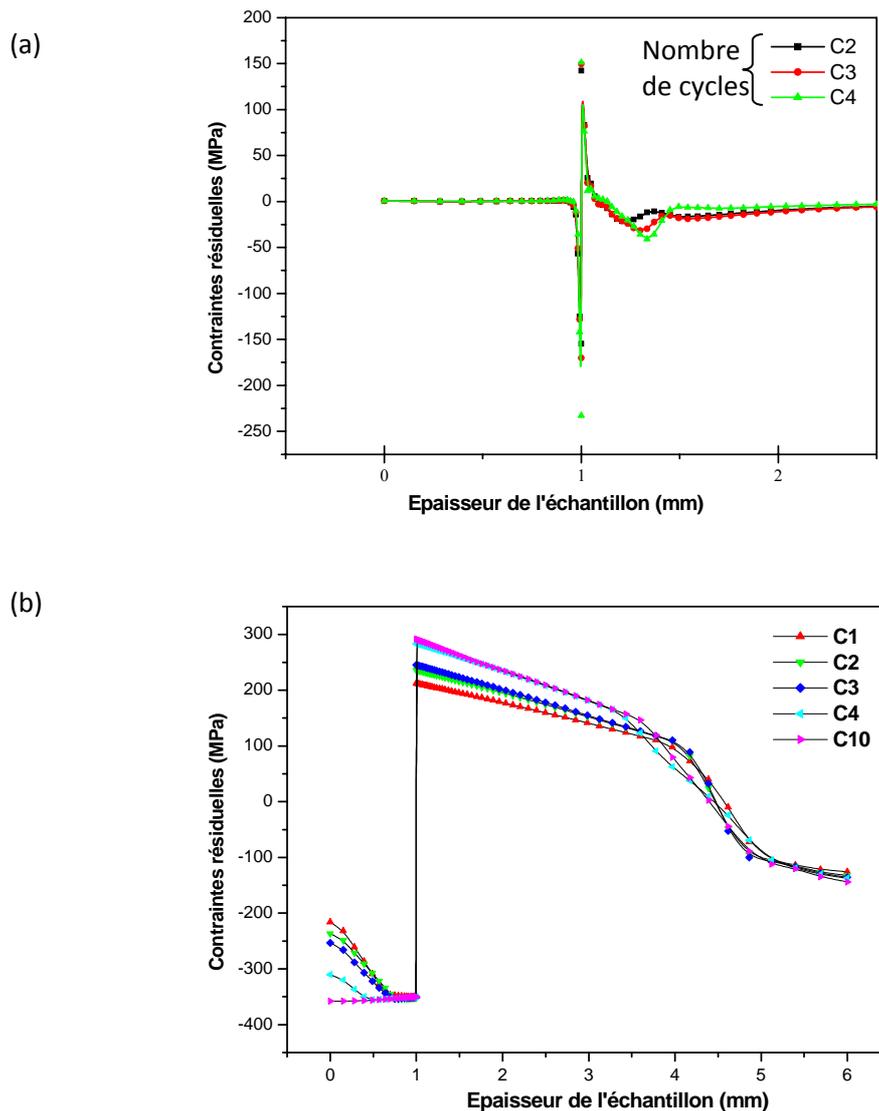


Figure VI.7 : Variation des contraintes parallèles σ_{xx} en fonction de l'épaisseur de l'échantillon pour différent nombre du cycle (a) au milieu et (b) au bord de la pièce.

L'analyse de la figure V.7 montre que, les contraintes résiduelles parallèles σ_{xx} sont fortement localisées au niveau de l'interface. Ces contraintes sont positives dans le métal de base (AU4G) et négatives dans le revêtement.

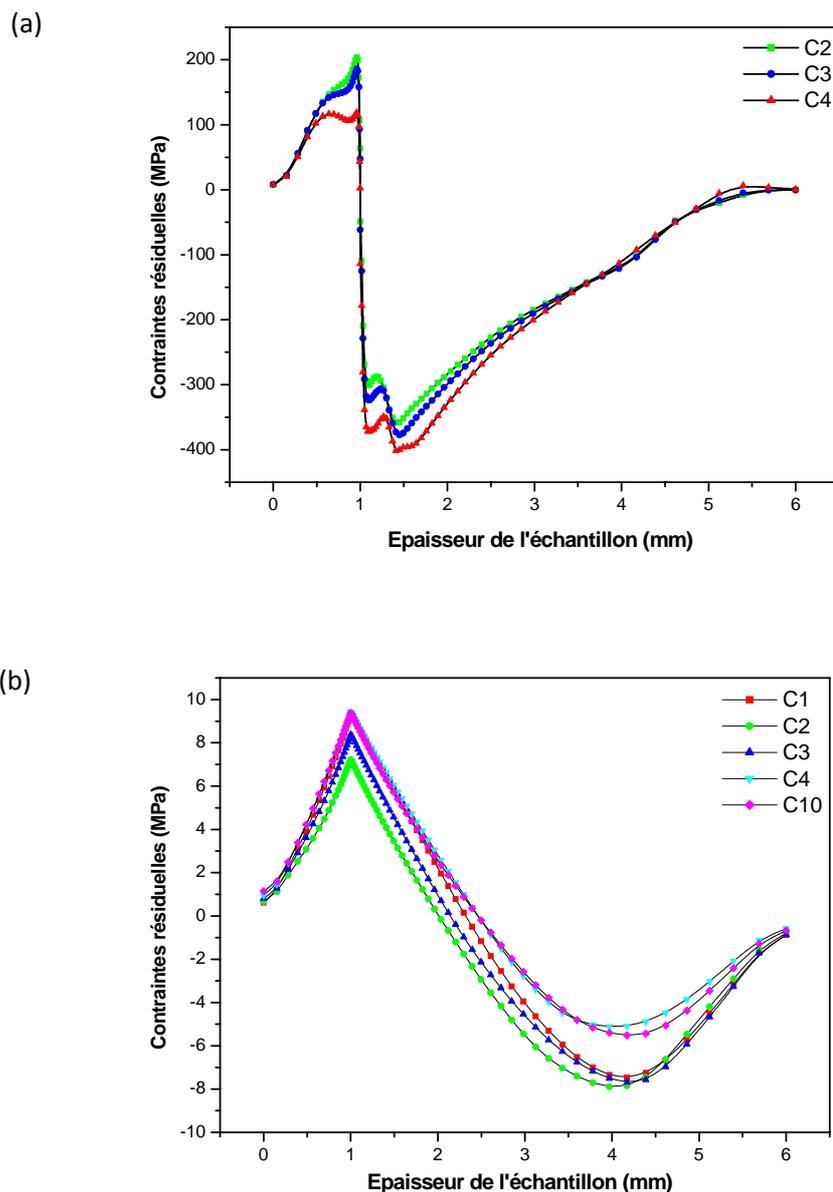


Figure VI.8 : Variation des contraintes normales σ_{yy} en fonction de l'épaisseur de l'échantillon pour différents nombres de cycle (a) au bord et (b) au milieu de la pièce.

Sur les figures VI.8 nous avons représenté la variation des contraintes résiduelles normales σ_{yy} dans notre composite. Notons que ces contraintes ont été déterminées perpendiculairement à l'interface, elles ont une allure différente à celle des contraintes résiduelles parallèles, car, le matériau de base a des tensions internes négatives et positives pour le revêtement.

L'amplitude des contraintes résiduelles normales est très forte au bord de l'échantillon, ces contraintes peuvent créer un risque d'endommagement des multimatériaux [49-52]. Ce comportement est observé pour toute direction.

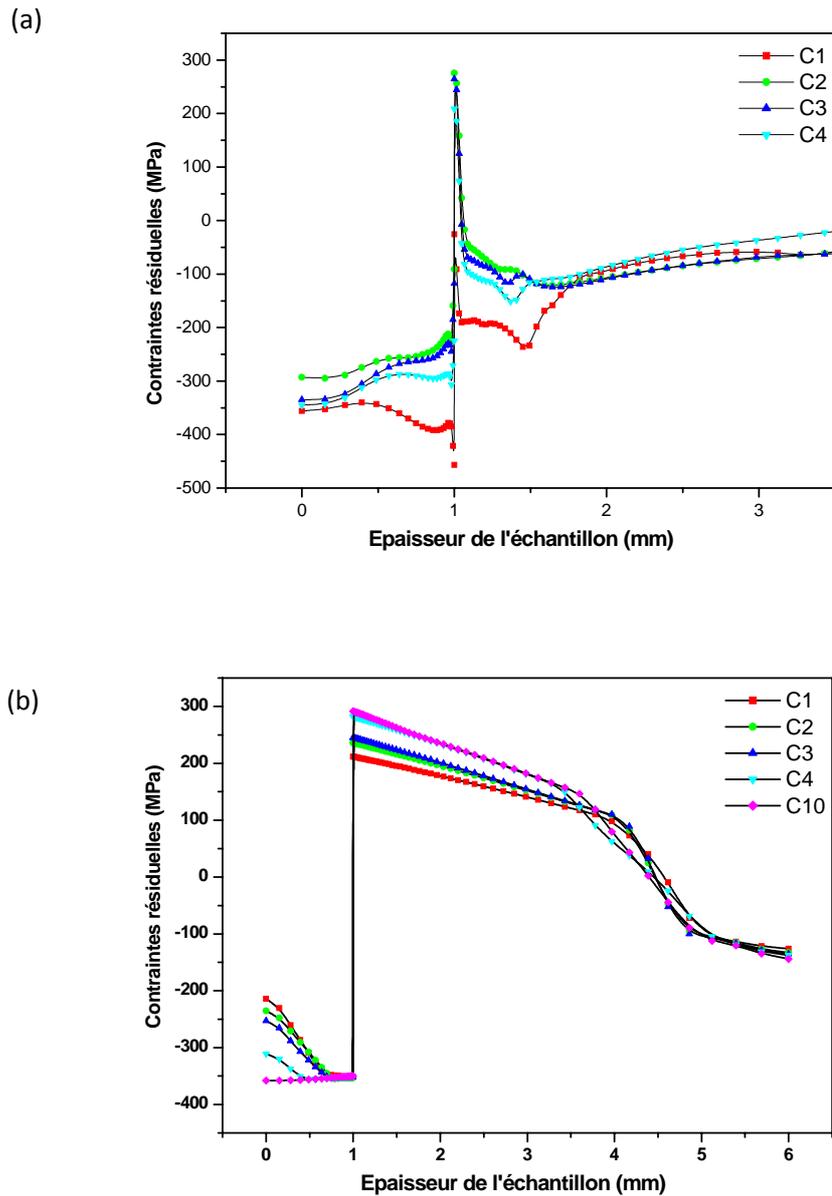


Figure VI.9 : Variation des contraintes résiduelles σ_{zz} en fonction de l'épaisseur de l'échantillon pour différents nombres de cycle (a) au bord et (b) au milieu de la pièce.

La figure VI.9.a prouve que les contraintes résiduelles σ_{zz} sont semblables avec les contraintes résiduelles parallèles σ_{xx} , les tensions au bord de l'éprouvette sont négatives pour les deux matériaux.

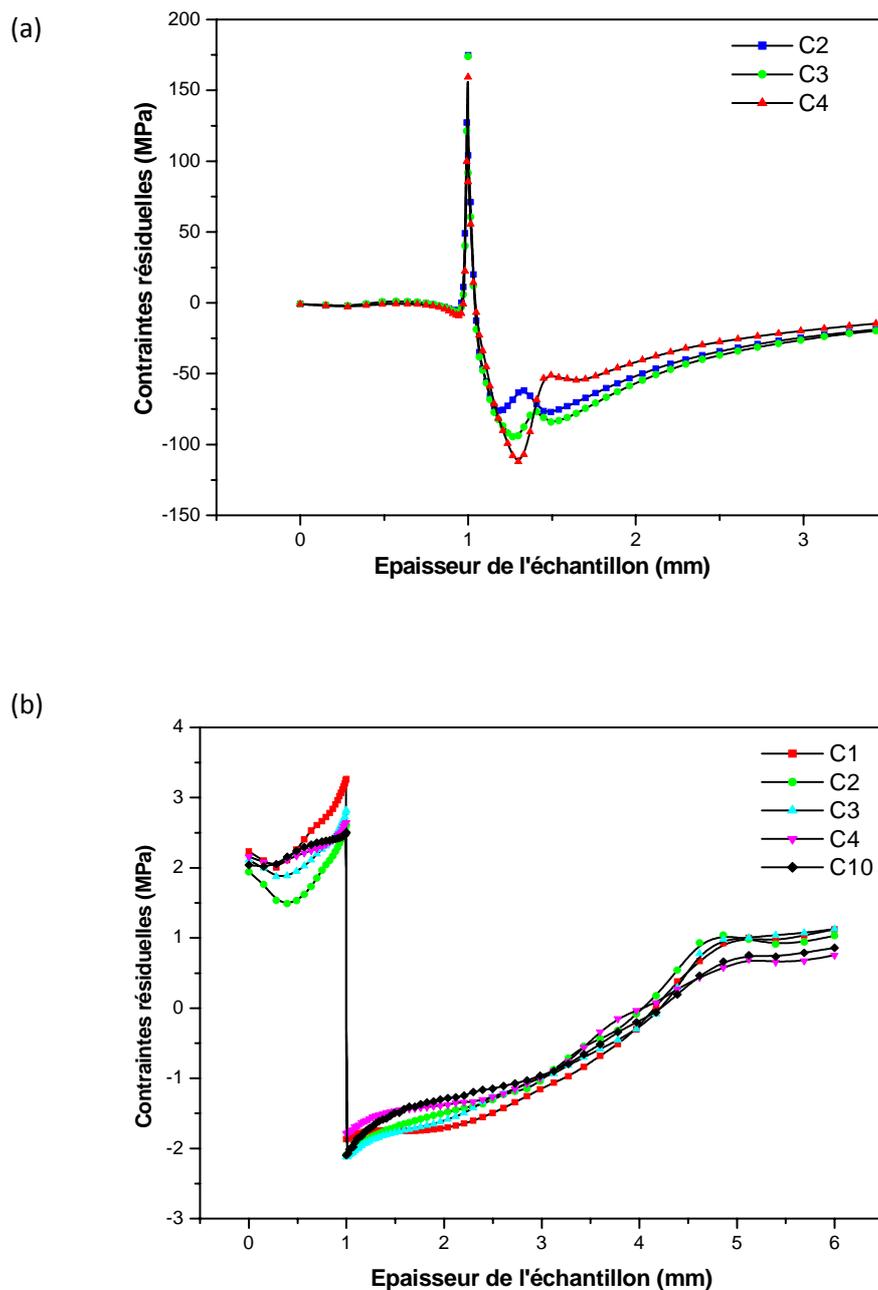


Figure VI.10 : Variation des contraintes de cisailment σ_{xy} en fonction de l'épaisseur de l'échantillon pour différents nombres de cycle (a) au bord et (b) au milieu de la pièce.

Pour une analyse complète des états de contraintes résiduelles planes, nous avons déterminé la distribution des contraintes de cisailment σ_{xy} . Les résultats obtenus sont représentés sur la figure VI.10. L'amplitude des contraintes est un peu faible par rapport aux contraintes résiduelles parallèles et normales. Cette amplitude est plus forte au bord de l'éprouvette.

VI.6. Constatations et remarques

Les figures de la flèche et cartographies isothermes montrent que les contraintes résiduelles d'origine thermique sont accumulées au bord du composite.

Les figures des contraintes résiduelles, qu'elles soient normales, parallèles, de cisaillement ou selon l'axe (oz), affirment que les contraintes sont plus concentrées au bord de la pièce que dans les autres zones.

Lors du cyclage thermique du multimatériau, les contraintes ont tendance à augmenter en fonction du nombre de cycle au niveau de l'interface substrat/revêtement. Cela peut être expliqué par la fatigue du multimatériau ou par le fait qu'à un certain nombre de cycle on a une initiation de la fissure au niveau du bord et plus exactement à l'interface, qui provoque la relaxation des contraintes. Donc la simulation réalisée nous a permis de dire qu'après un certain nombre de cycle la rupture se produira. Pour valider les résultats expérimentaux, on doit imaginer une loi de rupture qui nous permettra par la suite de comparer les résultats, afin d'approuver notre modèle théorique pour une meilleure simulation.

L'intensité des contraintes résiduelles et leur localisation près de l'interface dépendent de plusieurs facteurs [43]:

- la rugosité de la surface du contact de l'assemblage.
- les modules de Young des deux matériaux en présence.
- la différence des coefficients de dilatation thermique des matériaux à assembler. Ainsi que les autres paramètres thermiques tels que la conductivité thermique et la chaleur spécifique des deux matériaux.
- l'épaisseur du revêtement.

CONCLUSION GENERALE
&
PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

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

Les revêtements métalliques, en particulier ceux réalisés par projection, apportent des solutions efficaces aux problèmes d'usure par fatigue thermique. Les couches projetées constituent une barrière thermique protectrice du matériau de base.

L'adhérence entre le matériau protecteur et le métal de base reste un problème pour les multimatériaux. Afin de garantir cette adhérence, nous avons fait plusieurs démarches : le sablage du substrat, le décapage pour éliminer la couche d'alumine produite naturellement sur les alliages d'aluminium, la déposition d'une fine couche (métallisation par Zn, Ni et Ni-Zn) afin de protéger le substrat avant la projection thermique et en fin l'utilisation d'une couche d'accrochage.

Les caractérisations en microscopie optique et électronique nous ont permis de constater que :

- le revêtement comporte des pores, des particules non fondues, des microfissures et des oxydes. La porosité provient soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1% à 25% suivant les paramètres de projection et les matériaux utilisés.
- les surfaces rugueuses augmentent l'ancrage mécanique substrat/dépôt par la croissance de l'aire de contact.
- le bon accrochage AU4G-Zn/dépôt et AG3-Ni/dépôt est noté.
- que ce soit les 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 les couches chimiques du décapage de Zinc, de Nickel ou de Zinc-Nickel.

Les mesures de la microdureté Vickers confirment que, la surface spécifique subissant les sollicitations thermiques, a acquis de nouvelles propriétés mécaniques.

Pour limiter l'endommagement d'une pièce mécanique qui subit une fatigue thermique et augmenter sa durée de vie, la connaissance des contraintes thermiques générées lors de son fonctionnement est nécessaire. Pour cette raison, nous avons opté pour une modélisation du comportement thermique, en calculant les contraintes résiduelles engendrées dans notre système.

La simulation numérique par éléments finis est un outil puissant dont l'utilisation doit permettre la prédiction de la répartition spatiale des contraintes résiduelles lorsque les méthodes analytiques sont inefficaces.

Les contraintes planes déterminées dans cette étude ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}$), lorsque le multimatériau reçoit un cyclage thermique, ne cessent pas d'augmenter en fonction du nombre de cycle au niveau de l'interface substrat/revêtement. La relaxation des contraintes résiduelles au niveau de l'interface provoque la rupture du multimatériau après un certain nombre de cycle, ce qui explique la fatigue du composite.

Les contraintes résiduelles intenses et leur localisation près de l'interface dépendent de plusieurs paramètres tels que la rugosité, les modules de Young des deux matériaux, la différence des coefficients de dilatation thermique des matériaux à assembler, l'épaisseur du revêtement (une couche plus épaisse conduit à une plus grande dilatation, ce qui génère des contraintes résiduelles plus élevées) ainsi que les autres paramètres thermiques comme la conductivité thermique et la chaleur spécifique des deux matériaux.

Perspectives :

Les résultats expérimentaux de la fatigue thermique sont nécessaires, pour imaginer une loi de comportement, qui nous permettra par la suite de valider les différents résultats obtenus. Ceci nous aidera à approuver notre modèle théorique pour réussir une meilleure simulation.

Compléter notre étude, en tenant compte, des simplifications prises au cours de ce travail, qui sont indispensables pour affiner les résultats de calculs.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] M. KHADHRAOUI, L'assemblage par collage, INFO CARMA N° : 06, région Provence-Alpes-Côte d'Azur, juin 1998.
- [2] G. LIU, Modélisation de l'essai d'indentation interfaciale en vue de caractériser l'adhérence de revêtements projetés thermiquement, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2005.
- [3] L. HORRI-NACEUR, Adhérence de revêtements obtenus par projection thermique, thèse de doctorat, Université de LILLE 1, 1994.
- [4] S. BARRADAS, Etude à l'aide du choc laser des mécanismes d'adhérence aux interfaces cuivre/aluminium et cuivre/cuivre obtenues par projection thermique, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2004.
- [5] A. BOUKAMEL, Mode d'emploi d'un outil de simulation numérique, INFO CARMA N° : 06, région Provence-Alpes-Côte d'Azur, juin 1998.
- [6] A. ZEGHLOUL, Mécanismes d'endommagement des structures, Master Sciences et Technologies, Université de METZ, 2005.
- [7] D. SPERA, D. MOWBRAY, Thermal fatigue of materials and components, 1976.
- [8] S.MANSON, Les contraintes d'origine thermique, Editions Dunod, Paris, 1967.
- [9] K.OURARI, Evolution microstructurale et mécanique d'un acier allié au chrome-molybdène-vanadium (Z160CDV12) en conditions de fatigue thermique, Thèse de magister, ENP, 2001.
- [10] I.VIRKKUNEN, Thermal fatigue of austenitic and duplex stainless steel, These of Doctor of Science, Helsinki University of Technology, 2001.
- [11] M.E.DJEGHLAL, Contribution à l'étude du comportement en fatigue et en choc thermique d'une fonte à graphite sphéroïdale en fonction de la structure de la matrice et des éléments d'alliages, Thèse de magister, USTHB, 1990.
- [12] R.K.SHIUEM, C.T.CHANG, M.C. YOUNG et L.W.TSAY, The effect of residual stresses on the fatigue crack growth of laser-surface-annealed AISI 304 stainless steel Part I: computer simulation, Materials Science & Engineering A, pp 101-114, 2004.
- [13] S. BOUFLIGHA, Comportement en cyclage thermique de l'interface du matériau composite 55E+65E/35CD4 réalisé par projection thermique, Thèse de magister, ENP, 2000.

Références bibliographiques

- [14] V.MAILLOT, A.FISSOLO, S.DAGALLAIX, G.DEGALLAIX, Obtentions et observations de réseaux de faïençage par fatigue thermique, XVème Congrès Français de Mécanique, Nancy, Septembre 2001.
- [15] C. BATHIAS, J.P. BAÏLON, La fatigue des matériaux et des structures, Maloine S.A éditeur Paris, 1980.
- [16] 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
- [17] A.CORNET, .P.DEVILLE, Physique et ingénieur des surfaces, Edition EDP Sciences 1998
- [18] M. DOCUS, Revêtement par projection thermique, Techniques de l'Ingénieur, M1645, 2005
- [19] 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.
- [20] CETIM, Guide d'emploi de la projection thermique, 1989.
- [21] R. BENSIMON, Guide d'emploi de la projection à chaud en mécanique, CETIM 1977
- [22] E. WEIDMANN, A. GUESNIER, Préparation métallographique des revêtements par projection thermique. Notes d'application, Struers A/SDenmark, 2004.
- [23] N. MESRATI, Q. SAIF, D. TREHEUX, Projections plasma de zircone sur différents substrats métalliques. IIème Conférence Franco-Allemande sur les Céramiques Techniques, 4-6 mars 1987, Aachen/Aix-la-Chapelle (RFA).
- [24] M. LARIBI, Caractérisation et modélisation métallurgique et mécanique de matériaux à gradients fonctionnels réalisés par projection thermique, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2003
- [25] La projection thermique Marché et domaines sectoriels, Cahier de l'ingénieur, Mars98.
- [26] N. MESRATI, M. LARIBI, 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° :01, 1994, pp 169-182.

Références bibliographiques

- [27] N. MESRATI, M. LARIBI, D. NGUYEN, D. TREHEUX. Elaboration par projection thermique et caractérisation d'interface métal/métal et métal/céramique. A.J.O.T vol 12, N° :01, 1997, pp. 91-103.
- [28] C.DEHMAS. Etude de l'influence des postes de traitement sur l'adhérence et le comportement mécanique d'un multimatériau réalisé par projection thermique. Projet de fin d'études, ENP 1994.
- [29] K.L. MITTAL, Adhesion measurement of thin films, Materials Science and Engineering, Vol.28, Issue 1, April 1977, p. 165.
- [30] H. WEISS, Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment, Surface and Coating Technology, 1995.
- [31] V.V. SOBOLEV, J.M. GUILMANY, J. NUTTING et al., Development of substrate coating adhesion in thermal spraying, International Materials Reviews, 1997.
- [32] A. A. VOLINSKI, N.R. MOODY, W.W. GERBERICH, Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Acta Materialia, 2002.
- [33] 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.
- [34] S.Y SHIN, M.W KO, D.C CHO et al., Microstructure and mechanical properties of Al6061 joints diffusion brazed using Cu interlayer, Journal of Materials Science Letters, 2002.
- [35] F. BAHBOU, P. NYLEN, G. BARBEZAT, A parameter study of the Protal® process to optimise the adhesion of Ni5Al coatings, Advances in Technology and Application, Materials Park, U.S.A., OH, 2004.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] E.DARQUE-CERETTI, E. FELDER, Adhésion et adhérence, Sciences et Techniques de l'Ingénieur, CNRS Edition, 2003.

Références bibliographiques

- [40] 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.
- [41] E. SILVERI, E .CHASSAING, S.B. GORYACHEV, Problèmes de mesure d'adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique, Journal de Physique IV, 2003.
- [42] M. LARIBI, contraintes résiduelles, cours pour poste graduation (PG), Ecole Nationale Polytechnique, 2005.
- [43] V. GUIPONT, Détermination expérimentale de contraintes résiduelles au sien d'assemblages Céramique/Métal réalisés par brasage : application au couple nitrure de silicium/acier doux, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon 1994.
- [44] A. SADKI, Etude de la protection du matériau aéronautique AU4G, Mémoire de magister, ENP, 1998.
- [45] P. DEMARECAUX, Adhérence et propriétés tribologiques de revêtements obtenus par projection thermique hypersonique. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 1995.
- [46] D. DALMAS , Adhérence et propriétés mécaniques des dépôts obtenus par projection thermique : application de l'émission acoustique à l'étude des modes d'endommagement. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2001.
- [47] S. BEAUVAIS, Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [48] S. NOUROUZI, Contribution à l'étude du procédé Arc-Fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive, thèse de doctorat, université de Limoges, 2004.
- [49] M.L.Hattali, S.Valette, F.Ropital, N.Mesrati, D.Treheux, Effect of thermal residual stresses on the strength for both alumina/Ni/alumina and alumina/Ni/nickel alloy biomaterials, J Mater Sci, DOI 10.1007/s10853-009-3426-7, 2009.
- [50] I.C. NOYAN, T.C. HUANG, B.R. YORK, Residual stress/strain analysis in thin films by X-ray diffraction. Critical reviews in solid State and Materials Sciences, 20-2, 1995. (Méthode RX)
- [51] D.B. MARSHALL, A.G. EVANS, Measurement of adherence of residually stressed thin films by indentation-I. Mechanics of interface delamination. J. Appl. Phys., 56, 1984.
- [52] P. ARAUJO, D. CHICOT, M. STAIA, J. LESAGE, Residual stresses and adhesion of thermal spray coatings. Surface Engineering 21-1 (2005).