

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

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Mémoire de Fin d'Etudes
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en

Métallurgie

COMPORTEMENT EN CYCLES THERMIQUES DE
L'INTERFACE DES MULTIMATERIAUX
25CrMo4/75E/55E ET 30NiCr11/75E/55E
REALISES PAR PROJECTION THERMIQUE

Proposé par :

Pr. N. MESRATI

Dirigé par :

Mme. N. KECHOUD

Réalisé par :

Mr .N.DORBANI

Promotion juin 2010

ENP: 10 Avenue Hassen Badi 16200 EL-Harrach, Alger

ملخص

في هذه الدراسة قمنا بتلبيس عن طريق الشعلة الحرارية (القوس الكهربائي)، المادة المعدنية المركبة (55E+75E) على نوعين من الفولاذ (25CrMo4) و (30NiCr11) من أجل تحسين مقاومتها ضد التآكل و الإلتلاف.

هدفنا في هذا العمل يتمثل في دراسة سلوك و مدى مقاومة طبقة التلاصق للمركبين (25CrMo4/75E/55E) و (30NiCr11/75E/55E) إزاء التغيرات في درجة الحرارة و مدى قدرتها على مواجهة الإرهاق الحراري. مما أوجب علينا استعمال تقنيات فيزيوكيميائية في التحليل، التي بدورها تمكننا من متابعة التغيرات التي طرأت على طبقة الالتحام وذلك تحت تأثير الشروط المحددة , مما سمح لنا بملاحظة التحام جيد.

الكلمات المفتاحية: الشعلة الحرارية، الإرهاق الحراري، الإلتحام، الترمانيت، 25CrMo4، 30NiCr11.

Résumé

Nous avons élaboré les deux multimatériaux **25CrMo4/75E/55E** et **30NiCr11/75E/55E** par la technique de la projection thermique. Le revêtement utilisé, 55E, possède des caractéristiques réfractaires qui lui confèrent une bonne résistance à l'oxydation, à la fatigue et la corrosion à hautes température. Ces multimatériaux sont ensuite soumis à un cycle thermique, chauffage et refroidissement à l'air, pour suivre le comportement de leur interface dépôt/ substrat vis-à-vis de ces sollicitations.

A l'aide de techniques d'analyses non destructives et destructives nous avons étudié la tenue en fatigue thermique de l'interface de ces multimatériaux dans des conditions bien déterminées, ceci nous a permis de constater une bonne adhérence.

Mots clés : Projection thermique, multimatériaux, 25CrMo4, 30NiCr11, Thermanit, fatigue thermique, adhérence.

Abstract

In this work, we have synthesized two multimaterials **25CrMo4/75E/55E** and **30NiCr11/75E/55E** realized by thermal projection technique. The combination of 55E and 75E materials gives to the coating obtained interesting properties such as oxidation, fatigue and high temperature corrosion resistance.


Our study consists particularly on the determination of the interface layer/substrate behavior under cyclic thermal solicitations.

In this way, physico-chemical (destructive and non-destructive), analysis techniques have been used to determine decohesion conditions, this allowed us to note a good adhesion.


Key words: Thermal projection, Thermal fatigue, Adhesion, multimaterials, 25CrMo4, 30NiCr11, Thermanit.

Dédicace

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

 *Aux meilleurs parents du monde ;*

 *A mes frères, mes sœurs et mes neveux et nièces ;*

 *A toute ma famille ;*

 *A mes biens chers amis ;*

 *A tous ceux qui font avancer le monde...*

Nedjmeddine Dorbani

Remerciements

Qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma profonde gratitude en premier lieu à Dieu le Tout Puissant de m'avoir créé et donné toute la force nécessaire pour accomplir ce modeste travail et ensuite à mes Parents qui me sont les plus chers au monde.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes deux encadreurs Mme. N. KECHOUD et Mr. N.MESRATI, pour leurs conseils qui m'ont été précieux, ainsi que pour toutes les suggestions et remarques qu'ils ont formulées tout au long de ce travail.

Je suis honoré que Monsieur Mr. M. LARIBI ait accepté de présider mon jury. Je tiens à exprimer ma gratitude à Messieurs Mr. HELAL et Mr. KASSER qui ont accepté d'examiner et d'évaluer mon mémoire.

Je n'oublierai pas de remercier les enseignants de l'école nationale polytechnique, en particulier ceux du département de métallurgie, pour m'avoir offert un agréable cadre de formation.

Je tiens à remercier également tous les responsables et personnels de l'entreprise « Algérie Métallisation » de DAR-EL-BEIDA et aussi à toute l'équipe de recherche du « Centre de soudage et de contrôle » de CHERAGA, pour leur immense dévouement et leur contribution à l'avancée de ce travail.

Je remercie également mes collègues de l'ENP, ainsi que tous mes amis de la cité universitaire Bouraoui.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail trouve ici l'expression de mes vifs remerciements et ma profonde gratitude.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Traitement de Surfaces et Projection Thermique	
I.1. Introduction	2
I.2. Les revêtements	2
I.3. La projection thermique	3
I.3.1. Principe général de la projection thermique.....	4
I.3.2. Les techniques de la projection thermique.....	5
I.3.2.1 Projection à flamme-poudre	5
I.3.2.2. Projection à flamme-fil.....	6
I.3.2.3. La projection plasma.....	8
I.3.2.4. La projection à arc électrique entre deux fils	9
I.3.3. Comparaison des procédés.....	11
I.3.4. Matériaux utilisés et caractéristiques des matériaux projetés	13
I.3.5. Formation de dépôt	14
I.3.6. Les différentes caractéristiques des revêtements	15
Chapitre II : Multimatériaux	
II.1. Introduction.....	17
II.2. Les multimatériaux	17
II.3. Les problèmes des multimatériaux	19
II.3.1. Adhérence	19
II.3.1. 1. Définition.....	19
II.3.1.2. Phénomènes à l'origine de l'adhérence	19
II.3.1.3 Méthodes de mesure de l'adhérence	23

Chapitre III : FATIGUE THERMIQUE

III.1. Introduction	26
III.2. La fatigue thermique	26
III.3. Contraintes thermiques résiduelles	26
III.4. Les mécanismes de la fatigue thermique	27
III.5. Les fissurations d'origine thermique.....	29
III.5.1 Amorçage des fissures	29
III.5.2. Propagation des fissures.....	30
III.6. Facteurs de la fatigue thermique	31
III.6.1 Nature du cycle thermique	31
III.6.2 Facteurs thermiques	32
III.7. Rupture interfaciale des multimatériaux	32

Chapitre IV: Techniques expérimentales

IV.1 Introduction.....	34
IV.2. Matériaux utilisés	34
IV.2.1. Substrats.....	34
IV.2.2. les éprouvettes.....	35
IV.2.3. Sous couche d'accrochage	35
IV.2.3. Matériau de revêtement.....	35
IV.3. La projection thermique.....	36
IV. 3.1. Préparation des éprouvettes et projection	36
IV.3.1.1.Préparation de la surface à revêtir.....	36
IV.3.1.2. Pistolet de la projection Thermique	36
IV.3. 1.3. Paramètres de la projection.....	38
IV.3.1. 4. L'échantillon après le revêtement.....	39
IV.4. Fatigue thermique :	40
IV.4.1. Dispositif de la fatigue thermique.....	40
IV.4.2. Les Conditions de Traitement.....	41

IV.5. TECHNIQUES D'ANALYSE.....	43
IV.5.1. Caractérisation par technique des ultra-sons.....	43
IV.5.2. Analyse micrographique et microdureté.....	45
IV.5.2.1. Préparation des échantillons.....	45
IV.5.2.2. Observations par microscopie optique.....	46
IV.5.2.3 Mesure de la microdureté.....	47

Chapitre V: Résultats et interprétations

V.1. Introduction	48
V.2. Le contrôle par ultra-sons	48
V.3. Observations en microscopie optique des multimatériaux 25CrMo4/75E/55E et 30NiCr11/75E/55E	53
V. 4. Microdureté des multimatériaux 25CrMo4/75E/55E et 30NiCr11/75E/55E	57
Conclusion Générale	60
Références Bibliographiques	61
Annexes I : Diagramme d'équilibre Fe-C métastable.....	64

Liste des Figures

Figure I.1: Place de la projection thermique dans les traitements de surface.....	3
Figure I.2: Organigramme de la projection thermique.....	4
Figure I.3 : Le procédé de projection thermique.....	5
Figure I.4 : Schéma du procédé de projection par flamme.....	5
Figure I.5 : Pistolet de projection par flamme.....	6
Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil.....	7
Figure I.7 : Pistolet de métallisation.....	7
Figure I.8 : Représentation schématique de la projection plasma.....	9
Figure I.9: Schéma du dispositif de projection à l'arc électrique.....	10
Figure I.10 : Mécanismes d'écrasement des particules.....	14
Figure I.11 : L'adhésion mécanique sur un substrat sablé.....	16
Figure II.1 : Revêtement monocouche.....	18
Figure II.2 : Revêtement bicouche.....	18
Figure II.3 : Revêtement multicouche.....	18
Figure II .4 : Goutte de liquide sur un solide lisse - Définition de l'angle de mouillage.....	21
Figure II .5 : Illustration de l'accrochage mécanique.....	22
Figure II.6 : Principe de l'essai d'adhérence par plot-collé.....	23
Figure II.7 : Schéma des étapes de (a) gonflement et de (b) décollement de l'essai "bulge test"	24
Figure II.8 : Allure d'une courbe de gonflement-décollement.....	24

Liste des figures

Figure III.1 : Mécanisme de la fatigue thermique, diagramme de NORTH COTT et BARON.....	28
Figure III.2: Mécanisme d'amorçage des fissures sous contrainte thermique cyclique.....	30
Figure III.3 : Rupture de l'interface d'un bi-matériau.....	33
Figure III.4 : Variation en volume d'un multimatériau ayant subi des cycles.....	33
Figure IV .1 : Dimensions de l'éprouvette étudiée.....	35
Figure IV.2 : Pistolet de projection à arc entre deux fils « ARC SPRAY 234».....	37
Figure IV.3 : Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique.....	37
Figure IV.4 : Evolution de la dureté en fonction de la distance de projection.....	39
Figure IV.5 : Forme finale de l'échantillon après revêtement.....	39
Figure IV.6 : Dispositif de la fatigue thermique.....	40
Figure IV.7 : Photographie du dispositif de la fatigue thermique utilisé.....	41
Figure IV.8 : Cycle thermique.....	42
Figure IV.9 : Sondage ultra sonore par immersion.....	44
Figure IV. 10 : Signaux ultrasonores.....	44
Figure IV. 11 : Découpage des échantillons.....	45
Figure IV.12 : Photographie du microscope optique utilisée.....	46
Figure IV. 13: Microduromètre SHIMATZU HVM-M3.....	47
Figure IV.14: Principe de l'essai de dureté Vickers.....	47

Liste des figures

Figure V .1 : Signaux ultrasonores de 25CrMo4/75E/55E	49
Figure V .2 : Signaux ultrasonores de 30NiCr11/75E/55E	50
Figure V.3: Courbe de variation de l'atténuation en fonction du nombre de cycles du multimatériau 25CrMo4/75E/55E.....	52
Figure V.4: Courbe de variation de l'atténuation en fonction du nombre de cycle du multimatériau 30NiCr11/75E/55E.....	52
Figure V.5 : Aspect des multimatériaux avec leurs différentes phases.....	54
Figure V.6 : Micrographies du multimatériau 25CrMo4/75E/55E.....	55
Figure V. 7: Micrographies du multimatériau 30NiCr11/75E/55E.....	56
Figure V.8 : L'évolution de la microdureté de multimatériau 25CrMo4/75E/55E en fonction de la profondeur et du nombre de cycles thermiques	58
Figure V.9 : L'évolution de la microdureté du multimatériau 30NiCr11/75E/55E en fonction de la profondeur et du nombre de cycles thermiques.....	58

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Propriétés du dépôt pour chaque procédé.....	12
Tableau IV.1 : Composition chimique de 25CrMo4 et 30NiCr11.....	34
Tableau IV.2 : Caractérisations mécaniques des aciers 25CrMo4 et 30NiCr11....	35
Tableau IV.3 : Composition chimique de la Thermanit.....	36
Tableau IV.4 : Paramètres de mise en service du pistolet.....	38
Tableau IV.5: Paramètres de projection.....	38
Tableau IV.6 : Paramètres de la fatigue thermique.....	42
Tableau V.1 : Valeurs de l'atténuation.....	51
Tableau V.2 : Valeurs de la microdureté.....	57

INTRODUCTION GENERALE

En raison de leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques et leur facilité de mise en forme, les aciers faiblement alliés occupent une place bien privilégiée dans l'industrie et particulièrement dans la métallurgie du fer. Cependant, leur utilisation pour la fabrication des pièces travaillant dans des conditions sévères (hautes températures.....) reste très limitée. L'effet des divers phénomènes agressifs tels que : la corrosion, la fatigue thermique et mécanique ainsi que l'usure peut provoquer l'endommagement de la pièce qui apparaît souvent à la surface ou se propager à l'intérieur de celle-ci.

Assurer la protection et la perfection des propriétés de surface, conduit souvent à une modification de celle-ci par l'apport d'un revêtement à base d'un autre matériau comme moyen de protection.

La technique de la projection thermique qui connaît actuellement un intérêt particulier, permet de résoudre ce genre de problèmes souvent complexes. Ce procédé permet d'une part, d'associer deux ou plusieurs matériaux conduisant à un nouveau multimatériau, et d'autre part de limiter l'usage des produits performants et chers. De plus, il offre la possibilité de projeter le matériau nécessaire pour une application donnée sur un matériau avec des propriétés en volume bien précises.

L'élaboration du multimatériau va sans doute créer des problèmes dont le principal est situé au niveau de l'interface du fait de l'énorme divergence des propriétés physico-chimiques et mécaniques des antagonistes du nouveau composite. Celles-ci nous incitent à bien prendre en charge cette interface qui en découle et son environnement. Pour ces différentes raisons, nous avons dans notre étude focalisé notre attention sur le comportement de cette dernière vis-à-vis de sollicitation thermique ce qui nous permettra de comprendre et de maîtriser les différents phénomènes gênants et responsable de la rupture.

Le présent rapport comporte deux grandes parties :

La première partie, partie bibliographique, traite de la projection thermique, des multimatériaux et de la fatigue thermique.

La deuxième partie, traite de notre travail expérimental. L'élaboration par projection thermique des multimatériaux **25CrMo4/75E/55E** et **30NiCr11/75E/55E**, la fatigue par cycles thermiques qu'ils subissent, et enfin leur caractérisation par différentes techniques. Les techniques d'analyses, non destructives et destructives, utilisées sont, les ultra-sons, l'observation par microscopie optique et la mesure de la microdureté.

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



ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE



Chapitre I :

Traitements de surfaces et Projection thermique

I.1. Introduction

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

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

I.2. Les revêtements

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

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

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

a. Les traitements à partir de vapeur ou gaz

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

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

- La projection thermique

c. Les traitements à partir de solution

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

d. Les traitements mécaniques

- Mathoplastie,
- Explosion.

I.3. La projection thermique

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

En effet, la projection thermique est un traitement de surface (Figure I.1) par voie sèche visant à améliorer les propriétés du matériau tel que la résistance à l'usure et au frottement, les propriétés thermiques, les propriétés électriques et la protection contre la corrosion [3].

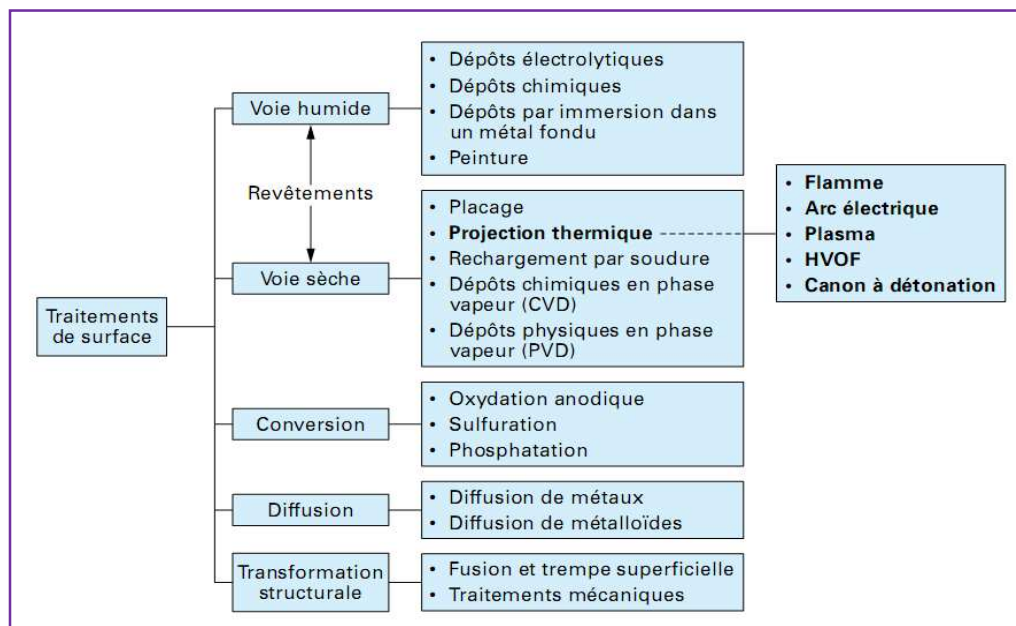


Figure I.1: Place de la projection thermique dans les traitements de surface [3].

Tous les systèmes de projection thermique utilisent un gaz vecteur servant à accélérer et transporter de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) d'un matériau fondu sur une surface à recouvrir. Les gouttelettes se déposent à la surface et se solidifient. C'est l'accumulation des particules sur le substrat qui crée le revêtement. Les liaisons entre le substrat et la couche déposée sont donc entièrement mécaniques. Le matériau à déposer peut être sous forme de poudre, fil ou baguette. L'apport d'énergie se fait de deux façons : la flamme et l'arc électrique [3].

La projection thermique occupe une place considérable dans le monde des traitements de surface. Son apparition date de 1909 grâce à l'invention de l'ingénieur suisse Schoop, portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme. Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'Aluminium). Dès 1914 des essais de projection par arc électrique furent réalisés [3].

Les procédés de projections thermiques peuvent être divisés en trois grandes catégories selon le type d'énergie qu'ils utilisent (Figure I.2) [4].

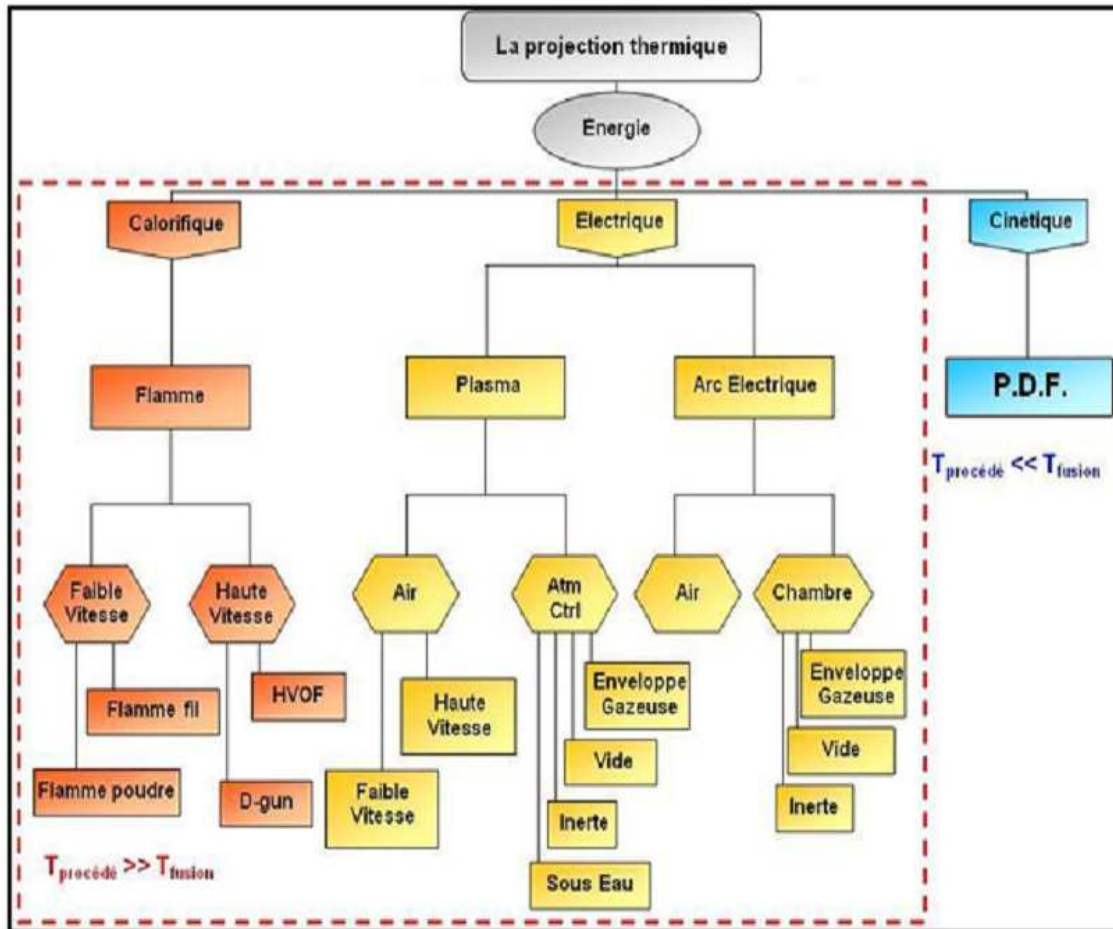


Figure I.2: Organigramme de la projection thermique [4].

I.3.1. Principe général de la projection thermique

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie.

- La surface de base ne subit ainsi aucune fusion.
- L'adhérence du dépôt est mécanique.

La matière à déposer, sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma). Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir (figure I.3) [3].

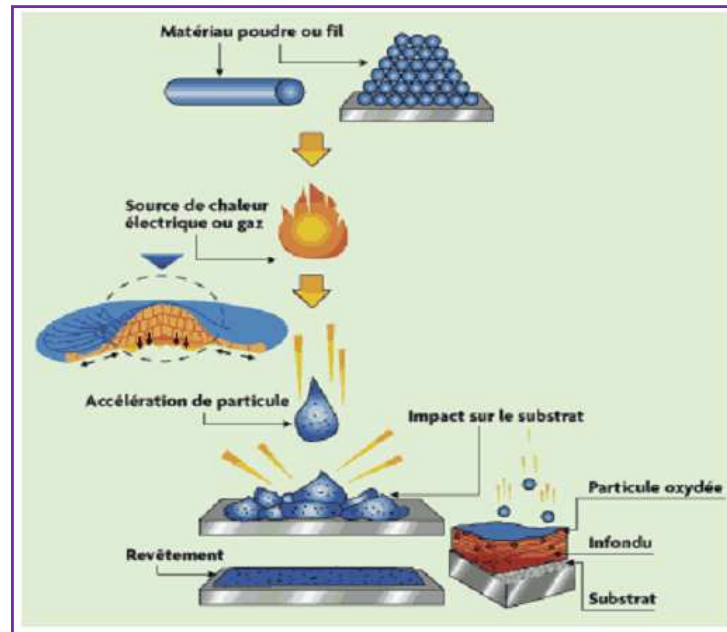


Figure I.3 : Le procédé de projection thermique [5].

I.3.2. Les techniques de la projection thermique

I.3.2.1 Projection à flamme-poudre

La projection flamme poudre est certainement le procédé le plus simple de tous les procédés de projection thermique. Il consiste à introduire une poudre à travers l'orifice central d'une buse-brûleur, la poudre fond et est entraînée par les gaz oxygène-carburant (généralement oxygène-acétylène ou oxygène-hydrogène) sur la pièce à revêtir. Ce système de projection est peu énergétique. Les revêtements réalisés par ce procédé contiennent un taux d'oxydes élevé ainsi qu'une forte porosité pouvant approcher 20%. La qualité des revêtements dépend aussi de la qualité des poudres. Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure suivante. L'utilisation de débit litres pour contrôler les débits de gaz est un facteur important (figure 1.4) [6].

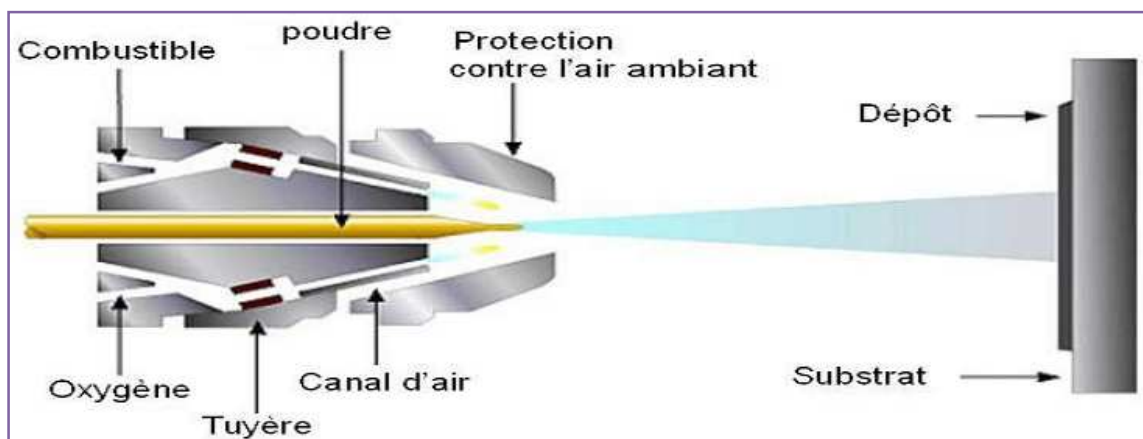


Figure I.4 : Schéma du procédé de projection par flamme [7].

Les pistolets de cette technique se différencient des précédents par leur puissance calorifique et par le fait que le substrat n'est pas chauffé par la flamme (figure I.5). 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...).

Les avantages des pistolets de projection flamme-poudre par rapport au pistolet de projection flamme fil sont liés à la plus grande variété de revêtements disponibles due au fait que la plupart des matériaux sont disponibles sous forme de poudres. Le procédé de projection flamme poudre est seulement limité par les matériaux qui ont une température de fusion supérieure à celle de la flamme ou alors dans le cas où le matériau projeté se décompose à la chaleur. Des revêtements de polymères peuvent aussi être réalisés par projection flamme (Figure I.5) [3].

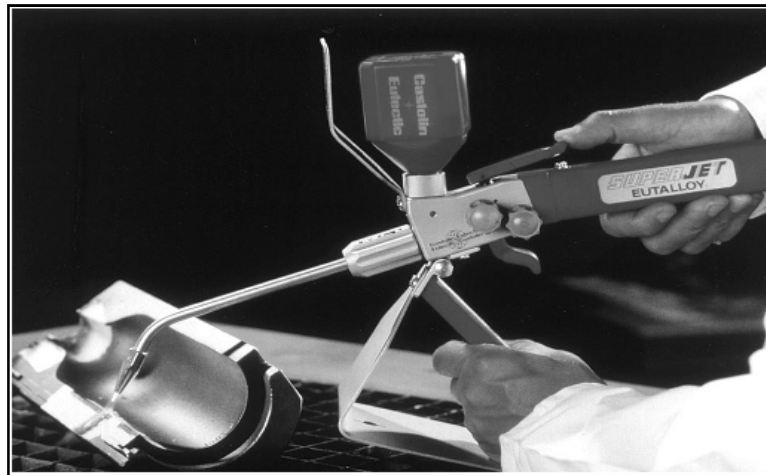


Figure I.5 : Pistolet de projection par flamme [3].

I.3.2.2. Projection à flamme-fil

La projection flamme fil, plus connue sous le nom de métallisation ou shoopage a été inventée en 1910 par la suisse Schoop qui a développé le premier pistolet de projection thermique de fils métalliques. L'appareil consistait en un brûleur dans lequel un carburant, acétylène ou hydrogène, était mélangé avec de l'oxygène pour créer une flamme en sortie de tuyère de brûleur. Un jet d'air comprimé entourant la flamme atomisait et propulsait le métal fondu. La continuité du procédé dépendait de l'approvisionnement du fil dans la flamme avec une vitesse contrôlée de façon à le fondre et le projeter avec un flux continu (figure I.6) [6].

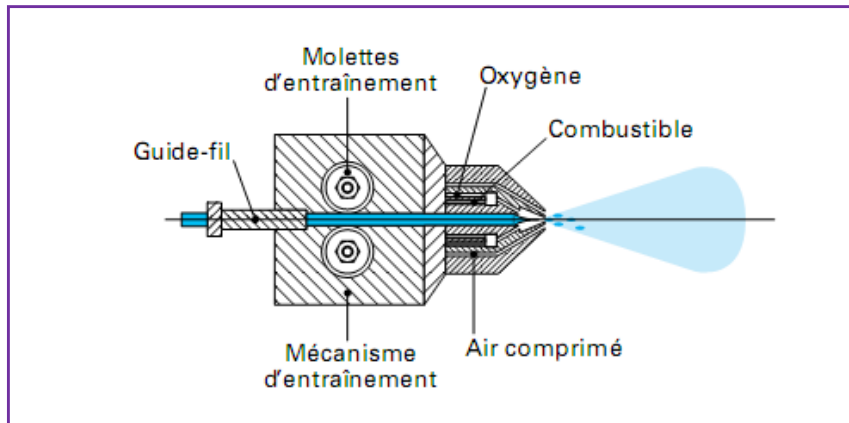


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil. [3]

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

- une partie chalumeau dans laquelle le matériau d'apport est fondu et pulvérisé.
- une partie entraînement de fil [3].

La partie chalumeau comprend un mélangeur de gaz, une buse à gaz, une buse à air. Elle est alimentée par les mêmes gaz que ceux utilisés en projection poudre (oxygène + gaz combustible), auxquels s'ajoute l'air comprimé servant à la pulvérisation du matériau d'apport fondu. Des buses à gaz différentes permettent l'utilisation de gaz tels que acétylène, propane ou tétrène par exemple, alors que différentes buses à air modifient l'aspect et les caractéristiques du dépôt. De même, des rallonges, à jet droit ou à jet dévié, autorisent les dépôts dans des alésages ou dans des zones difficilement accessibles (Figure I.7).

La partie entraînement de fil peut être animée soit par une turbine à air, soit par un moteur électrique. Le système d'entraînement par moteur électrique permet une régularité parfaite de l'avance du fil, en particulier grâce à un couple moteur constant, quelles que soient les variations de traction du fil en amont du pistolet. L'avantage du système d'avance par turbine est le poids et le coût inférieurs de l'appareil [3].



Figure I.7 : Pistolet de métallisation [6]

Ses avantages sont qu'il est d'un investissement faible, il est facile d'utilisation en permettant l'obtention de rendements de projection élevés, c'est un système portable qui peut être utilisé en chantier. Ses désavantages sont qu'il est limité à la projection de matériaux existant sous forme de fil et le procédé ne permet pas l'obtention de revêtements à haute densité, avec un taux d'oxyde faible et une grande adhérence [6].

I.3.2.3. La projection plasma

Le principe de base de la projection plasma est relativement simple. Une torche est constituée de deux électrodes : une cathode conique à l'intérieur d'une anode cylindrique constituant une buse (figure I.8).

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

La température du jet de plasma généré, nettement supérieure à celles des autres procédés, permet de projeter une large variété de matériaux, à la seule condition qu'il existe un écart d'au moins 300° C entre la température de fusion et celle d'évaporation ou de dissociation du matériau [8].

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

Soulignons que de nombreux paramètres peuvent influencer la technique de projection plasma ; on en dénombre jusqu'à 60 différents. Certains d'entre eux peuvent être contrôlés par l'opérateur comme l'intensité de courant, les débits ou les compositions des gaz ; d'autres ne sont pas directement maîtrisables, comme la tension des électrodes, l'efficacité du refroidissement, l'usure des électrodes... autant de paramètres dont dépend la qualité finale du dépôt [8].

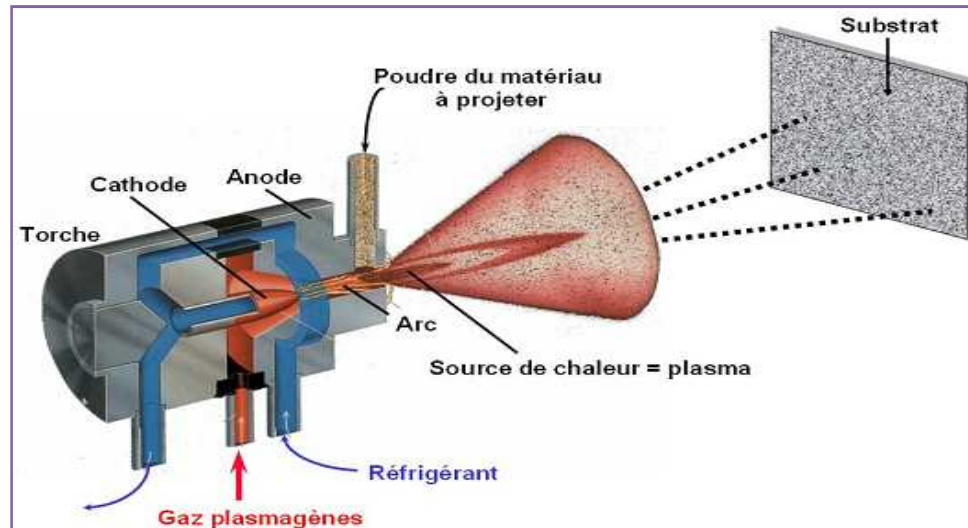


Figure I.8 : Représentation schématique de la projection plasma [9].

I.3.2.4. La projection à arc électrique entre deux fils

Le procédé de projection arc-fil ou arc-électrique consiste à créer un arc électrique entre deux électrodes consommables des matériaux du revêtement pour le fondre et ensuite par l'intermédiaire d'un gaz à atomiser (généralement de l'air) et projeter sur le support à revêtir la gouttelette de métal fondu [9].

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

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

Les fils sont conditionnés en bobines ou en fûts et sont tirés, au travers de gaines souples, par des molettes d'entraînement intégrées au pistolet et mues par des moteurs électriques ou par des turbines à air. Dans le cas de fils très rigides ou de grandes distances entre pistolet et bobines (supérieures à 6 m), il est nécessaire d'adjoindre à l'installation un système entraînement des fils par poussée, à l'entrée des gaines. Ce type d'équipement est communément appelé « push-pull ». À l'intérieur du pistolet, les fils sont guidés par deux tubes contact permettant, d'une part, le positionnement du fil avant entrée dans la zone de fusion et, d'autre part, la transmission du courant électrique (figure I.9) [3].

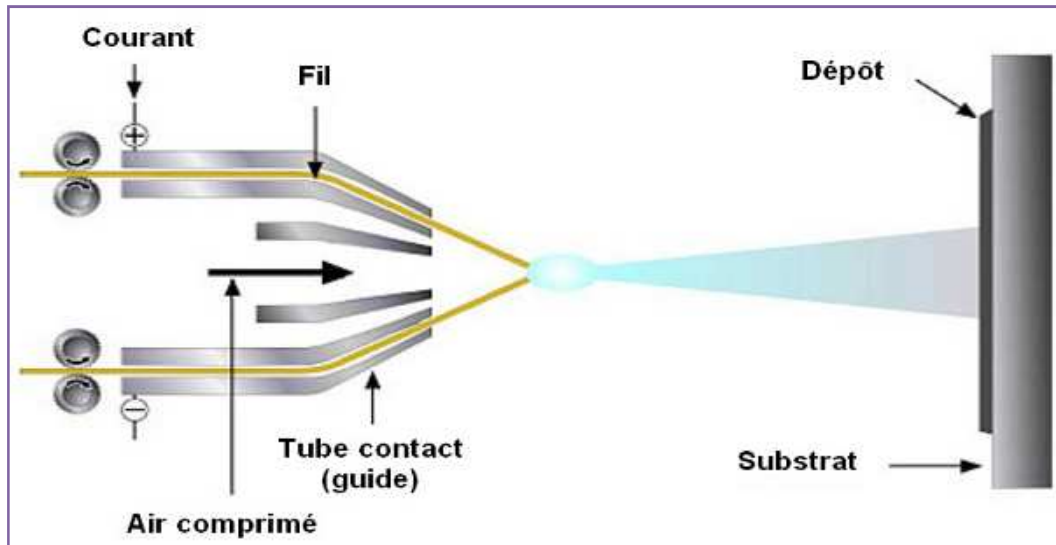


Figure I.9: Schéma du dispositif de projection à l'arc électrique [6].

La température de l'arc, d'environ 6000K dans l'air à pression ambiante, est largement au-dessus du point de fusion des matériaux projetés, ce qui peut entraîner une vaporisation relativement importante et un chauffage excessif des gouttelettes. Cependant, ce dernier peut aider à créer des zones d'interaction métallurgique dans le dépôt ou à l'interface dépôt substrat et des zones de diffusion améliorant, ainsi, sensiblement l'adhérence et la cohésion des dépôts [7].

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

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

La plupart des matériaux métalliques tels que le zinc, le cuivre, l'aluminium, le bronze, l'acier ainsi que de nombreux alliages peuvent être projetés par cette technique. En raison d'une température d'arc élevée, la variété des matériaux métalliques déposés n'est limitée que par la fabrication des fils [3].

I.3.2.4.1. Avantages et inconvénients de la projection à l'arc électrique

Les principaux avantages de ce procédé sont les suivants :

- Un procédé économique : la puissance électrique est de l'ordre de 5 à 10 kW et le gaz utilisé comme gaz d'atomisation est généralement de l'air comprimé ;
- Un taux de dépôt élevé de 5 à 40 kg/h ;
- Un rendement énergétique important de 60 à 70 % de la puissance électrique fournie est utilisée pour fondre les fils ;
- Avec un fil plein le matériau projeté est complètement fondu ;
- Le pistolet à arc électrique est très maniable et léger (moins de 2Kg).

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

- Un jet de particules divergeant qui se traduit par une tache d'impact sur le substrat relativement large (25 à 50mm de diamètre à 100mm de la sortie de la torche) ;
- Des dépôts présentant une porosité (de l'ordre 10%) et une teneur en oxyde (jusqu'à 25%) relativement élevées par rapport aux dépôts obtenus avec les autres techniques de projection thermique ;
- Une perte des composants les plus volatils du fait de la température de l'extrémité des fils au delà de la température de fusion ;
- Des fluctuations élevées de tension dues à une variation continue de la distance inter-électrode à cause de la différence de fusion entre le fil cathode et le fil anode, ce qui rend le procédé instable [3].

I.3.3. Comparaison des procédés

Les propriétés du dépôt dépendent de sa microstructure qui est fortement conditionnée par les paramètres des particules à l'impact et par ceux du substrat. Les paramètres des particules à l'impact sont leur vitesse, leur température, leur état de fusion, leur taille et leur état chimique. Ils dépendent directement de l'écoulement du jet et des conditions d'injection du matériau dans celui-ci. Les paramètres du substrat sont, sa nature, sa rugosité, son état chimique de surface et sa température avant, pendant et après le dépôt. On peut classer les procédés de projection thermique en deux familles, selon la source de chaleur utilisée: flamme ou arc électrique. Le tableau I.1 récapitule les caractéristiques particulières à chaque procédé de projection thermique [10].

Tableau I.1 : Paramètres et propriétés du dépôt pour chaque procédé [3].

Caractéristiques	Flamme poudre	Flamme fil-cordon	Arc électrique	Plasma ASP*	HVOF	Canon à détonation
Source de chaleur	Flamme	Flamme	Arc électrique	Plasma	Flamme	Flamme
Température de la source chaude (°C)	3000	3000	6000	12000	3000	3000
Vitesse d'écoulement (m/s)	80-100	100-300	200 - 300	300 - 1200	400 - 2000	900 - 2000
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Air comprimé	Gaz flamme	Gaz flamme	Gaz flamme
Vitesse des particules (m/s)	40	150	150	200	700	950
Forme du produit d'apport	Poudre	Fil- cordon	Fil	Poudre	Poudre	Poudre
Taux horaire de dépôt (kg/h)	1 à 3	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Taux d'oxyde (%)	6 - 12	4 - 8	1 - 10	1 - 5	0,5 - 2	0,1 - 0,5
Rendement moyen* (%)	50	70	80	70	70	70
Force d'adhérence (MPa)	20 à 40	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Taux de porosité (%)	10 à 20	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0,5 à 2	0,5 à 2
Epaisseur déposée (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,2 à 3	0,05 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1
Exemples de matériaux d'apport	Métaux Cermets Céramiques	Métaux Cermets Céramiques	Métaux Fils fourrés	Métaux Cermets Céramiques	Métaux Alliages Cermets	Cermets Céramiques

ASP = Air Plasma Spraying, (projection dans l'air ambiant).
* Rendement moyen = Pourcentage du matériau d'apport projeté qui adhère au substrat.

I.3.4. Matériaux utilisés et caractéristiques des matériaux projetés

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

Ils sont classifiés suivant les normes A81-981 en groupes, chaque alliage étant défini ensuite par un code [11].

Ces matériaux peuvent être classés comme suit :

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

Ces différents matériaux ne se présentent pas sous la même forme, car il faut tenir compte de certaines propriétés intrinsèques et également les procédés employés pour la projection [11].

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

a. Les Fils

Les fils nus massifs sont les matériaux réservés aux matériels flammes et arc ; ils sont généralement dans les catégories métaux purs et les aciers. Et les fils fourrés sont réservés aux matériaux auto-adhérents. Ces types de produits sont définis par leur diamètre et leur composition chimique [12].

b. Les poudres

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

- composition chimique,
- dimension des particules,
- forme des particules : sphérique, lamellaires,...etc.
- type d'élaboration : électro-fondues, frittées, agglomérées, enrobées...etc.
- coulabilité,
- densité : tassée ou non tassée [12].

c. Les cordons

Les cordons permettent d'obtenir un produit continu qui peut alimenter des pistolets à fils, ils sont définis par leur composition et leur diamètre [12].

d. Les baguettes

Elles sont obtenues par frittage, elles permettent de conditionner des matériaux non tréfilables pour alimenter de manière discontinue des pistolets à fils [12].

I.3.5. Formation de dépôt

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est du type lamellaire.

Afin de réaliser un bon accrochage mécanique, la surface des pièces à revêtir est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface. La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques:

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

Ce mécanisme d'écrasement est un mécanisme complexe dépendant d'une part des caractéristiques des particules elles-mêmes (vitesse, composition chimique, température, degré de fusion), et d'autre part de celles du substrat (nature, rugosité, température) (Figure I.10) [3].

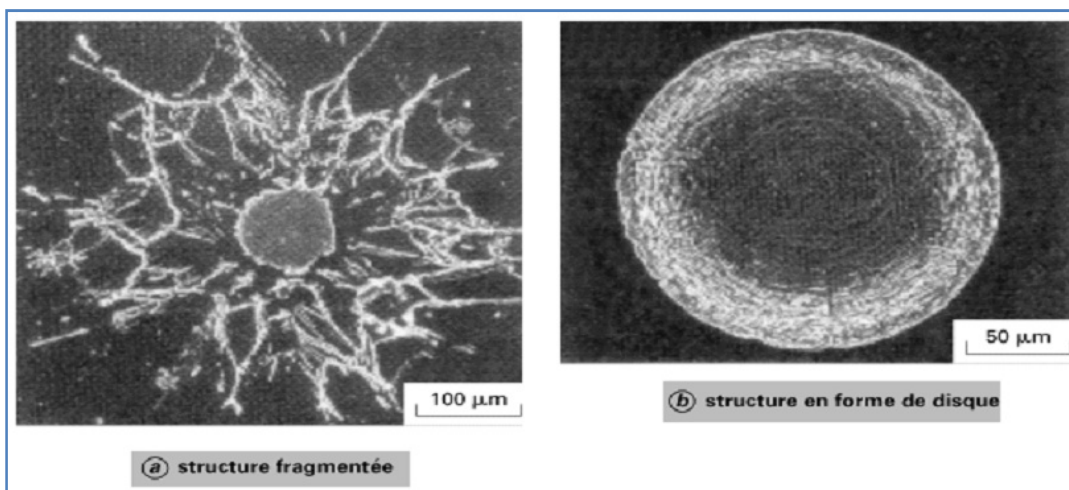


Figure I.10 : Mécanismes d'écrasement des particules [3].

Deux types de structures existent après impact :

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

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

La formation d'un dépôt résulte de la combinaison du phénomène d'écrasement et de solidification rapide de particules fondues sur le substrat et du balayage de la surface traitée. La réaction chimique des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleurs avec le substrat (ou la couche précédemment déposée) vont affecter la qualité du dépôt, et en particulier le taux de porosité, le taux d'impuretés, les contraintes résiduelle et la structure métallurgique [5].

I. 3.6. Les différentes caractéristiques des revêtements

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

Les principales caractéristiques des revêtements projetés sont :

- Adhérence
- Densité (porosité)
- Dureté

I.3.6.1. Adhérence

Les dépôts adhèrent au substrat par un phénomène mécanique. Suivant les procédés et les matériaux, l'adhérence varie de 20 à 115 MPa. Dans les cas où elle s'avère insuffisante (cas des 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 NiCr (80/20) ou MCrAlY (M désignant Ni, Co ou NiCo) [3].

L'adhérence résulte aussi d'un des mécanismes d'interaction suivants :

- L'interaction physique par les forces de van der Waals,
- L'interaction métallurgique qui se réalise par diffusion due aux lacunes présentes dans une lamelle en train de solidifier.

La préparation du substrat avant la projection, pour favoriser un bon accrochage du revêtement sur son substrat. Deux voies sont possibles, un traitement mécanique (sablage par exemple) ou un traitement physico-chimique, le revêtement devant être réalisé dans la continuité.

De nombreux travaux ont été réalisés pour trouver la meilleure préparation relative au meilleur accrochage des revêtements sur leur substrat. Les quatre méthodes suivantes donnent les meilleurs résultats :

- ❖ Le nettoyage et décapage chimique ;
- ❖ Le sablage avec un abrasif ;
- ❖ La préparation par usinage;
- ❖ La préparation avec une sous-couche d'accrochage. Dans la plupart des cas l'adhésion est mécanique (Figure I.11) [5].

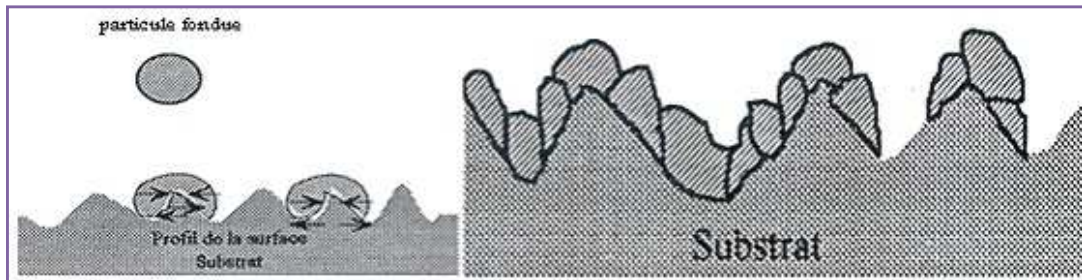


Figure I.11 : L'adhésion mécanique sur un substrat sablé [5].

I.3.6.2. Dureté

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

On peut avoir une indication précise de la cohésion des particules entre elles, si on effectue une macro-dureté ou micro-dureté, sous une charge importante, on aura une idée précise de la qualité du dépôt qui craque si la cohésion n'est pas bonne [14].

I.3.6.3. Densité (porosité)

Les dépôts projetés sont poreux. Cette porosité est plus ou moins importante suivant le mode de projection. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Pour les dépôts métalliques, la densité est également fonction du taux d'oxydes formés pendant la projection [14].



Chapitre II :

Les Multimatériaux

II.1. Introduction

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 d'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 des multimatériaux, 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 [15].

Plusieurs travaux [16,17] ont été effectués à ce propos pour minimiser pour le mieux ces problèmes en utilisant des sous-couches d'accrochages.

II.2. 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 un 'multimatériau'.

Chaque matériau possède des propriétés et des caractéristiques qui lui sont propres : un métal est soit tenace ou ductile, alors que les matières plastiques, plus légères, ont une faible rigidité et des propriétés mécaniques moyennes, et parfois elles sont fragiles. Les céramiques, quant à elles, ont un module d'élasticité et une résistance théorique à la traction très élevée [18].

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 (Figure .II.1) [18].

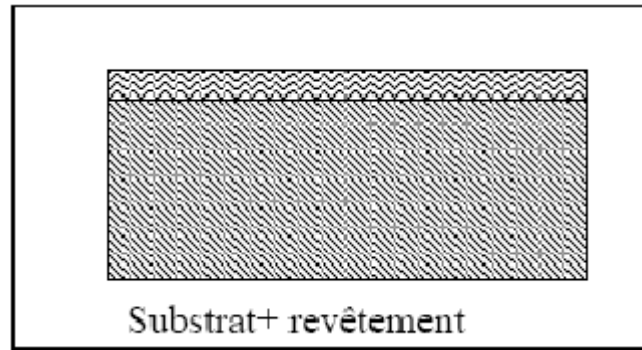


Figure II.1 : Revêtement monocouche [18].

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 (Figure.II.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 [18].

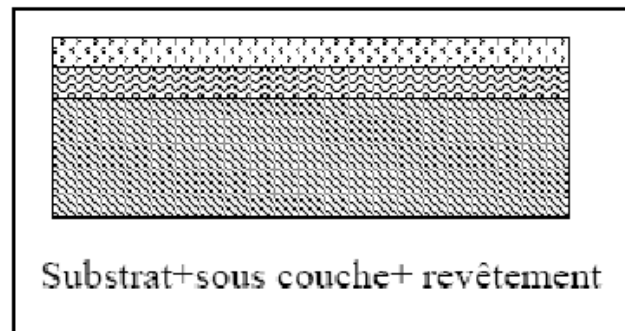


Figure II.2 : Revêtement bicouche [18].

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 (Figure. II.3) [18].

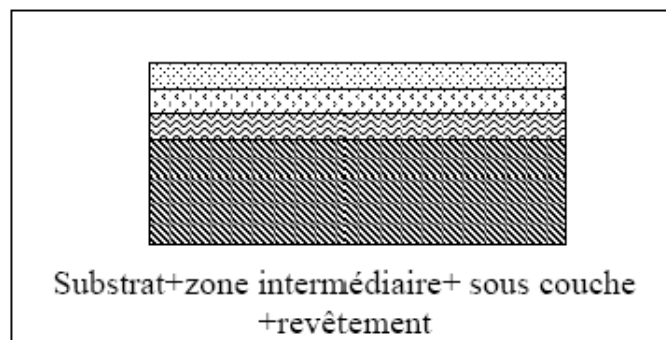


Figure II.3 : Revêtement multicouche [18].

II.3. Les problèmes des multimatériaux

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

II.3.1. Adhérence

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

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

II.3.1. 1. Définition

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

L'adhésion représente tous les phénomènes microscopiques liant deux corps et l'adhérence en est la mesure [14].

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 (équation II.1), elle s'écrit, selon Dupré :

$$W_{adh} = \gamma_D + \gamma_S - \gamma_{DS} \quad \text{équation II.1}$$

Avec γ_D et γ_S respectivement les énergies de surface du dépôt et du substrat, alors que γ_{DS} est l'énergie d'interface [14].

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

Les différents types de liaisons interatomiques peuvent être établis aux interfaces et conduire à l'adhérence des revêtements. Toutefois, les forces d'attraction correspondant à ces liaisons ne peuvent s'appliquer que si les deux matériaux sont suffisamment proches (<0,5 nm) [14]. Pour assurer ce contact, l'étalement de particules

liquides sur un substrat est souvent employé, mettant en œuvre des phénomènes de mouillage.

Des impacts à grande vitesse, impliquant de la déformation plastique, peuvent également être utilisés. Les interfaces créées lors de ces divers procédés d'élaboration des dépôts diffèrent de par leurs épaisseurs et de par les mécanismes d'adhérence qui y prédominent. En plus des adhérences chimiques et physiques, qui se rapportent à des échelles atomiques, il existe deux principaux types de mécanismes d'adhérence microscopiques : la diffusion (avec ou sans formation de composés intermédiaires) et l'ancrage mécanique [14].

II.3.1.2.1. Liaisons interatomiques

a. Adhérence chimique

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

La liaison covalente, qui correspond à une adhésion de type chimique, est due à une redistribution des électrons périphériques qui se déplacent sur des orbitales communes. Elle concerne des atomes particuliers et forment des liens directionnels. La liaison ionique, quant à elle, résulte de l'association d'ions positifs et négatifs. C'est une interaction non orientée car le champ d'attraction des ions a une symétrie sphérique. De nombreuses liaisons, notamment celles des oxydes, sont intermédiaires entre les liens ioniques et covalents. Ils sont dits iono-covalents. Pour les céramiques, ces liaisons mixtes sont décrites par des taux d'ionité. Ce type de liaison correspond à une énergie de 600 à 1000 kJ.mole⁻¹ [14].

b. Adhérence physique

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

c. Liaisons métal/oxyde

Les liaisons entre métaux et oxydes ne sont pas encore bien comprises. Il est en effet difficile de comprendre comment des liaisons peuvent s'établir entre un corps à liaisons métalliques et un autre de type ionique ou covalent [14]. Des liaisons peuvent néanmoins être formées par diffusion.

II.3.1.2.2. Mouillage

Le mouillage regroupe tous les phénomènes qui interviennent lorsqu'un liquide est mis en contact avec un solide, ce qui intervient lors de l'élaboration des interfaces par projection thermique. Une bonne adhésion implique un bon mouillage du substrat par le revêtement à l'état liquide. Une goutte de liquide sur une surface solide parfaitement lisse prend la forme d'une calotte ayant un angle de mouillage θ avec la surface du substrat [19] comme le montre la Figure II.4.

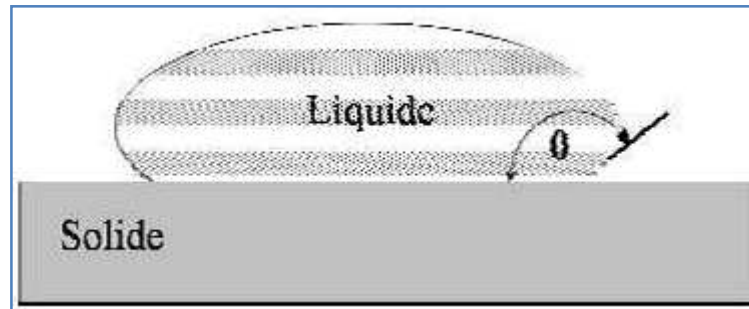


Figure II .4 : Goutte de liquide sur un solide lisse - Définition de l'angle de mouillage [14].

L'énergie d'adhérence W_{Adh} dépend du mouillage, via l'équation II.2:

$$W_{Adh} = \gamma_L (1 + \cos \theta) \quad \text{équation II.2}$$

Où γ_L représente 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 [14]. L'étalement du liquide peut, en effet, être contrôlé par de la diffusion superficielle.

II.3.1.2.3. Diffusion

Le phénomène de diffusion entraîne la formation d'une zone de transition dans laquelle un changement constant de la structure cristalline et de la composition est observé. Ce phénomène de diffusion nécessite une solubilité et un apport d'énergie suffisant, notamment sous forme de chaleur. Une interdiffusion peut aller jusqu'à la disparition complète de l'interface, déplacée ou remplacée par une zone de transition.

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

L'interdiffusion est généralement considérée comme bénéfique pour l'adhérence. La formation de phases intermédiaires fragiles aux interfaces peut conduire à une mauvaise adhérence des revêtements ou au contraire l'améliorer [19].

II.3.1.2.4. Ancrage mécanique

La rugosité du substrat est considérée comme un paramètre déterminant pour l'adhérence des revêtements. D'une part, son accentuation (figure II.5.a) permet une pénétration du dépôt dans les aspérités du substrat et un emboîtement des deux matériaux. Ce phénomène, qui est souvent désigné par le terme vague d'"ancrage mécanique", conduit à une augmentation de l'adhérence des revêtements [19].

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 thermique, l'ancrage mécanique peut également résulter de la contraction des particules lors de leur refroidissement (Figure II.5.b). La contraction se trouve, en effet, contrariée par la rugosité du substrat, conduisant ainsi à un accrochage des particules.

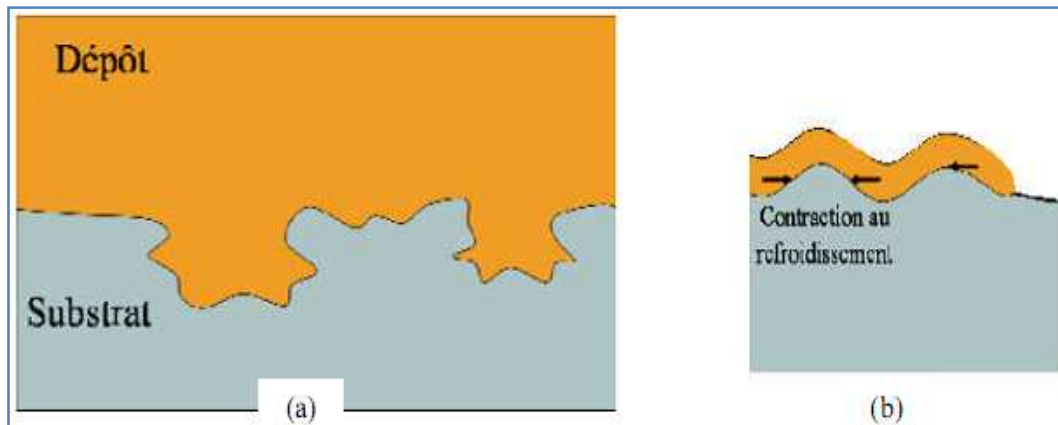


Figure II .5 : Illustration de l'accrochage mécanique [20]

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 [19].

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

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

II 3.1.3 Méthodes de mesure de l'adhérence

Il existe un grand nombre de dispositifs permettant de déterminer l'adhérence d'un revêtement sur son substrat. Ces techniques peuvent, par exemple, être classées en quatre catégories [20] :

- 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 [20].

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

Deux barreaux solides sont collés, l'un au substrat, l'autre au dépôt par un adhésif adapté (figure II.6). Une force de traction croissante est appliquée sur les barreaux jusqu'à obtenir la décohésion de l'interface. La contrainte conduisant à la décohésion permet d'évaluer l'adhérence des interfaces.

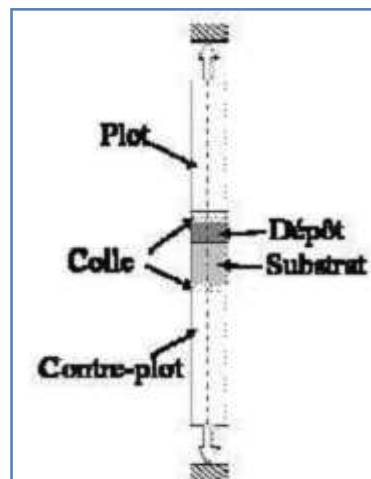


Figure II.6 : Principe de l'essai d'adhérence par plot-collé [14]

La contrainte de traction, σ , est donnée par l'équation II.3:

$$\sigma = F/S \quad \text{équation II.3}$$

σ : contrainte de traction

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

F : la charge appliquée.

II.3.1.3.2 Gonflement-décollement :

L'essai de gonflement appelé aussi "blister" ou encore "bulge test" permet de déterminer l'énergie d'adhérence interfaciale entre un revêtement ductile et son substrat [33].

Comme le montre la Figure II.7, la préparation de l'échantillon nécessite l'élimination locale du substrat jusqu'à l'interface sur un cercle de diamètre a . Un liquide est injecté dans la cavité avec une pression P croissante et contrôlée. La hauteur h du dépôt, résultant de la pression, est mesurée.

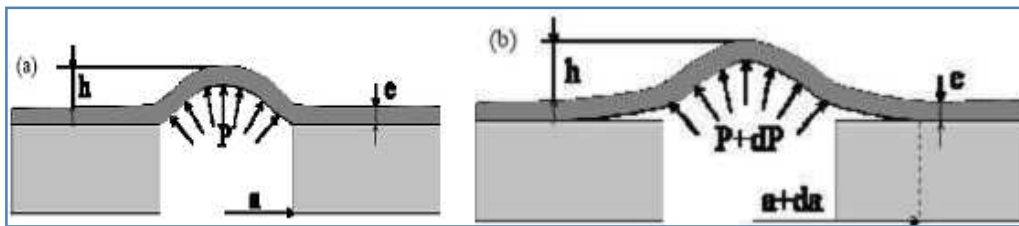


Figure II.7 : Schéma des étapes de (a) gonflement et de (b) décollement de l'essai "bulge test"[14]

L'expression de la pression P est donnée par l'équation II.4:

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

Où c_1 , c_2 et c_3 sont des constantes connues à partir de calculs de mécanique des membranes ; E et ν , respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson du revêtement ; e et σ_{Res} , respectivement l'épaisseur du dépôt et ses contraintes résiduelles.

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

Pour une pression supérieure à celle du seuil (Figure II.8), le revêtement se décolle. La pression chute alors car la surface sur laquelle elle est appliquée augmente brusquement. La courbe (P, h) décroissante pendant le décollement peut être modélisée en écrivant le bilan de l'énergie mécanique apportée au système par le fluide sous pression, consommée d'une part en énergie de déformation de la membrane et d'autre part en croissance de la fissure interfaciale, à raison de G_C par unité d'aire. Toujours dans le cas d'un comportement élastique, cela se traduit par l'équation II.5 hyperbolique

$$P = G_C / 0.5h \quad \text{équation II.5}$$

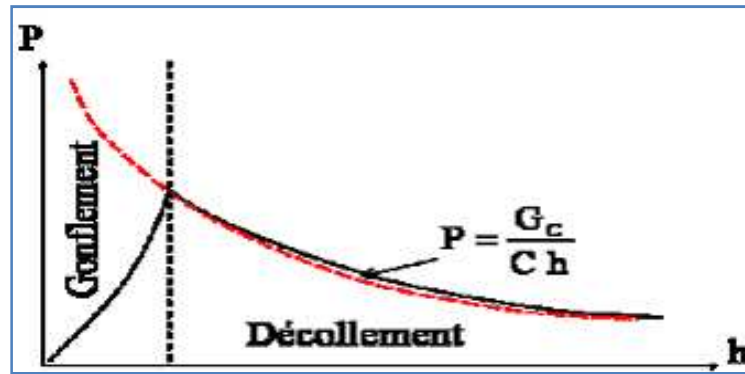


Figure II.8 : Allure d'une courbe de gonflement-décollement [14].

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

Cet essai reste limité aux dépôts ou substrats ductiles (dans le cas du gonflement- décollement inversé) et suffisamment minces [14].



Chapitre III :

FATIGUE THERMIQUE

III.1. Introduction

La complexité de l'étude de l'endommagement en particulier aux hautes températures revient, principalement, à la présence de nombreux phénomènes qui ne peuvent généralement pas se dissocier, comme le frottement, l'usure et la chaleur. Ces derniers peuvent apparaître en même temps en surface du matériau en service (exemple: disques et tambours de frein).

Si la théorie classique de l'endommagement est capable d'étudier la dégradation des matériaux isotropes métalliques ou non métalliques (céramiques...etc), celle-ci reste insuffisante dans le cas d'un multimatériau (matériau anisotrope) où l'endommagement peut intervenir soit par rupture fragile ou ductile dans le dépôt et également dans l'interface, soit par rupture ductile dans le substrat [21].

III.2. La fatigue thermique

De nombreuses définitions de la fatigue thermique ont été données par les chercheurs notamment :

D.SPORA [19] : « 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 [22] : « 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 [23].

III.3. Contraintes thermiques résiduelles

En plus, des charges extérieures, souvent des contraintes résiduelles thermiques ou mécaniques 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 par exemple.

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 [19,15].

Dans un matériau biphasés, les contraintes résiduelles microscopiques peuvent différencier l'inégalité de la limite de déformation plastique des deux phases [19].

Dans une microstructure orientée aléatoirement, les contraintes microscopiques des phases constituantes sont reliées à travers la condition d'équilibre suivante (équation III.1):

$$V_{\alpha} \sigma_{\mu\alpha} + V_{\gamma} \sigma_{\mu\gamma} = 0 \quad \text{équation III.1}$$

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, fait qui a été démontré par la mesure des contraintes résiduelles par rayons X et par la simulation numérique. Les contraintes thermiques microscopiques sont très dépendantes de la microstructure locale, c'est-à-dire de la morphologie de la phase locale [19].

III.4. Les mécanismes de la fatigue thermique

Le mécanisme de la fatigue thermique est mis en évidence à l'aide du diagramme de NORTH COTT et BARON [24]. Celui-ci est uniquement basé sur l'alternance de l'échauffement et du refroidissement, et sur les gradients thermiques dûs à la déformation thermique partiellement empêchée. La Figure III.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) [24].

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) [24].

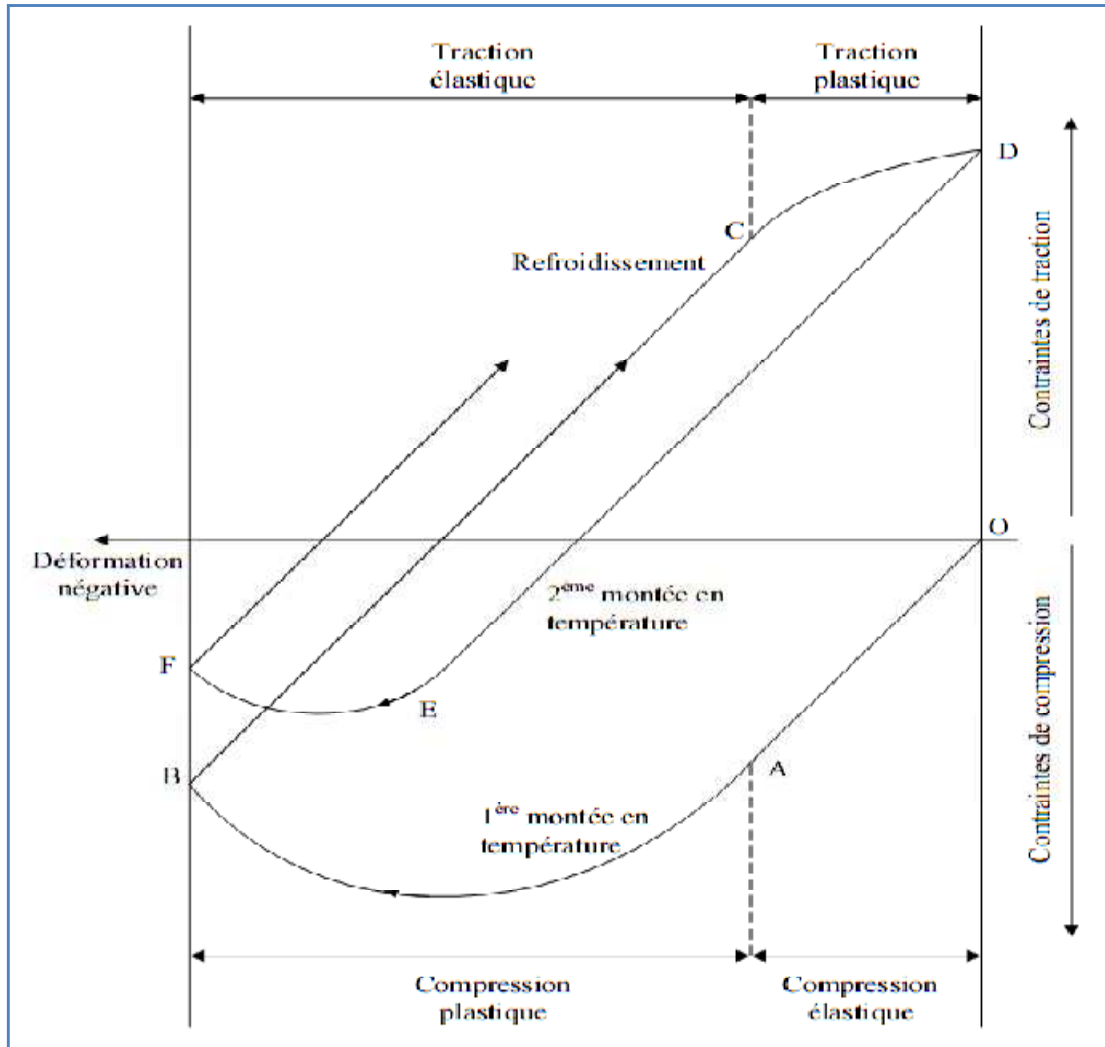


Figure III.1 : Mécanisme de la fatigue thermique, diagramme de NORTH COTT et BARON [24].

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 plus rapide que celle de l'échauffement, ce qui va engendrer des gradients thermiques beaucoup plus importants au refroidissement, et par conséquent les contraintes résiduelles de traction se développent plus rapidement [24].

III.5. Les fissurations 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.

III.5.1 Amorçage des fissures

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 [25].

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 [21,24].

III.5.1.1. 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 III.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 [21,24].

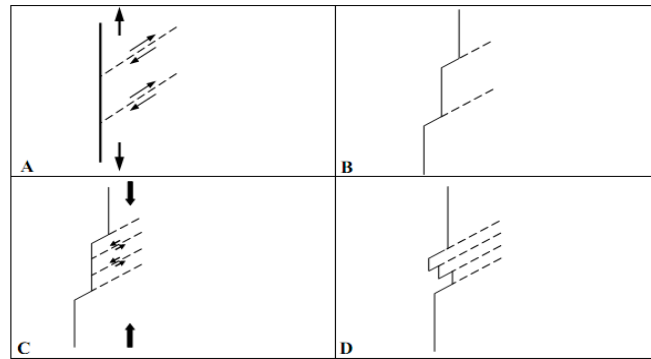


Figure III.2 : Mécanisme d'amorçage des fissures sous contrainte thermique cyclique [24].

III.5.1.2. 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 de celles du 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 [26].

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 [26].

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 [26].

III.5.2. Propagation des fissures

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 [19].

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 [21,25]. 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 [24].

III.6. Facteurs de la fatigue thermique

On peut classer les facteurs de la fatigue thermique en deux types [21,24]:

- *Facteurs intrinsèques* : propres aux matériaux tels que les caractéristiques physiques, métallurgiques, mécaniques et géométriques.
- *Facteurs extrinsèques* : nature du cyclage thermique et l'environnement.

III.6.1 Nature du cycle thermique

Les paramètres d'un cycle 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 [24].

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 [27].

III.6.2 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 on peut citer [24] :

- ✓ *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.

III.7. Rupture interfaciale des multimatériaux

Pour pouvoir étudier la rupture adhésive ou cohésive des solides, il faut dans un premier temps savoir les paramètres de surface qui interviennent dans la rupture. Effectivement, la force nécessaire pour séparer deux solides en contact ou pour rompre un solide, dépend non seulement des forces d'adhésion qui lient les deux solides ou des forces qui assurent sa cohésion, mais aussi d'autres paramètres tels que la géométrie de l'échantillon, la vitesse de séparation et également les contraintes résiduelles en présence [15].

Du point de vue thermodynamique, une surface est caractérisée par son énergie superficielle et une interface par son énergie d'adhésion.

La rupture interfaciale se produit lorsque l'énergie d'adhérence du revêtement sur le substrat est dépassée. Les multimatériaux et notamment ceux réalisés par projection thermique présentent un problème majeur situé au niveau de l'interface (milieu hétérogène). Ce type de multimatériaux a un comportement lié au type de mode de rupture. En effet, la rupture peut intervenir en provoquant :

1. Une décohésion intergranulaire ou par clivage (rupture en volume) que ce soit au substrat ou bien au dépôt.
2. Une rupture adhésive si l'énergie de rupture de l'interface est inférieure à celle de l'un des deux constituants du multimatériau.
3. Une propagation mixte : dans certains cas, la fissure dans l'interface peut être déviée dans l'un ou l'autre des matériaux massifs, c'est le cas d'un multimatériau (fragile/ductile).

Sachant que, la rupture dans le matériau fragile suit généralement le mode d'ouverture (mode I). Tandis que, dans le matériau ductile la rupture se produit par cisaillement des plans de glissements (mode II). En conséquence, la rupture de ce type de multimatériau est caractérisée par la présence simultanée dans la plupart des cas d'un

mode mixte du fait de l'énorme différence entre les propriétés élastiques des deux matériaux [15].

Dans un tel mode de dégradation, les contraintes et de cisaillement agissent en même temps à l'avant du front de la fissure induisant des déplacements à la fois en ouverture et en cisaillement.

Des études récentes ont montré que c'est la proportion de déplacement en cisaillement qui détermine le processus de rupture. Elle agit d'une part sur l'énergie de rupture et d'autre part sur le choix du milieu de propagation de fissure. L'information en grande partie est contenue dans l'angle Ψ ($\Psi = \cotg(v/u)$) qui mesure la quantité relative d'ouverture et de cisaillement dans le milieu le plus proche du front de la fissure (Figure III.3) [15].

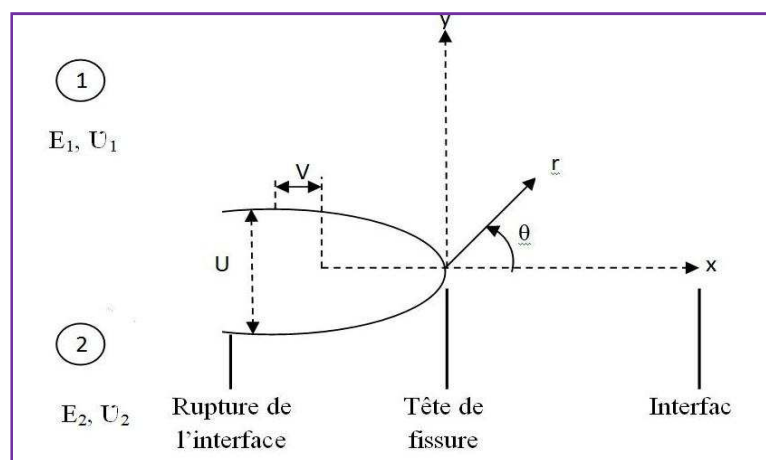


Figure III.3 : Rupture de l'interface d'un bi-matériau.

Lorsqu'on doit tenir compte uniquement de l'effet de la température (c'est-à-dire en l'absence de toute contrainte externe d'origine mécanique), une variation de température ΔT provoquera une déformation longitudinale et transversale de l'ensemble substrat/revêtement.

Les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des antagonistes, en particulier la dilatation thermique, étant différents ($E_1, V_1 \dots, E_2, V_2$) pour les cycles thermiques appliqués nous allons obtenir des changements dimensionnels différents pour les composants du multimatériau (figure III.4) [15].

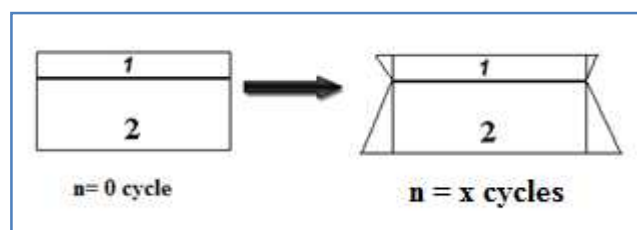


Figure III.4 : Variation en volume d'un multimatériau ayant subi des cycles thermiques (1 : revêtement ; 2 : substrat)



ETUDE

EXPERIMENTALE



Chapitre IV :

Techniques expérimentales

IV.1 Introduction

Le travail que nous nous proposons de réaliser s'insère dans un axe où bien d'autres études ont été déjà faites [14, 15,19], à savoir celui de la projection thermique et tout ce qui s'y rapporte en termes de traitements et d'investigations. Aussi, au besoin, nous utiliserons des informations de certains d'entre eux, pour mener à bien notre propre étude. .

Pour notre part, nous avons déposé par la technique de projection thermique, par pistolet, de la thermanit, **55E**, sur deux alliages différents des aciers faiblement alliés **25CrMo4** et **30NiCr11**. Les multimatériaux ainsi obtenus sont soumis au traitement de fatigue thermique, cycles de chauffage et de refroidissement. Nous avons, par la suite, procédé à différentes techniques d'analyse afin de voir l'effet de cette fatigue sur l'adhérence et les propriétés du dépôt réalisé. Ces techniques sont le contrôle non destructif par ultra-sons, l'observation au microscope et la mesure de la microdureté.

IV.2. Matériaux utilisés

IV.2.1. Substrats

Les matériaux de base utilisés sont des aciers faiblement alliés, le premier au Chrome Molybdène de nuance **25CrMo4** et le deuxième au Nickel Chrome de nuance **30NiCr11**, ils font partie de la famille des aciers de construction mécanique dont le choix a été motivé surtout par son utilisation importante dans l'industrie algérienne, et d'autre part par son utilisation pour la réalisation des pièces soumises aux vibrations, aux chocs mécaniques et à l'usure tels que: les vilebrequins, les axes, les essieux....

L'analyse spectrochimique d'un échantillon de chaque alliage réalisé sur un spectromètre type DV4, a révélé la composition chimique suivante (tableau IV.1) :

Tableau IV.1 : composition chimique de 25CrMo4 et 30NiCr11

Eléments	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
25CD4 (% en masse)	0,22 –0,29	0,1– 0,25	0,5– 0,8	≤ 0,015	≤ 0,02	0,9 – 1,2	≤ 0,3	0,15– 0,25
30NC11 (% en masse)	0,26– 0,33	≤ 0,4	0,4– 0,7	-	-	0,6 –1	2,7– 3,2	-

Les aciers que nous avons étudiés présentent les caractéristiques mécaniques que nous avons regroupées dans le tableau IV.2 :

Tableau IV.2 : caractérisations mécaniques des aciers 25CrMo4 et 30NiCr11 [28].

Nuance	MASSE VOLUMIQUE kg/dm	ETAT D'UTILISATION	R N/mm ² ≥	Re N/mm ² ≥	A% ≥	Dureté	Z%
25CD4	7.83	trempe à l'huile effectuée à 850°C et revenu à 600°C	880	735	12	300 HRB	-
30NC11	7.84		880	685	12	36 HRC	55

IV.2.2. les éprouvettes

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

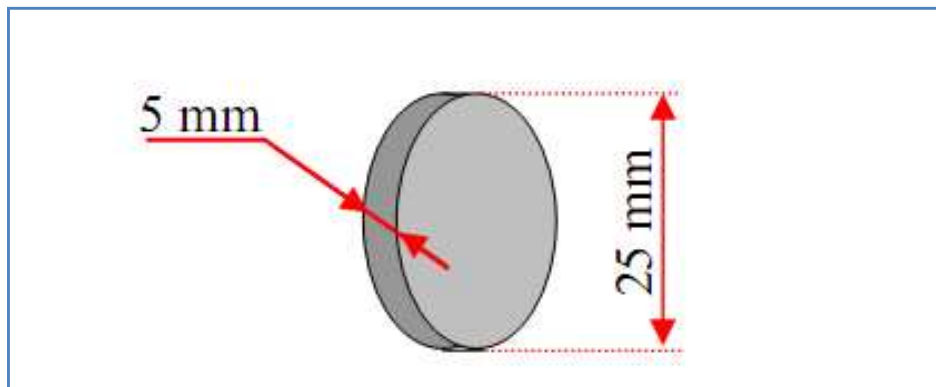


Figure IV .1 : Dimensions de l'éprouvette étudiée

Pour notre étude nous disposons de 18 éprouvettes, 09 de chaque nuance.

IV.2.3. 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 de l'importance de celle-ci, nous avons utilisé une sous couche d'accrochage réalisée par dépôt d'un alliage Ni- Al désigné par la nuance **75 E** sur une épaisseur d'environ 0,1 mm.

IV.2.3. Matériau 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 reportée dans le tableau IV. 3.

Tableau IV.3 : composition chimique de la Thermanit [19].

Eléments	C	Fe	Ni	Cr	Mn	Al	Si	Cu	Sn
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.3. La projection thermique

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

La projection thermique est réalisée dans les mêmes conditions sur tous les échantillons. Cette projection s'est faite en deux étapes, la sous couche d'accrochage en premier puis le revêtement lui-même.

IV. 3.1. Préparation des éprouvettes et projection

Avant de procéder à l'opération de projection, il est impératif de procéder d'abord à une bonne préparation de la surface qui va recevoir le revêtement et de bien choisir les paramètres de projection.

IV.3.1.1.Préparation de la surface à revêtir

a. Polissage

On a fait un polissage grossier sur les surfaces à revêtir avec un papier abrasif de faible granulométrie (P.60 ,1000).

b. Dégraissage

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

c. Grenailage:

L'objectif du grenailage est d'augmenter la rugosité de la surface du substrat. Les particules projetées pourront alors pénétrer dans les interstices de la surface rugueuse et s'agripper ainsi à ses aspérités.

IV.3.1.2. Pistolet de la projection Thermique

Pour réaliser la projection de la couche d'accrochage et celle du revêtement, nous avons eu recours à un pistolet du type THRMO-SPRAY 234.

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 utilise l'arc électrique comme source d'énergie, c'est un pistolet à deux fils comme le montre la figure IV.2.

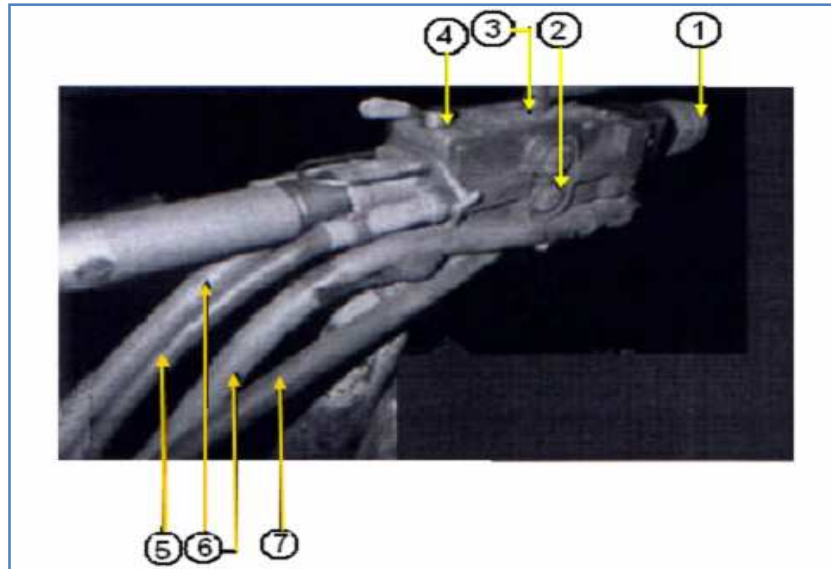


Figure IV.2 : Pistolet de projection à arc entre deux fils « ARC SPRAY 234» [19].

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 pour former le dépôt (figure IV.3)

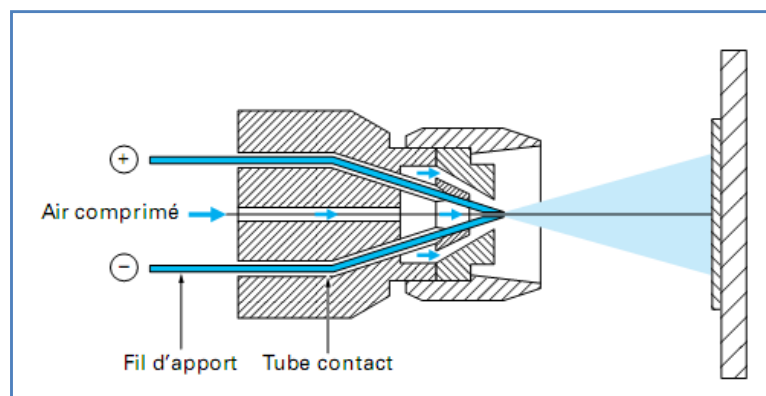


Figure IV.3 : Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique [3].

IV.3. 1.3. Paramètres de la projection

Il est recommandé de respecter certains paramètres préconisés par le constructeur selon les matériaux utilisés, pour que le revêtement adhère le mieux possible au substrat. Ces paramètres sont présentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Paramètres de mise en service du pistolet.

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

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

Tableau IV.5: Paramètres de projection.

Distance de projection	140 mm
Angle de tir	90°

Des études ont été faites sur l'optimisation des paramètres de projection et leurs influence 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 l'évolution de la dureté en fonction de la distance de projection, ce qui explique la cohésion entre les gouttes (particules) du métal projeté [19].

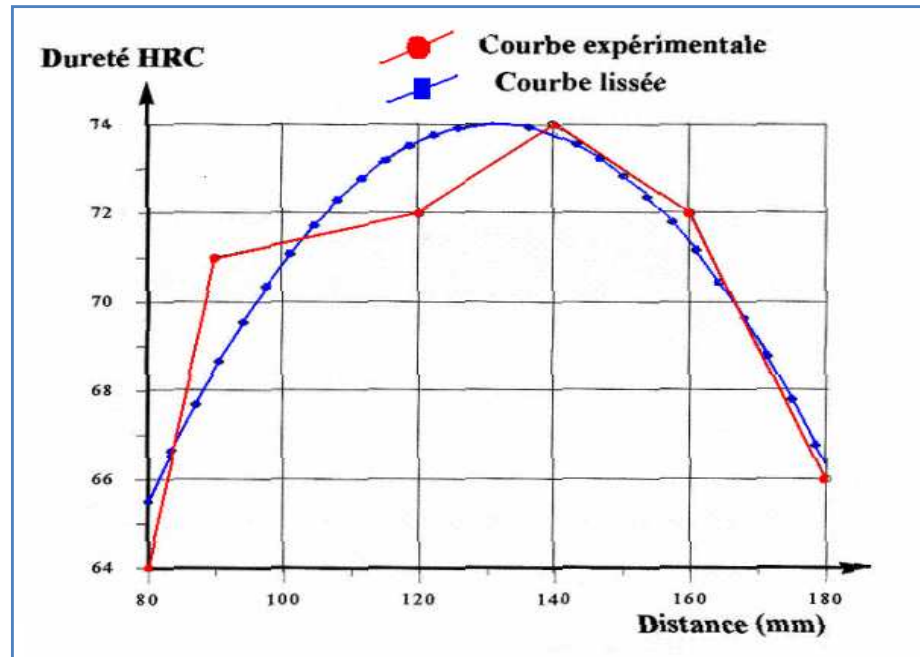


Figure IV.4 : Evolution de la dureté en fonction de la distance de projection [19].

IV.3.1. 4. L'échantillon après le revêtement

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

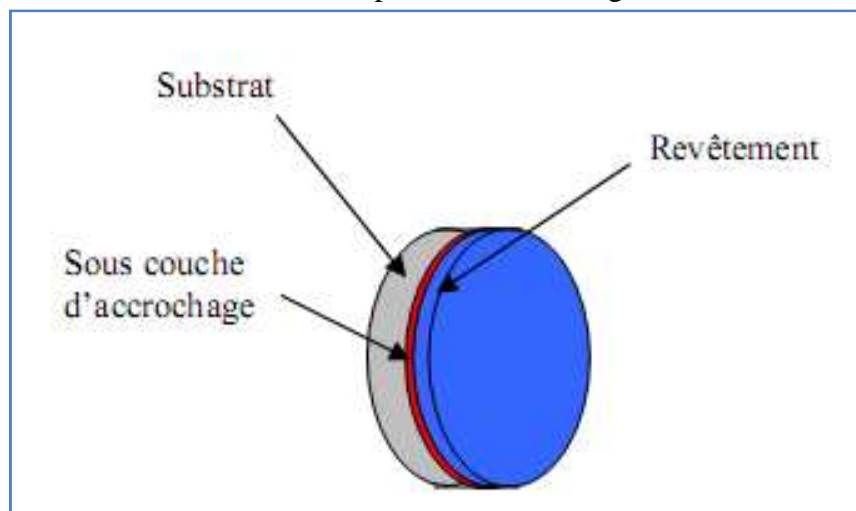


Figure IV.5 : Forme finale de l'échantillon après revêtement

IV.4. Fatigue thermique :

La projection thermique étant réalisée, un échantillon de chaque nuance à l'état brute de projection, sans aucun traitement ultérieur, est gardé comme référence. Les échantillons restants, 08 de chaque nuance, subissent les essais de fatigue thermique, comme nous l'expliquerons dans ce qui suit.

IV.4.1. Dispositif de la fatigue thermique

La Figure IV.6 représente le schéma du dispositif avec ses différents éléments :

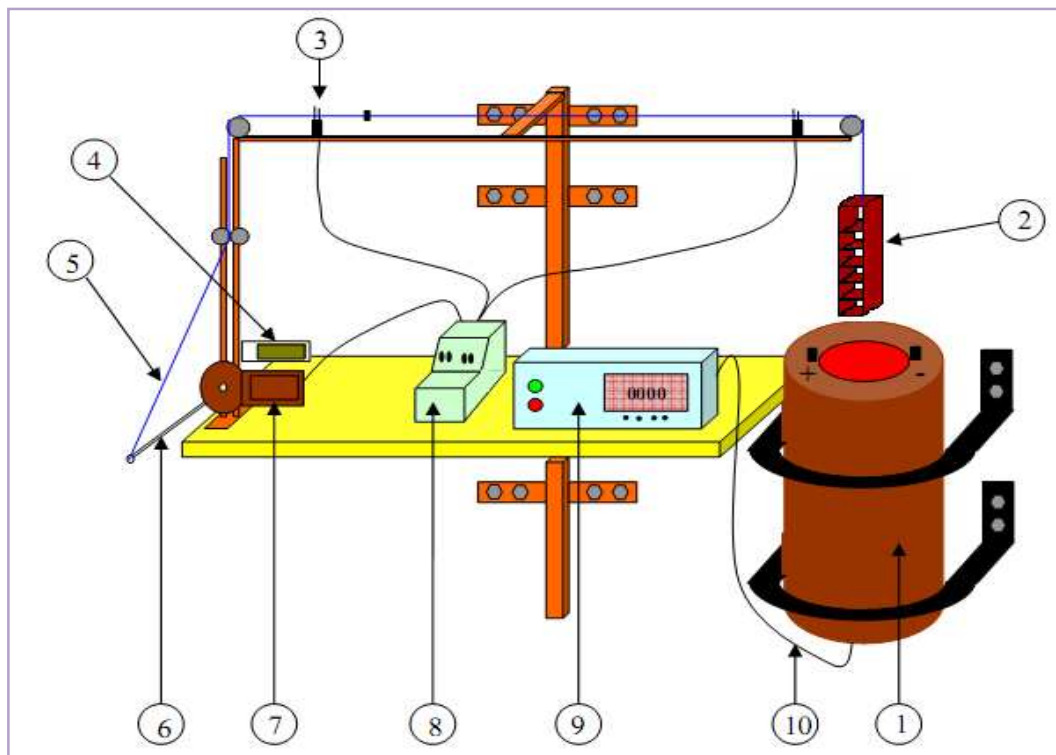


Figure IV.6 : Dispositif de la fatigue thermique [19].

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.

La Figure IV.7, quant à elle, elle représente la photo du dispositif que nous avons utilisé pour notre étude.



Figure IV.7 : Photographie du dispositif de la fatigue thermique utilisé.

Ce dispositif permet de réaliser des cycles de chauffage et de refroidissement. Les éprouvettes sont tour à tour chauffées dans le four tubulaire puis refroidies à l'air à l'extérieur du four. Ces cycles thermiques sont réalisés à l'aide d'un système électromécanique composé d'un moteur électrique à courant, le mouvement de porte échantillons est délimité par des contacts électriques sensibles (fins de course, élément 3). Ce système permet d'obtenir un mouvement oscillatoire vertical avec une fréquence constante, la vitesse d'oscillation désirée est obtenue à l'aide d'un temporisateur qui fixe le temps de chauffage et de refroidissement (temps à l'intérieur et à l'extérieur du four). La température du four est contrôlée par un thermocouple qui est relié au thermorégulateur.

IV.4.2. Les Conditions de Traitement

Les échantillons sont maintenus pendant un temps $t_{ch} = 5$ minutes à la température maximale $T_{max} = 620$ C° dans le four, puis refroidis à l'air jusqu'à $T_{min} = 37$ C° pendant un temps $t_{ref} = 10$ minutes comme résumé dans le tableau IV.6. La durée et la température du cycle sont commandées respectivement par un temporisateur et un régulateur de température.

Tableau IV.6 : Paramètres de la fatigue thermique.

Température maximale T_{\max}	620°C
Température minimale T_{\min}	37°C
Temps de chauffage t_{ch}	300 S
Temps de refroidissement t_{ref}	600 S

Au cours d'un cycle, l'évolution de la température pendant les opérations de chauffage (dans le four) et de refroidissement (hors du four), se fait selon la figure IV.8 [19].

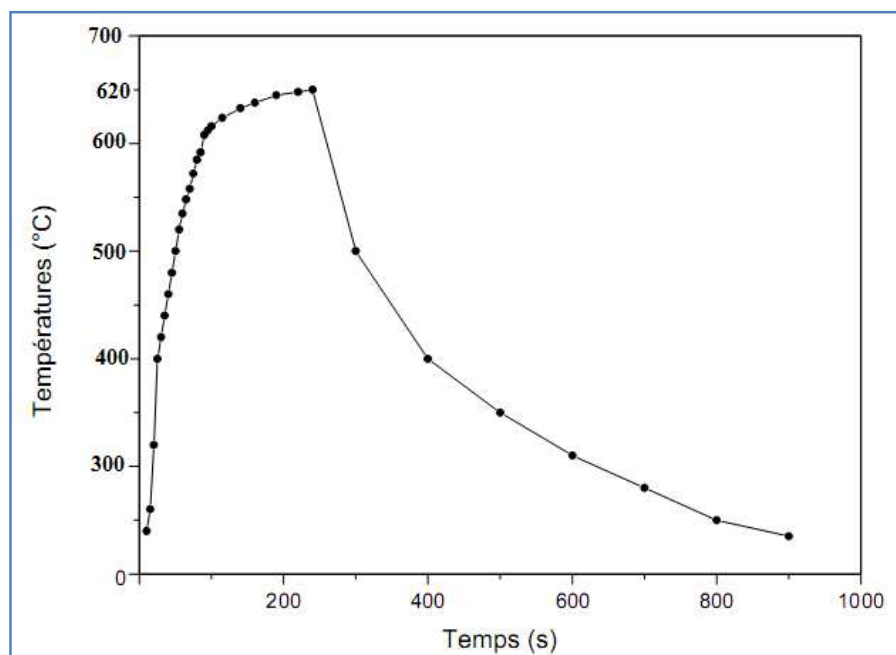


Figure IV.8 : Cycle thermique [19].

Le choix de la température maximale du cycle, pour éviter tout changement structural, est déterminé par les diagrammes d'équilibre fer-carbone (Annexes I) et la technique de dilatation différentielle concernant les alliages 25CrMo4 et 30NiCr11.

Les temps de maintien du chauffage et du refroidissement, sont choisis au vu de travaux antérieurs [15] qui en dégagent les valeurs optimales après plusieurs essais réalisés.

IV.5. TECHNIQUES D'ANALYSE

Pour la caractérisation de la qualité de nos échantillons après la fatigue thermique, nous avons eu recours au Contrôle Non Destructif (CND) par ultra-sons, à l'observation par microscopie optique et à la mesure de la microdureté. Ces techniques permettent d'avoir des informations sur la morphologie ainsi que sur l'adhérence du dépôt au niveau de l'interface.

Les différentes analyses sont réalisées sur tous les échantillons des deux nuances de multimatériaux, les échantillons témoins, sans qui n'ont pas subi de traitement de fatigue thermique, y compris.

IV.5.1. Caractérisation par technique des ultra-sons

Les ondes ultrasonores sont des vibrations mécaniques. Elles se propagent à l'intérieur des matériaux avec des vitesses qui dépendent du milieu lui-même et du type d'onde. Dans les matériaux métalliques, les fréquences d'utilisation courante vont de quelques centaines de kilohertz à quelques dizaines de mégahertz. Dans ce domaine de fréquence, l'amortissement dans l'air est tel qu'elles ne s'y propagent pratiquement pas.

Les principes fondamentaux du contrôle non destructif par ultrasons résident dans l'analyse de l'influence des défauts, du type localisés ou du type d'inhomogénéités de structure, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et diffraction sur les interfaces, atténuation dans la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion, vitesses de propagation variables selon les directions [29].

La méthode de contrôle utilisée est la méthode d'immersion, pour laquelle au lieu d'une analyse des ondes renvoyées vers le palpeur émetteur, on utilise un second palpeur placé à l'opposé du premier et qui sert uniquement de récepteur. Les impulsions ultrasonores reçues par ce palpeur, convenablement synchronisées et amplifiées, permettent de caractériser la transmission des ultrasons au travers de la pièce. Quand un défaut intercepte le signal, une partie de l'énergie ultrasonore est arrêtée et, par conséquence, l'énergie parvenant au capteur récepteur est diminuée [29].

La pièce à contrôler et les deux palpeurs émetteur et récepteur sont complètement immergés dans le liquide de couplage, l'eau. Les palpeurs et la pièce ne sont plus en contact, le sondage peut être manuel mais dans la plupart des cas, il est automatique (Figure IV.9) [29].



Figure IV.9 : Sondage ultra sonore par immersion [8].

a. Atténuations des ondes ultrasonores

L'atténuation est la réduction de l'amplitude et de l'énergie d'un signal à travers le milieu qu'il traverse. Dans un matériau idéal (milieu parfaitement homogène et isotrope), la pression acoustique d'un faisceau ultrasonore n'est affaiblie que dans le champ lointain. Dans le cas d'une onde plane (pour qu'il n'y ait pas de divergence du faisceau) l'amplitude de la vibration en fonction du trajet parcouru par l'onde décroît de façon exponentielle, selon la loi suivante :

$$A_1 = A_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

A_1 : amplitude après un parcours x .

A_0 : amplitude initiale.

α : coefficient d'atténuation.

Cependant, les matériaux naturels ne sont jamais idéaux, ils produisent une atténuation plus au moins prononcée des ondes ultrasonores, comme présenté sur la Figure IV.10 :

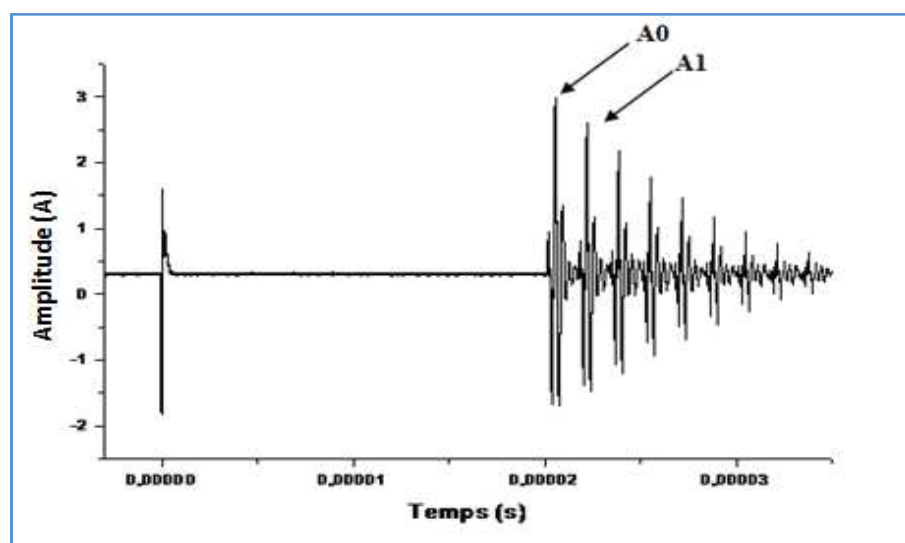


Figure IV. 10 : Signaux ultrasonores

b. Paramètres de contrôle

Pour notre contrôle aux US, nous avons utilisé les paramètres suivants :

1. La fréquence des palpeurs $F=2.25$ MHz de diamètre $D= 9.5$ mm ;
2. Oscilloscope numérique ‘‘TERONIX TDS 3054’’ ;
3. Générateur d’impulsion électrique ‘‘PANAMERICS model 5800’’ ;
4. La distance entre les deux palpeurs $x = 20$ mm ;
5. Le liquide de couplage est l’eau.

Au cours des contrôles par ultra-sons, l’échantillon est placé côté dépôt en face du palpeur émetteur. Nous balayons toute la surface de l’échantillon, et là où nous constatons une anomalie sur l’écran de l’oscilloscope, nous relevons la variation de l’amplitude des ondes en cet endroit, ce qui nous donne un tracé du genre reporté sur la figure IV.10.

IV.5.2. Analyse micrographique et microdureté

Pour l’observation au microscope comme pour la mesure de la microdureté, les échantillons doivent être préparés convenablement.

IV.5.2.1. Préparation des échantillons

a. Découpage des échantillons

A l’aide d’une micro tronçonneuse, nous découpons transversalement tous les échantillons. Et ce, pour mettre en évidence les différents éléments de notre multimatériau (Figure IV. 11).

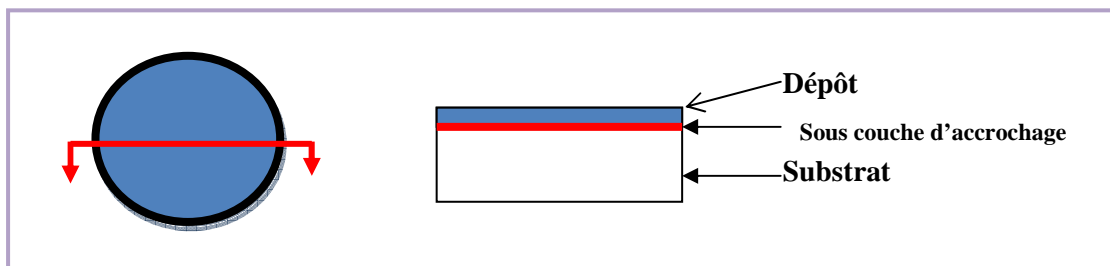


Figure IV. 11 : Découpage des échantillons

b. Enrobage à froid

Procédure qui consiste à mettre l’échantillon dans un moule et ajouter le mélange résine – durcisseur ; et ensuite laisser la résine se solidifier pendant quelques minutes. Cette étape permet une meilleure manipulation des échantillons pendant le polissage pour avoir une surface plane.

c. Polissage

On fait subir aux surfaces à observer des polissages mécaniques, afin d'obtenir des surfaces 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.120 jusqu'au plus fin P.1000, 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 une solution d'Alumine, 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.

IV.5.2.2. Observations par microscopie optique

On fait des observations par microscopie optique pour révéler les structures des différents constituants (substrat, sous couche et le dépôt).

Un microscope optique de type OLYMPUS permet l'observation des échantillons, avec un agrandissement qui varie de 50 à 100x. Ce microscope s'accompagne d'une caméra, reliée à l'écran d'un ordinateur permettant la capture de photos (Figure IV.12).

En plus de sa grande facilité d'utilisation, la microscopie optique permet l'observation de grandes surfaces et fournit donc une information globale sur l'aspect de la surface observée.



Figure IV.12 : Photographie du microscope optique utilisé

IV.5.2.3 Mesure de la microdureté

Les mesures de microdureté ont été effectuées avec un microduromètre de marque SHIMASZU HMV-M3, l'appareil utilisé est présenté dans la Figure IV.13 :



Figure IV. 13: Microduromètre SHIMATZU HMV-M3.

Le pénétrateur est une pyramide droite à base carrée et d'angle au sommet de 136° . Sous une charge F , la pyramide est imprimée dans l'échantillon. On mesure les diagonales " d " de l'empreinte et on calcule la valeur de la dureté Vickers à partir de la formule:

$$H_V = 0.1892 (F/d^2)$$

Où F est le niveau de la charge appliquée, d est le diamètre de l'empreinte moyenne des deux diagonales de l'empreinte : $d = (d_1 + d_2) / 2$ (Figure IV.14) [30].

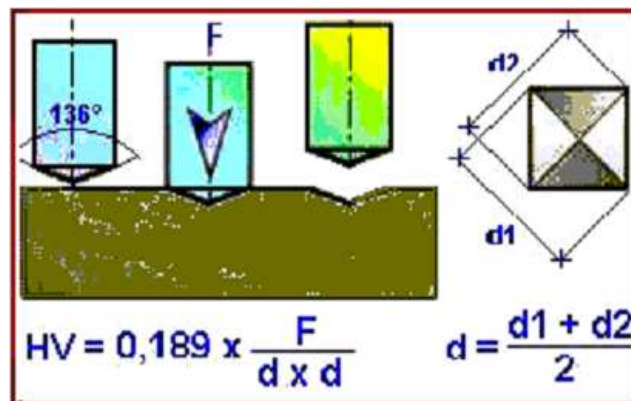


Figure IV.14: Principe de l'essai de dureté Vickers [30].

Pour notre étude, nous avons appliqué une charge de 100gr pendant 5 à 10 secondes, en évitant tout choc et vibration.

Chaque valeur de microdureté relevée est une moyenne de 3 essais en 3 endroits différents pris par balayage le long de l'échantillon.



Chapitre V :

Résultats et interprétations

V.1. Introduction

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 la caractérisation des dépôts projetés thermiquement.

Notre facteur d'étude sera le nombre de cycles, pour souligner son influence sur l'atténuation des ultra-sons à travers les multimatériaux, sur leur micrographie et leur microdureté en particulier dans l'interface substrat/ dépôt.

V.2. Le contrôle par ultra-sons

Les résultats tels que obtenus par le contrôle aux ultra-sons sont présentés dans les figures V.1 et V.2

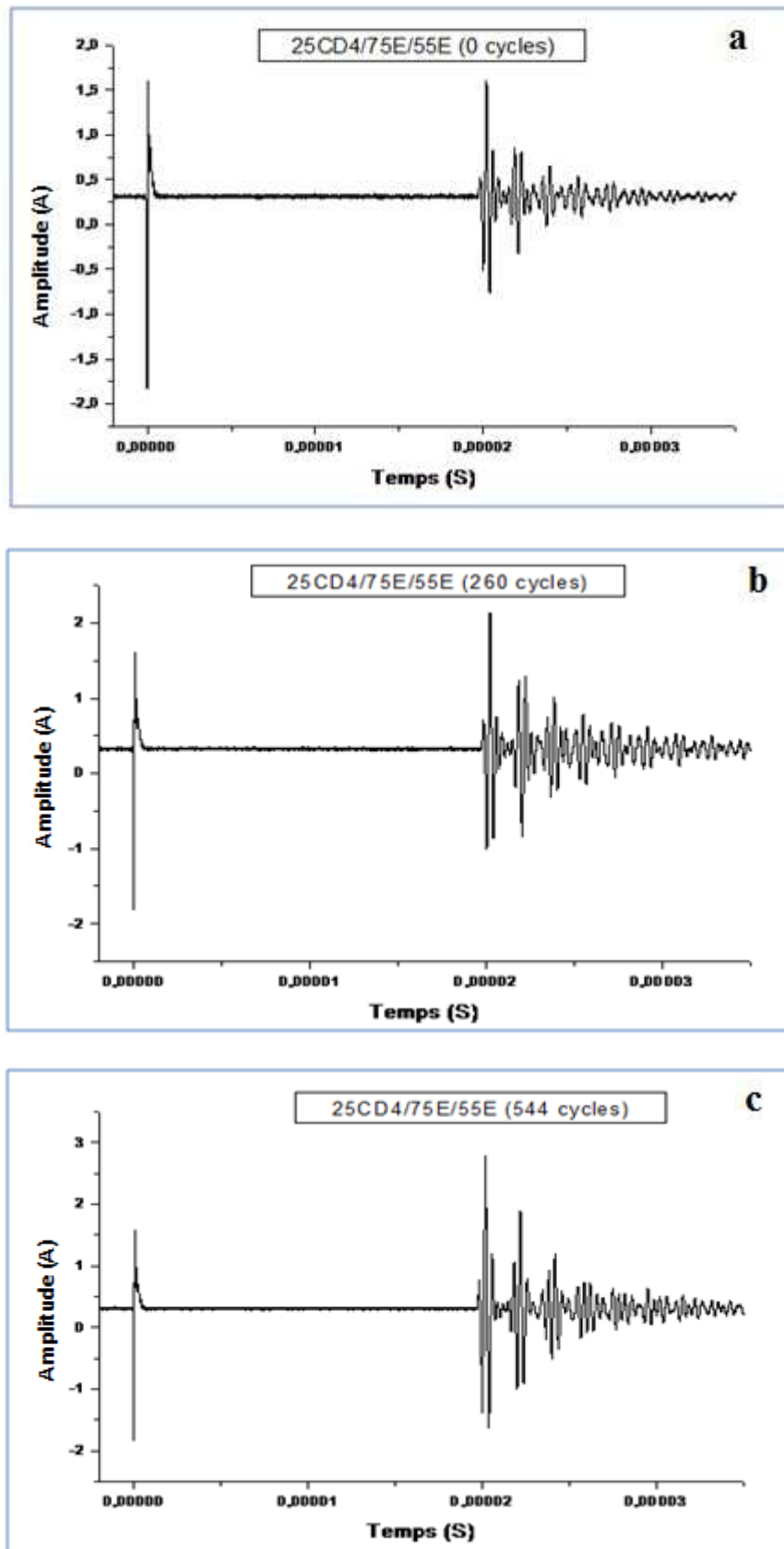


Figure V.1 : Signaux ultrasonores de 25CrMo4/75E/55E

a) à 0 cycle, b) après 260 cycles, c) après 544 cycles.

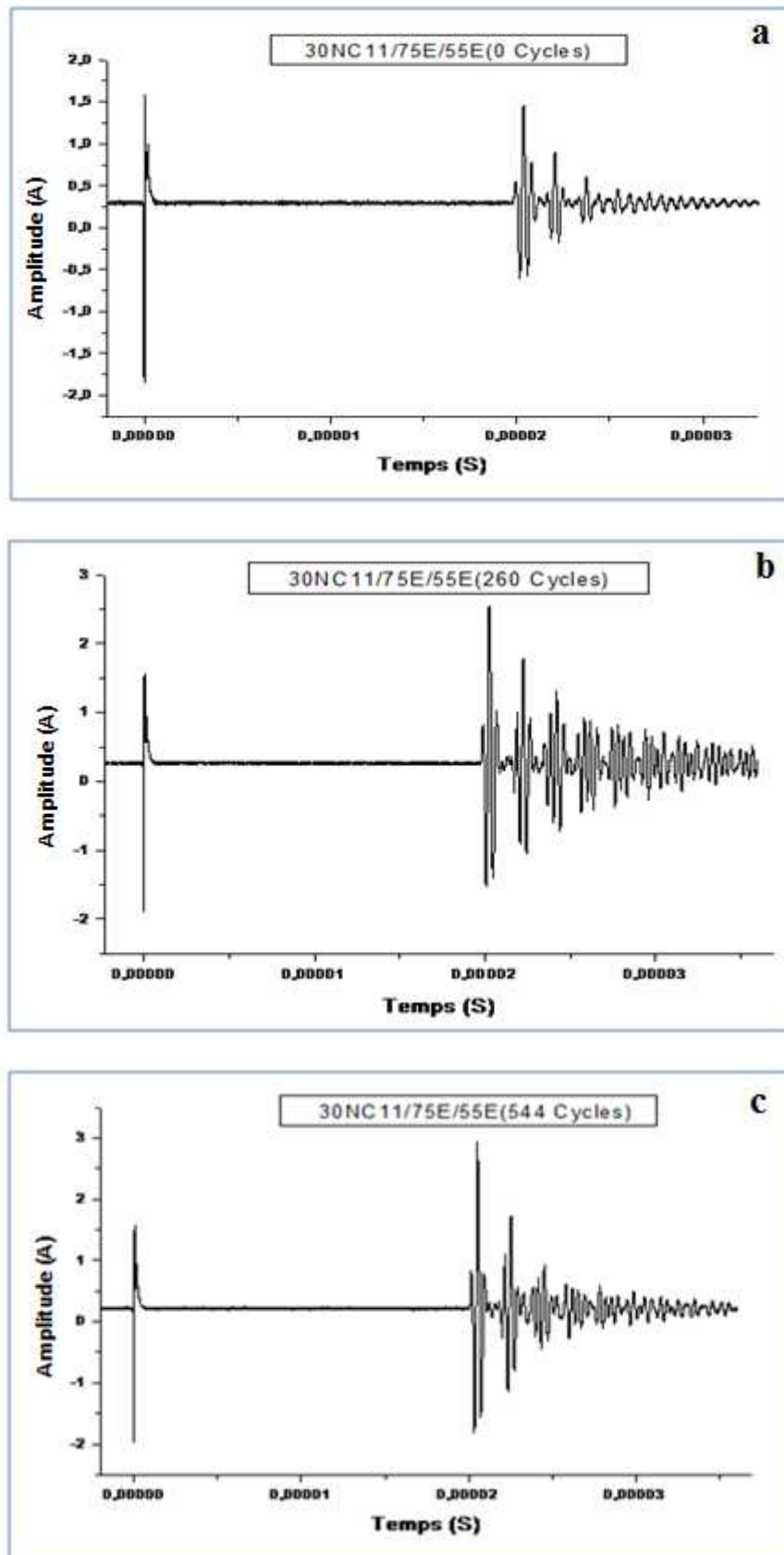


Figure V.2 : Signaux ultrasonores de 30NiCr11/75E/55E

a) à 0 cycle, b) après 260 cycles, c) après 544 cycles.

Cependant des différences se manifestent en fonction du nombre de cycles thermiques. Pour quantifier ces différences, on calcule le coefficient d'atténuation donné par l'équation V.1 :

$$\alpha = 1/x * \text{Ln} (A_0 / A_1) \quad \text{équation V.1}$$

- α : coefficient d'atténuation.
- A_1 : amplitude après un parcours x .
- A_0 : amplitude initiale.

Les valeurs calculées de l'atténuation sont regroupées représenté dans le tableau V.1

Tableau V.1 : les valeurs de l'atténuation

Nombres des cycles	Atténuation α (db/m)	
	25CrMo4/75E/55E	30NiCr11/75E/55E
544	58.95	60.74
382	73.02	83.2
260	77.65	87.65
130	77.1	87.2
0	78.3	88.4

La variation de l'atténuation en fonction du nombre de cycles, pour chaque type de multimatériau, est présenté sur les figures V.3 et V.4 :

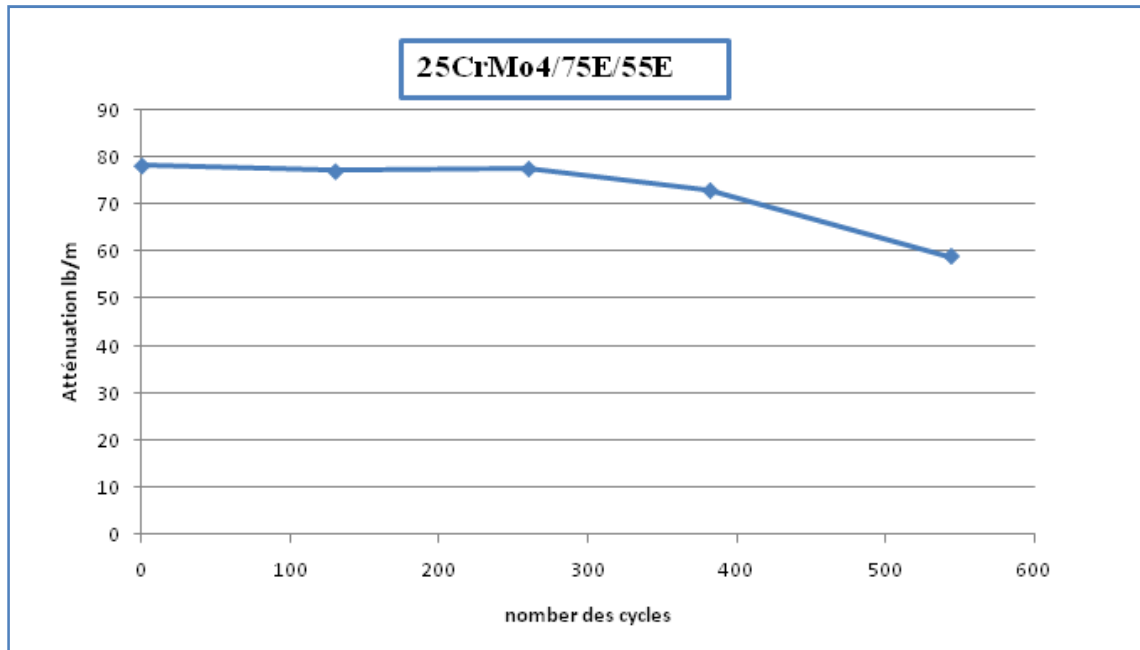


Figure V.3: Courbe de variation de l'atténuation en fonction du nombre de cycles du multimatériau 25CrMo4/75E/55E.

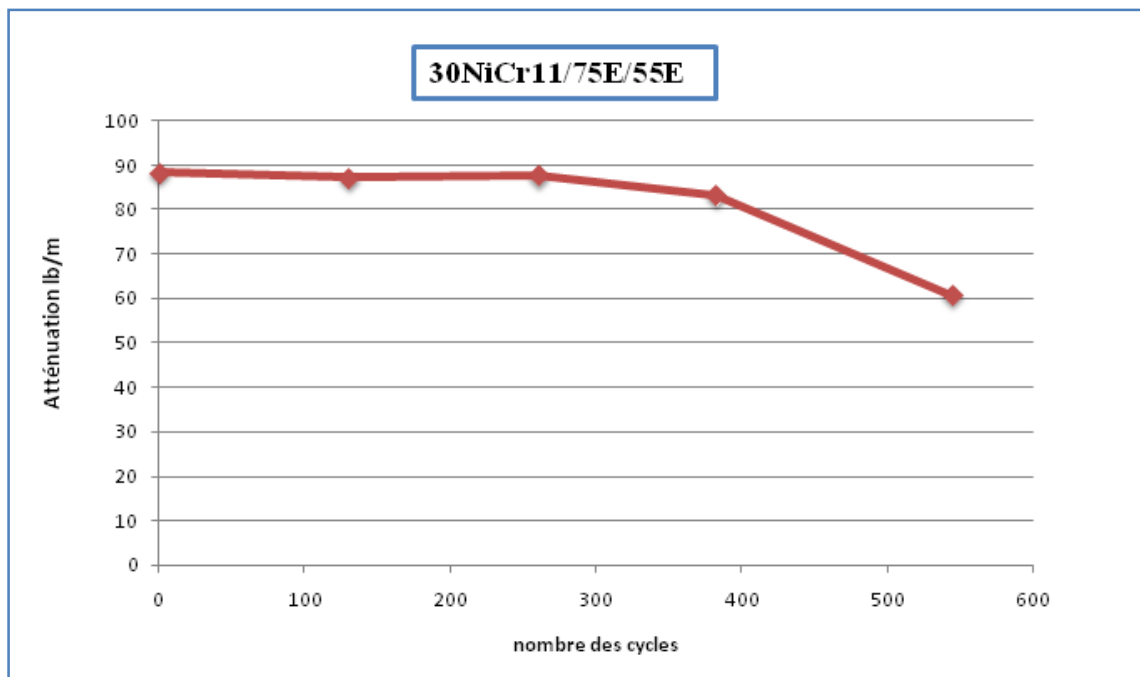


Figure V.4: Courbe de variation de l'atténuation en fonction du nombre de cycle du multimatériau 30NiCr11/75E/55E.

Nous constatons que, pour les deux multimatériaux, l'atténuation des ultra-sons en fonction du nombre de cycles thermiques varie très peu pour les premiers 260 cycles, à partir desquels elle entame une légère diminution, pour se prononcer à partir des 382 cycles.

Autrement dit aucun changement notable ne se fait sentir au niveau des multimatériaux et par conséquent au niveau des interfaces substrat/dépôt au début. Ce fait témoignerait d'une bonne adhérence dépôt/substrat, du moins jusqu'au nombre de cycles atteint, 544. En effet s'il y avait fissuration, l'atténuation aurait augmenté au lieu de diminuer. Théoriquement l'augmentation de l'atténuation est du fait d'un taux élevé de défaut (pore, fissure,) donc à une mauvaise adhérence entre le dépôt et le substrat.

La diminution de l'atténuation qui s'amorce vers les 382 cycles, peut être du fait que le revêtement est en voie de densification. En effet ce revêtement, pour avoir été déposé par projection thermique, ne peut que gagner en densification s'il est soumis à un chauffage ultérieur. Lequel chauffage amène au moins au rétrécissement et diminution des pores, tant dans le dépôt que dans la sous couche d'accrochage, par l'entassement entre les lamelles constituant les dépôts, sous couche d'accrochage et revêtement lui-même..

En résumé, jusqu'aux 544 cycles thermiques atteint dans notre étude, le revêtement adhère toujours au substrat, quelle que soit sa nuance. Et que ces cycles auraient même contribué plutôt à densifier le dépôt.

V.3. Observations en microscopie optique des multimatériaux 25CrMo4/75E/55E et 30NiCr11/75E/55E

a. Influence du grenailage sur l'adhérence :

Le grenailage 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.

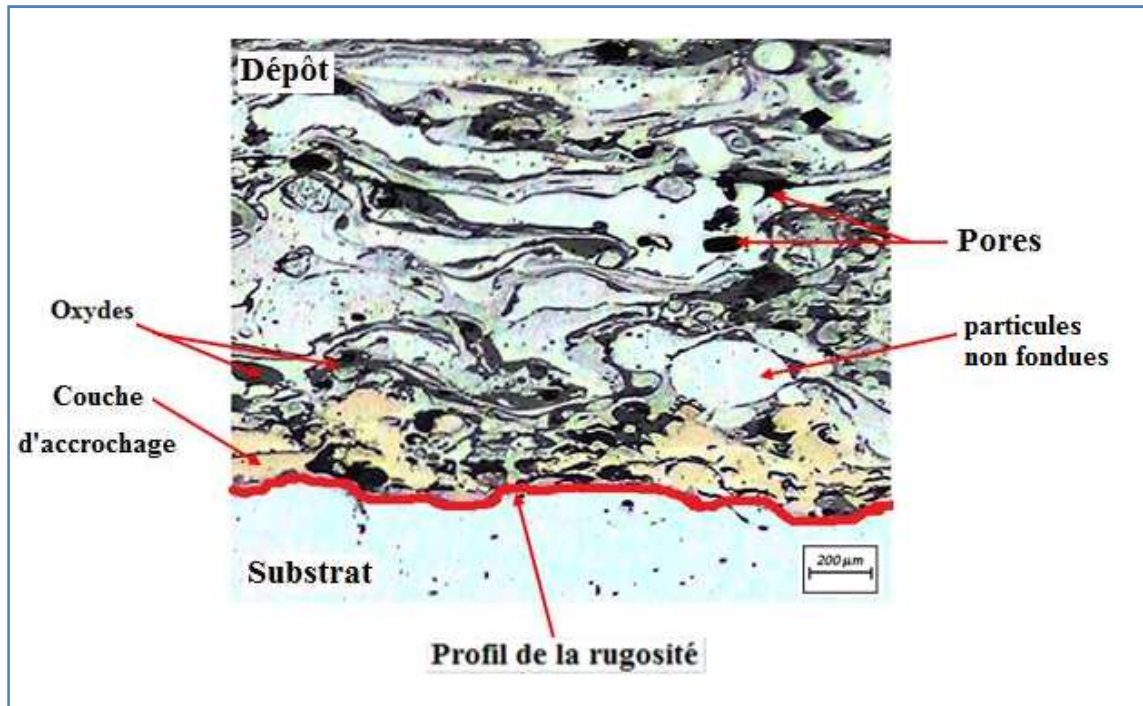


Figure V.5 : Aspect des multimatériaux avec leurs différentes phases.

La Figure V.5 montre le rôle du grenailage avant la projection et met en évidence l'accrochage mécanique Substrat/dépôt. L'adhérence des dépôts réalisés sur des surfaces rugueuses résulte 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.

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.

b. Influence de la fatigue thermique sur les multimatériaux

L'observation au microscope des deux multimatériaux 25CrMo4/75E/55E et 30NiCr11/75E/55E nous a permis de voir l'évolution de l'interface dépôt /substrat suivant le nombre de cycles.

Nous ne reportons que les micrographies à 0 cycle, et après 260 et 544 cycles thermiques

Les Figures V.6 et V.7 révèlent une structure lamellaire des dépôts élaborés par projection thermique.

Les micrographies des deux multimatériaux se ressemblent assez. Le revêtement comporte des pores, des particules non fondues, et des oxydes. La porosité provient soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes fondues et celles non fondues. Soit de gaz enfermés pendant la solidification

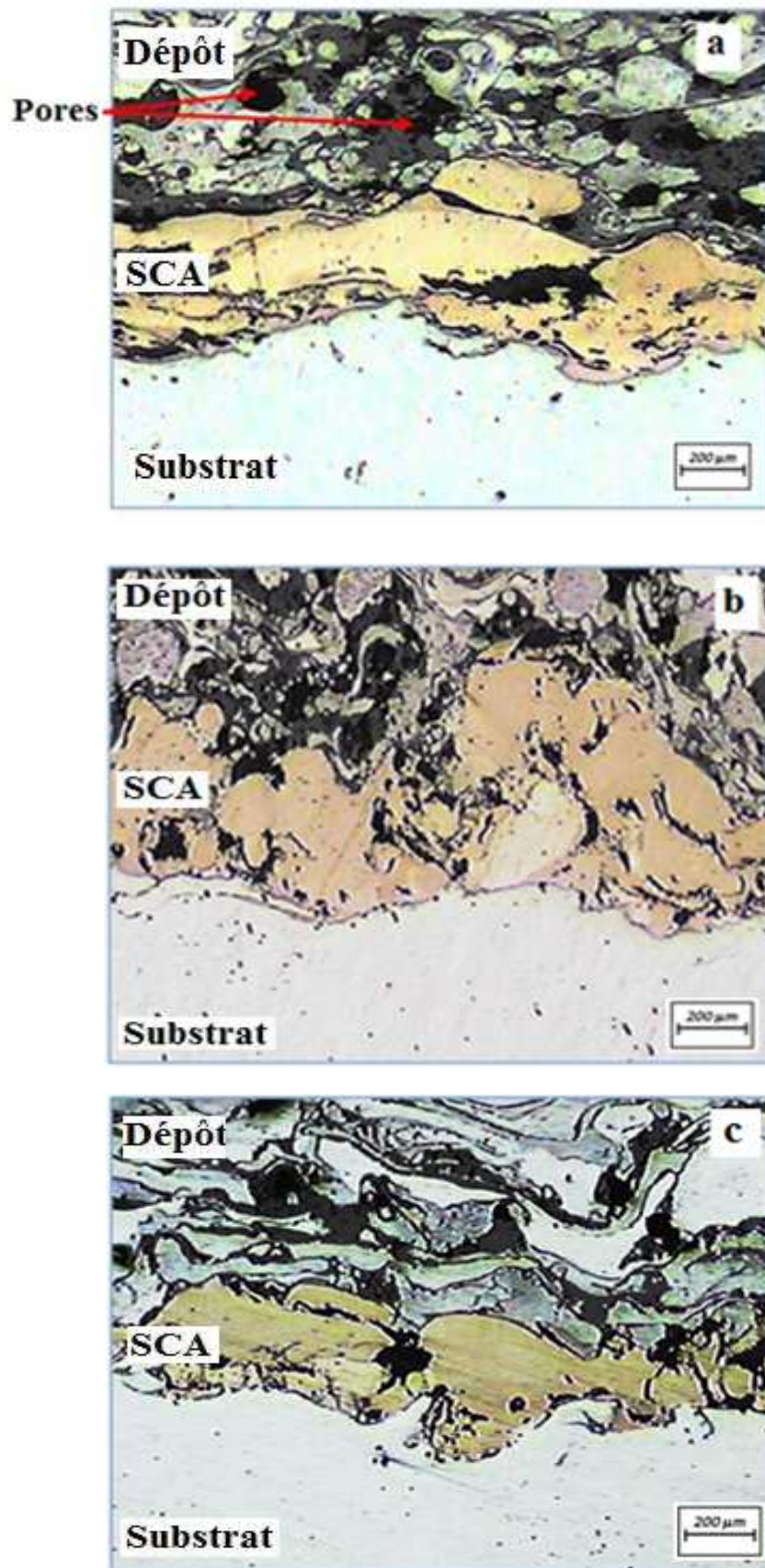


Figure V.6 : Micrographies du multimatériau 25CrMo4/75E/55E
a) à 0 cycles, b) après 260 cycles, c) après 544 cycles.

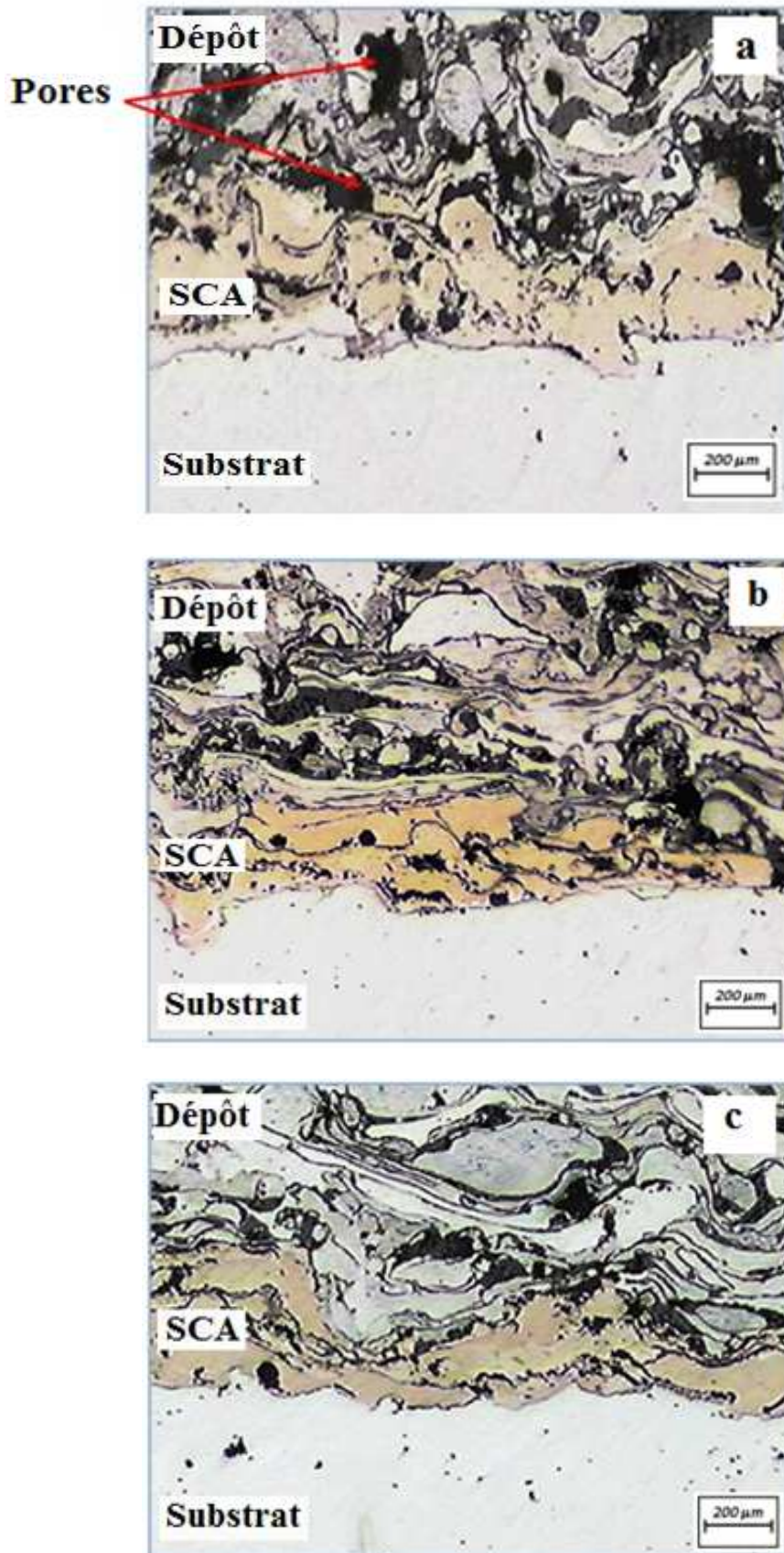


Figure V. 7: Micrographies du multimatériau 30NiCr11/75E/55E
a) à 0 cycles, b) après 260 cycles, c) après 544 cycles.

Nous constatons, par ailleurs, que lorsque le nombre de cycles augmente, les pores deviennent plus petits et même moins nombreux, les lamelles composant le dépôt s'affinent alors que la couche d'accrochage semble s'écraser. Aussi le dépôt semble s'être densifié, et on ne remarque aucune fissuration au niveau de l'interface, pour avoir balayé toutes les plages des échantillons.

Ceci rejoint les résultats obtenus par le contrôle aux ultra-sons qui attestent de la bonne adhérence du dépôt et de la légère densification du dépôt.

V. 4. Microdureté des multimatériaux 25CrMo4/75E/55E et 30NiCr11/75E/55E

Des mesures de la microdureté, sous la charge de 100gr, ont été relevées sur les différents échantillons étudiés.

Les mesures ont été faites en allant du substrat vers le revêtement en passant par la sous couche d'accrochage.

Le tableau V.2 regroupe les valeurs obtenues, pour les deux multimatériaux, en fonction de la profondeur de l'échantillon pour 0, 260 et 544 cycles thermiques.

Chaque valeur est la moyenne de trois essais pris à la même profondeur, en partant du bas du substrat.

Tableau V.2 : Valeurs de la microdureté (HV₁₀₀).

Profondeur (mm)	la microdureté (HV ₁₀₀)					
	25CrMo4/75E/55E			30NiCr11/75E/55E		
	0 cycle	260cycles	544 cycles	0 cycle	260cycles	544 cycles
0.5	264	252.5	283	151.4	150.5	151.2
2	272.2	283	294.3	182.2	173.4	138.4
3.5	268.1	308.9	296.7	161.4	158.5	204.1
5.2	376.3	422.6	463.6	285.2	270.1	376.3
5.8	498.3	521.4	553.7	445.8	489.3	523.6

Ces valeurs sont ensuite exploitées pour établir l'évolution de la microdureté à travers les différents échantillons, substrat/sous couche d'accrochage /revêtement, en fonction du nombre de cycles et en fonction de la profondeur (figures V.8, V. 9)

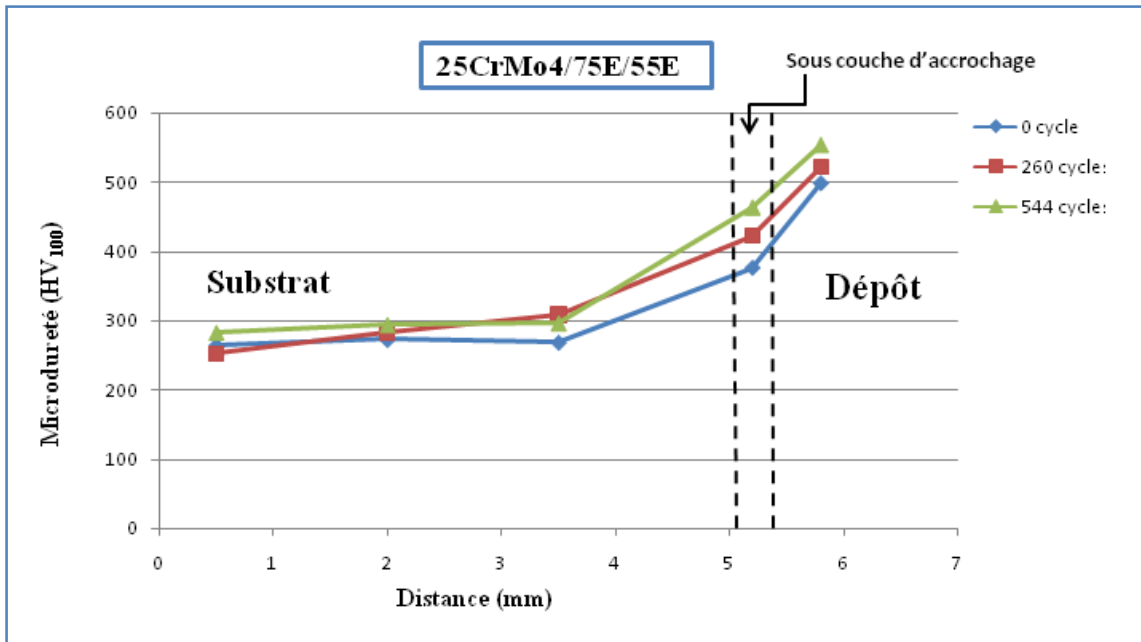


Figure V.8 : L'évolution de la microdureté de multimatériau 25CrMo4/75E/55E en fonction de la profondeur et du nombre de cycles thermiques.

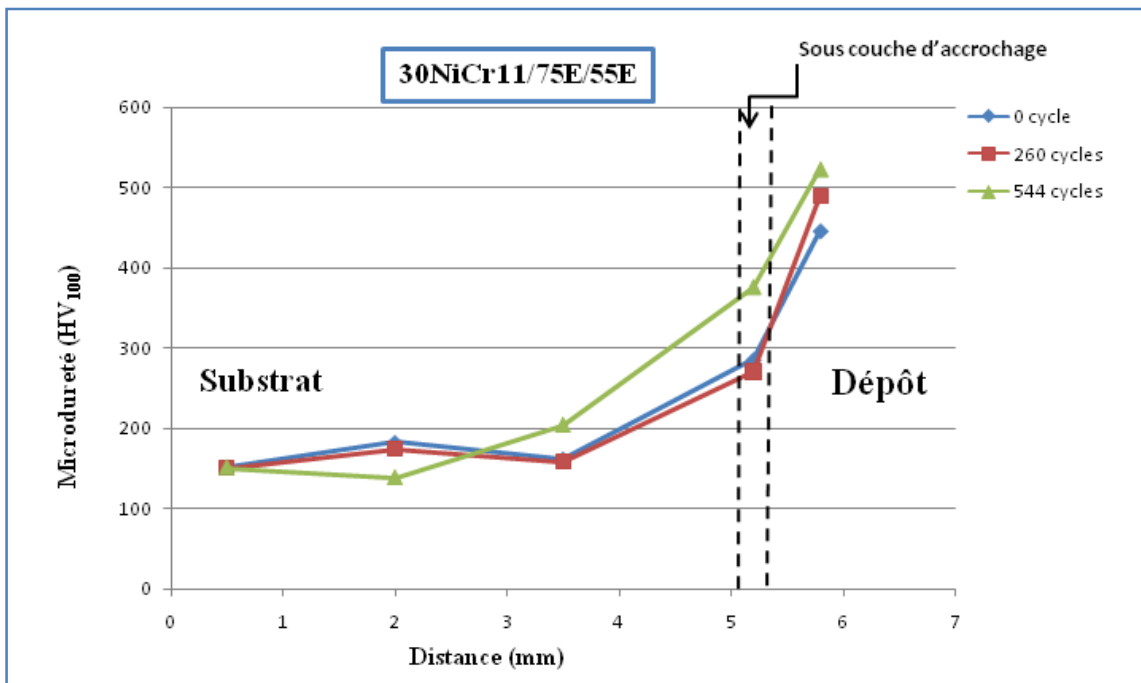


Figure V.9 : L'évolution de la microdureté du multimatériau 30NiCr11/75E/55E en fonction de la profondeur et du nombre de cycles thermiques.

L'évolution de la microdureté en fonction de la profondeur est pratiquement la même pour les échantillons étudiés, des deux multimatériaux 30NiCr11/75E/55E et 25CrMo4/75E/55E.

A 0 cycle, c'est-à-dire avant tout traitement, à l'état de projection brute, nous remarquons déjà que la microdureté est plus prononcée au niveau du revêtement qu'au niveau du substrat, alors qu'au niveau de l'interface elle a une valeur intermédiaire. Ce qui est normal, puisque, à la base, le dépôt est plus dur que le substrat, ce pourquoi il a été déposé.

On constate une augmentation des valeurs des microduretés par l'augmentation du nombre de cycles, en particulier dans le dépôt et la sous couche d'accrochage et dans le substrat au voisinage de l'interface. Alors dans le substrat, loin de la couche d'accrochage, la microdureté reste invariante, ce qui se comprend vu que le substrat lui-même est à priori peu affecté par ces cycles thermiques.

L'augmentation de la microdureté du substrat au voisinage de l'interface peut s'expliquer par l'effet du grenailage qui a généré des précontraintes.

L'augmentation de la microdureté du dépôt et la sous couche d'accrochage peut s'expliquer par la diminution de nombre pores entre les lamelles constituant le dépôt, et par augmentation de taux des oxydes pendant l'opération de cycle thermique.

En conclusion, les résultats des différentes investigations entreprises sur les deux types de multimatériaux, se rejoignent et sont en faveur d'une bonne adhérence du revêtement, qui persiste même après la fatigue thermique, de 544 cycles, qui lui ont été imposés. De même qu'ils révèlent un revêtement qui se densifie, par la diminution de la porosité, et l'affinement des lamelles.

Conclusion Générale

La plupart des revêtements métalliques en particulier ceux réalisés par la projection thermique permettent d'apporter des solutions efficaces aux problèmes variés et souvent complexes faisant appel aux moyens de protection. En effet, dans le cas de la protection des pièces (Récupération et la rénovation) contre l'agressivité de l'environnement, il apparaît que l'utilisation de cette technique est d'un grand intérêt dans le sens qu'elle permet plusieurs améliorations d'ordre technique, économique et écologique.

Pour mener à bien notre étude, nous avons utilisé un dispositif de fatigue thermique. Cet équipement nous a permis de suivre le comportement et la tenue de l'interface des composites **25CrMo4/75E/55E** et **30NiCr11/75E/55E** réalisé par projection thermique.

Les méthodes de caractérisation utilisées des deux multimatériaux **25CrMo4/75E/55E** et **30NiCr11/75E/55E** nous ont permis de dégager les points principaux suivants, pour le nombre de cycles atteints :

Les contrôles par ultra-sons ont montré que plus le nombre de cycles augmente plus l'adhérence augmente et qu'il n'y a aucune fissure entre le dépôt et substrat.

L'examen micrographique des coupes transversales des multimatériaux nous a permis de constater :

- Une structure lamellaire du dépôt ;
- Le revêtement comporte des pores, des particules non fondues, et des oxydes. La porosité provient soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification ;
- Les surfaces rugueuses augmentent l'ancrage mécanique substrat/dépôt par la croissance de l'aire de contact.

Les mesures de la microdureté Vickers montrent qu'il y a une augmentation dans les différentes régions (dépôt et la sous coche d'accrochage et dans le substrat au voisinage de l'interface) avec le nombre de cycles thermiques. Ce qui atteste que la région proche de l'interface subissant les sollicitations thermiques, a acquis de nouvelles propriétés mécaniques.

Il est clair que nos résultats bien que probants devraient être étayés par des tests visant l'adhérence même du revêtement, comme les tests d'arrachement par exemple.

Aussi nous préconisons, si ce travail était à continuer, deux points importants :

- Faire le nombre nécessaire de cycles thermiques, au-delà des 544 réalisés par nos soins, jusqu'au décollement du revêtement, ne serait-ce que par endroit. Afin de cerner les conditions de rupture pour mieux comprendre les phénomènes qui la gèrent. Ce qui permettra de mieux cerner la durée de vie du revêtement dans les conditions de fatigue adoptée.
- Faire des tests d'arrachement pour mieux conforter les résultats et se prononcer avec rigueur quant à l'adhérence.

Références Bibliographiques

[1] **N. MESRATI, Q. SAIF, D. TREHEUX.**

“Projections plasma de zircone sur différents substrats métalliques. IIème Conférence Franco-Allemande sur les Céramiques Techniques”, 4-6 mars 1987, Aachen/Aix-la-Chapelle (RFA).

[2] **N. MESRATI, D. NGUYEN, D. TREHEUX.**

“Rôle du zinc et de l’argent sur l’adhérence de zircone projetée sur un alliage d’aluminium-silicium 12%”. Revue de Métallurgie- CIT/Science et Génie des matériaux, N° 12, Décembre 1993, pp. 1673 1680.

[3] **A. PRONER.**

Revêtements par projection thermique. Techniques de l’Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M1645 (Société AREGA), (2005).

[4] **F. RALETZ**

“Contribution au développement d’un procédé de projection dynamique à froid (P.D.F.) pour la réalisation de dépôts de nickel”. thèse de Doctorat de l’université de limoges, 2002.

[5] www.unilim.fr, (Source internet au 12/04/2010).

[6] techniques des traitements de surface, www.tcpp.fr/images/schemaprojection.gif (Source internet au 20/04/2010).

[7] Gordon England Nature of thermal spray coatings www.advanced-coating.com, (Source internet 03/05/2010).

[8] [http:// www.gazettelabo.org](http://www.gazettelabo.org), (Source internet au 12/04/2010).

[9] **S. NOUROUZI**

“Contribution à l’étude du procédé arc-fil pour la réalisation des dépôts métalliques durs résistants à l’usure abrasive”. Thèse de doctorat, L’UNIVERSITE DE LIMOGES, novembre 2004.

[10] Guide de revêtement de surface www.surfatec.fr (Source internet au 12/04/2010).

[11] Manuel d’entretien du pistolet Arcspray. Version 2002

Références Bibliographique

[12] N. MESRATI, H. AJHROURH, D. NGUYEN, D. TREHEUX.
“Thermal Spraying and Adhesion of Oxides on to Graphite.
Journal of Thermal Spray Technology”, Vol 9, N°1, pp. 95-99. 2000

[13] Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre. (Source internet au 12/04/2010).

[14] M. ELBESSEGHI

“Elaboration et caractérisation des multimatériaux projetés thermiquement à base d’alliage d’aluminium”. Mémoire de PFE, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, juin 2007.

[15] S. BOUFLIGHA,

“Comportement en cyclage thermique de l’interface du matériau composite 55E+65 E/35CD4 réalisé par projection thermique”, Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, juin2000.

[16] 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.

[17] 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.

[18] C. DEHMAS.

“Etude de l’influence des postes de traitement sur l’adhérence et le comportement mécanique d’un multimatériau réalisé par projection thermique”. Mémoire de PFE. Ecole Nationale Polytechnique. Alger, 1994.

[19] O. LADJALI,

“Comportement en fatigue thermique de biomatériaux à Base d’alliage d’aluminium et étude expérimentale et modélisation”, Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, Juin2009.

[20] E. SILVERI, E. CHASSAING, S.B. GORYACHEV.

“Problèmes de mesure d’adhérence de revêtement métallique sur substrat métallique”, Journal de Physique IV, 2003

[21] A. ZEGHLOUL,

“Mécanismes d’endommagement des structures”. Master Sciences et Technologies. Université de METZ, 2005.

Références Bibliographique

[22] **S.MANSON,**

“ Les contraintes d'origine thermique”, Editions Dunod, Paris, 1967.

[23] **K.OURARI,**

“Evolution microstructurale et mécanique d'un acier allié au chrome molybdène vanadium (Z160CDV12) en conditions de fatigue thermique”, Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, 2001.

[24] **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”. Mémoire de magister. USTHB. Alger, 1990.

[25] **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.

[26] **C. BATHIAS, J.P. BAÏLON,**

“La fatigue des matériaux et des structures”, Maloine S.A éditeur Paris, 1980.

[27] **K.OURARI,**

“Evolution microstructurale et mécanique d'un acier allié au chrome-molybdène-vanadium (Z160CDV12) en conditions de fatigue thermique”, Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, 2001.

[28] **B. GUERGUEB,**

“Influence de certains paramètres sur l'endurance sous entaille en flexion rotative”, Mémoire de magister. Ecole Nationale Polytechnique. Alger, décembre 2007.

[29] www.cett.ch/fr/essai_non_d_estructif_materiau_end.php. (Source internet au 06/06/2010).

[30] **M. Cherif Abdellatif**

“Etude de la fatigue thermique d'un revêtement de chrome sur l'acier à outil de nuance 32CDV13 ”. Mémoire de PFE. Ecole Nationale Polytechnique. Alger, juin 2009.

Annexes I : Diagramme d'équilibre Fe-C métastable

