

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Métallurgique

Laboratoire Génie des Matériaux <<générale électrique>> (Algesco)

Mémoire de projet fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des matériaux

Thème

Etude et caractérisation de poudre pulvérisée par plasma atmosphérique (APS) sur turbine à gaz utilisant deux gaz plasmagènes différents (Ar/H₂ et N₂/H₂)

Réaliser par :

Gheziel ABIDI

Sous la direction de

M. Mohammed-el Amine DJEGHLAL (ENP)

M. Ahmed HAMRIT (ALGESCO)

Présenté et soutenu publiquement le 27/06/2019

Composition du Jury :

Président : M. N. MESRATI

Professeur, ENP

Promoteur : M. M. DJEGHLAL

Professeur, ENP

Examineur : M. A. HAMRIT

lead ingénieur, ALGESCO

Examineur : M. H. YOUSFI

Professeur, ENP

ENP 2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Métallurgique

Laboratoire Génie des Matériaux << générale électrique>> (Algesco)

Mémoire de projet fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des matériaux

Thème

Etude et caractérisation de poudre pulvérisée par plasma atmosphérique (APS) sur turbine à gaz utilisant deux gaz plasmagènes différents (Ar/H₂ et N₂/H₂)

Réaliser par :

Gheziel ABIDI

Sous la direction de

M. Mohammed-el Amine DJEGHLAL (ENP)

M. Ahmed HAMRIT (ALGESCO)

Présenté et soutenu publiquement le 27/06/2019

Composition du Jury :

Président : M. N. MESRATI

Professeur, ENP

Promoteur : M. M. DJEGHLAL

Professeur, ENP

Examineur : M. A. HAMRIT

lead ingénieur, ALGESCO

Examineur : M. H. YOUSFI

Professeur, ENP

ENP 2019

ملخص:

تتكون الأطروحة من دراسة مقارنة لتطبيق الطلاء الصلب من خلال إسقاط حراري للبلازما باستخدام غازات مختلفة، الأولى هي الأرجون مع الهيدروجين و الثانية هي النيتروجين مع الهيدروجين. يغطي العمل التجريبي تحليلاً للسلوك الميكانيكي والمجهرية للرواسب على أربعة أنواع من العينات. يهدف هذا العمل إلى مقارنة المكاسب الاقتصادية التي يمكن أن يحققها (استبدال / عدم استبدال) الغازات.

الكلمات الرئيسية: الطلاء، الإسقاط حراري، البلازما، تقييم النتائج.

Abstract:

The thesis consists of a comparative study of the application of the hard coating by a plasma thermal projection using two different gases, the first being argon with hydrogen and the second nitrogen with hydrogen. The experimental work covers an analysis of the mechanical and microstructural behavior of the deposit on four types of specimens. This work aims to compare the economic gains that the (substitution / non-substitution) of gases can generate.

Key words: coating, thermal spray, plasma, evaluation of results.

Résumé:

Le mémoire consiste en une étude comparative de l'application du revêtement dur par une projection thermique plasma utilisant deux gaz différents, le premier étant l'argon avec l'hydrogène et le second le nitrogène avec l'hydrogène. Le travail expérimental couvre une analyse du comportement mécanique et microstructurale du dépôt sur quatre types d'éprouvettes. Ce travail a pour objectif une comparaison des gains économique que peut engendrer la (substitution / non substitution) des gaz.

Mots clés: revêtement, projection thermique, plasma, évaluations des résultats.

Dédicace

Je dédie ce travail:

A ma mère adorée qui a rejoint les cieux trop tôt, beaucoup trop tôt...

A ton âme qui m'a quitté sans avoir le fruit de son éducation l'âme noble qui m'a toujours entourée comme une lumière qui m'éclaire le chemin.

Repose ma mère en paix

A mon très cher père,

Pour tout l'amour dont tu m'as entouré, pour tout ce que tu as fait pour moi.

Que dieu le tout puissant, te préserve et te procure santé et longue vie afin que je puisse à mon tour te combler.

A tous mes frères et sœurs, en témoignage de mon amour et ma profonde admiration; que dieu vous protège et vous prête bonne santé et longue vie.

A tous mes professeurs.

A tous le personnel d'ALGESCO.

A tous ceux qui ont participé à ma formation.

A tous mes très chers amis.

Que dieu vous bénisse.

Une spéciale dédicace à la promotion 2016-2019 Génie des matériaux.

Remerciement:

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire **M. Mohammed El Amine DJAGHLAL**, professeur à l'école nationale polytechnique, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur de stage et examinateur de mémoire, **M. Ahmed HAMRIT**. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'aimerais remercier **M.N. MESRATI**, président de jury et messieurs **Hamid. YOUSFI**, examinateur pour avoir accepté d'examiner et de juger mon travail, ainsi que l'ensemble des enseignants du département de génie des matériaux pour la formation d'excellence qu'ils m'ont dispensé durant les trois années de spécialité.

Je remercie en particulier **M. Farid KACED** pour le soutien qu'il m'a procuré et vous êtes plus qu'un grand frère.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire: **M. Hocine SADI**, **M. Ali BOUZRED**, **M. Aziz KORSO**, **Mme Fatma BENFERHAT** et **M. Hamza KOUACHE**.

Je remercie aussi toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches **M. Lotfi LAG**, **M. Abdenour CHELOUH**, **M. Lahlou YALA**, **M. Athman ALLAL CHERIF** et **M. Adel MIDA**.

Un spécial remerciement à **Mme Nabila BELADJAL**, **Mme Wafaa KHOBZI** et **Mme Wissem KAHOUL**.

Et un grand merci pour l'équipe de laboratoire: **M. Mustapha BOULEBTATECH** et **M. Mohamed OUROUANE**.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Liste des symboles

Introduction Générale

14

CHAPITE 1 Etude général sur la projection thermique

1.1 Introduction.....	17
1.2 Place de la projection thermique	18
1.3 Principes de la projection thermique.....	18
1.4 Présentation des différents procédés	20
1.5 Techniques de projection thermique.....	20
1.5.1 Flamme.....	20
1.5.1.1 Flamme-poudre.....	20
1.5.1.2 Flamme-fil.....	21
1.5.2 Flamme Supersonique (HVOF).....	22
1.5.2.1 Principe.....	22
1.5.2.2 Les principales caractérisations des revêtements obtenus par HVOF.....	22
1.5.2.3 Paramètres influençant la qualité du revêtement.....	22
1.5.3 La projection Plasma.....	22
1.5.3.1 Le Plasma.....	22
1.5.3.2 Le principe de la projection Plasma.....	23
1.5.3.3 Les différents procédés de projection Plasma.....	24
1.5.3.4 Quelques propriétés des revêtements obtenus par plasma.....	24
1.5.4 Arc Fil.....	24
1.5.4.1 Avantages et inconvénients de la projection à l'arc électrique.....	25
1.6 Comparaison des procédés de projection thermique	26
1.7 Matériaux d'apport déposés par la projection thermique	27
1.7.1 Matériaux utilisés.....	27
1.7.2 Les principales formes qu'on peut rencontrer sur le marché.....	28
1.8 Substrat.....	29
1.8.1 Préparation du substrat.....	29
1.9 Dépôt.....	30
1.9.1 Construction du dépôt	30
1.9.1.1 Morphologie des particules écrasées	30

1.9.1.2 Solidification et empilement des lamelles.....	31
1.9.2 Propriétés du dépôt	31
1.9.2 .1 Epaisseur	31
1.9.2.2 Structure tridimensionnelle de la surface	31
1.9.2.3 Défauts tridimensionnel	31
1.9.2.4 Propriétés physico-chimiques	32
1.9.3 Microstructure.....	35

CHAPITRE 2 Matériaux et Procédés

2.1 Introduction	37
2.2 Dépôt pour résister à d'usure (Carbure de chrome - nickel chrome).....	37
2.2.1 Principe	37
2.3 Poudres Cr ₃ C ₂ 25(Ni ₂₀ Cr).....	37
2.3.1 La composition chimique et la morphologie de la poudre.....	37
2.4 Substrat	38
2.4.1 Hastelloy X	38
2.4.1.1 La composition chimique.....	38
2.5 Préparation du Projection	39
2.5.1 Préparation du substrat	40
2.5.1.1 Sablage	40
2.5.2 Préparation de la poudre.....	40
2.5.3 Procédés de la projection	40
2.5.3.1 Paramètres de la projection	41

Chapitre 3 Technique Expérimentales

3.1 Introduction	45
3.2 Caractérisations microscopiques.....	45
3.3 Préparation des échantillons.....	45
3.4 Appareillage.....	47
3.4.1 Microscope optique.....	47
3.4.2 Microscope électronique à balayage.....	48
3.4.3 Spectromètre dispersif en énergie (EDS Energie Dispersive Spectrométrie).....	49
3.5 Essais mécanique.....	50
3.5.1 Essai de la micro-dureté.....	50
3.5.2 Mesure de rugosité.....	52
3.5.3 Essai Normalisé de traction.....	54
3.5.4 Essai de pliage.....	56

Chapitre 4 Résultats et discussions

4.1 Introduction.....	59
4.2 Caractérisations des dépôts	59
4.2.1 Morphologie.....	59
4.2.1.1 Ligne de contamination	59

4.2.1.1.1 Interface substrat /couche	59
4.2.1.2 Mesure de l'épaisseur	63
4.2.1.3 Porosité et oxydation	65
4.2.1.4 Analyses Physico-Chimique	67
4.2.2 Test de Micro dureté	73
4.2.3 Essai de pliage.....	76
4.2.4 Essai d'adhérence	78
Conclusion Général	94
Références Bibliographiques	95
Annexe	97

Liste Des Tableaux

Chapitre 1

TABLEAU 1.1	Les principales caractéristiques des techniques de projection thermique
--------------------	---

Chapitre 2

TABLEAU 2.1	la composition chimique de la poudre
TABLEAU 2.2	proportion des éléments de Hastelloy X
TABLEAU 2.3	Paramètres de sablage
TABLEAU 2.4	les conditions de la projection

Chapitre 3

TABLEAU 3.1	Paramètres de la rugosité
TABLEAU 3.2	valeur des rugosités mesurées

Chapitre 4

TABLEAU 4.1	Mesure de rugosité Ra après sablage
TABLEAU 4.2	Epaisseurs de dépôt élaboré par plasma APS mesurées par Easy-Analysis
TABLEAU 4.3	traitement d'image illustrant la répartition de la porosité dans la couche
TABLEAU 4.4	le résultat au MEB et la composition chimique de la poudre à base de chrome
TABLEAU 4.5	le résultat en MEB (rétrodiffusé) montre l'aspect morphologique du revêtement élaboré par APS
TABLEAU 4.6	Tableau des résultats de micro-dureté pour les deux gaz
TABLEAU 4.7	résultats du test de traction
TABLEAU 4.8	Les résultats du test de traction fournis par CREDIG (Sonalgaz)

Liste des Figures

CHAPITRE 1

FIGURE 1.1	Place de la projection thermique dans les traitements de surface
FIGURE 1.2	Principe fondamental de la projection thermique
FIGURE 1.3	Microstructure d'un dépôt projeté thermique
FIGURE 1.4	Schéma de principe d'un pistolet flamme –poudre
FIGURE 1.5	Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil
FIGURE 1.6	Schéma de principe d'un pistolet HVOF
FIGURE 1.7	La position du plasma par rapport aux autres états de la matière
FIGURE 1.8	Principe de la Projection par Plasma a l'Air -APS-
FIGURE 1.9	Schéma de principe d'un dispositif de projection à l'arc électrique
FIGURE 1.10	Matériaux d'apport déposés par la projection thermique
FIGURE 1.11	dépôt de fil fondu
FIGURE 1.12	dépôt sous forme d'une poudre
FIGURE 1.13	Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique
FIGURE 1.14	Accrochage mécanique des particules sur les aspérités de surface

CHAPITRE 2

FIGURE 2.1	Forme de l'échantillon
FIGURE 2.2	Dispositif de projection plasma APS

CHAPITRE 3

FIGURE 3.1	Schéma montrant le procédé de découpe l'échantillon revêtu
FIGURE 3.2	Echantillon enrobé à froid
FIGURE 3.3	Echantillon enrobé à chaud froid
FIGURE 3.4	Préparation des échantillons pour la micrographie
FIGURE 3.5	Microscope optique
FIGURE 3.5.1	Microscope EDS
FIGURE 3.6	Micro d'uroomètre & l'empreinte du pénétrateur dans l'essai de micro dureté
FIGURE 3.7	Schéma de l'empreinte de pénétrateur dans l'essai de micro dureté Vickers
FIGURE 3.8	Paramètres de mesure de rugosité
FIGURE 3.9	Instrument de mesure de la rugosité Rugosimètre
FIGURE 3.10	Décollement du revêtement pour cause de mauvaise préparation de surface
FIGURE 3.11	Echantillons pour traction
FIGURE 3.12	Assemblage d'une éprouvette pour l'essai de traction selon l'ASTMC633
FIGURE 3.13	Représentation schématique d'un revêtement après essai de traction
FIGURE 3.14	Dispositif de pliage à mandarin cylindrique & Exemple d'éprouvette en fin d'essai

CHAPITRE 4

FIGURE 4.1	Mesure de la rugosité après sablage
FIGURE 4.2	Image micrographique montrant l'interface couche /substrat
FIGURE 4.3	Image MEB et analyse EDS d'un point de contamination couche/Substrat
FIGURE 4.4	Profil d'épaisseur couche projetées par APS
FIGURE 4.5	la méthode de calcul de la micro dureté à l'aide de logiciel Easy analysis
FIGURE 4.6	Comparaison de la micro dureté des dépôts en fonction du changement de gaz de projection
FIGURE 4.7	Mesure de l'écaillage après test de pliage
FIGURE 4.8	Comparaison entre la force de liaison Mpa en fonction du changement de gaz de projection

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ALGESCO	Algerian Engineering Service Company
APS	Atmospherie Plasma Sprying
ASTM	American Society of Testing Materiel
BT(TBC)	Barriere Thermique (thermal Barrier coating)
CVD	Dépotes Chimique en Phase Vapeur
EDS	Energie Dispersive Spectrométrie
EN	Norme Européenne
GE	Général Electric
H.P.P. S	High Pressure Plasma Spraying
HVOF	High Velocity Oxy-Fuel
HX	Superalliage X (Hastelloy X)
I.P. S	Inert Plasma Spraying
ISO	International Organisation for Standardization
MEB	Microscope Electronique à baliage
V.P. S	Vaccum Plasma Spraying

Liste des Symboles

SYMBOLE	SIGNIFICATION	SYMBOLE	SIGNIFICATON
A	Ampère	M	Mètre
Al	Aluminium	Mm	Millimètre
Ar	Argon	°c	Unité du Coefficient de dilatation
Bar	Unité de pression	MPa	Méga pascale
C	Carbone	N	Newton
Co	Cobalt	NIpm	Normal Litres par minute
Cr	Chrome	P	Phosphore
e-	Electron	S	Seconde
Fe	Fer	S	Souffre
g/m	Gramme/minute	Si	Silicium
H	Heure	SiO₂	Silice
H₂	Hydrogène	Tr/mn	Tour/Minute
Ni	Nikel	W	Tungstène
Hv	Hardnesse Vickers	(W)	Perte volumique
J /Kg K	Unité de chaleur spécifique	KV	Kilo volt
K	Kelvin	KW	Kilowatt
Kg	Kilogramme	BN	Bore et Azote
Kg/dm³	Unité de densité	Kn/mm²	Unité module d'élasticité
µm	Micron Mètre	°C	Degré Celsius

Introduction Générale

Le secteur du pétrole et du gaz est le business le plus important en Algérie car il occupe une place prédominante dans l'économie du pays. En tant que l'un des plus gros producteurs et exportateurs de l'énergie de la région, le secteur du pétrole et du gaz en Algérie a besoin d'équipements de turbo machinerie puissants dédiés à la bonne marche et fonctionnent durant toute l'année et 24h sur 24heures.

La compagnie Général Electrique a créée en association avec les sociétés nationales Sonatrach et Sonelgaz, Le centre d'excellence Algesco dans le but d'assurer la maintenance des pièces des turbomachines.

Algesco est un leader mondial en termes de technologie de pointe, et en termes de service spécialisé dans la réparation des composants des turbines à gaz et auxiliaires. Cette mission passe par plusieurs étapes dont le degré de complexité diffère d'une pièce à une autre. L'application des revêtements pour les composants de la partie chaude des turbines à gaz est l'opération la plus important et la plus délicate. Cette technologie est l'une des solutions adaptées pour maintenir l'efficacité de ces machines, à travers le maintien de la résistance thermique et l'usure.

Algesco possède deux cabines de projection thermique par Plasma APS, HVOF pour la projection thermique sur les différentes parties chaudes du la turbine (tube à flamme, pièces de transition ...) car elles nécessitent deux types de revêtements : les revêtements thermiques (TBC) pour une tenue contre les chocs thermiques et le revêtement dur pour une tenue contre les chocs mécaniques.

L'objectif de ce travail est l'élaboration et la comparaison entre la projection thermique utilisant deux gaz différents pour l'application du revêtement dur (dépôt utilisé comme résistant à l'usure pour protection des pièces de turbines à Gaz). Il s'agit d'un travail essentiellement expérimental, qui consiste en la caractérisation du comportement mécanique du revêtement dur et du matériau à base de chrome par le procédé Plasma.

Ce mémoire se décompose en quatre chapitres :

➤ Le chapitre 1 consiste en une brève étude bibliographique sur les différentes techniques de projection thermique, suivi d'une étude approfondie sur les deux procédés APS

INTRODUCTION GENERALE

et HVOF. Cette étude décrit le fonctionnement des pistolets utilisés et l'influence des paramètres de projection.

➤ Le chapitre 2 est une étude sur les caractéristiques chimiques du dépôt (poudre) utilisé contre l'usure élaborée par plasma APS. Elle se termine par une revue des paramètres de projection des dépôts objet de notre étude.

➤ Le chapitre 3 introduit les matériaux et les différentes techniques expérimentales mises en œuvre, pour l'application plasma des revêtements étudiés jusqu'aux moyens techniques utilisées pour l'analyse (microstructurale, mécanique) du dépôt.

➤ Le chapitre 4 est réservé à la présentation des différents résultats obtenus, avec analyse, discussions et interprétation des tests effectués.

Chapitre 1

Etude générale sur la projection thermique

1.1 Introduction

La projection thermique est une technique centenaire qui se répand de plus en plus dans les industries avec des niveaux d'exigences de plus en plus sévères. Il est donc nécessaire de maîtriser la qualité des revêtements tant au point de vue métallurgique qu'au point de vue de ses propriétés d'adhérence sur le substrat. Depuis une trentaine d'années, de nombreuses équipes de recherche ont mis au point un certain nombre de techniques permettant de déterminer qualitativement ou quantitativement leurs qualités.

Après avoir présenté la projection thermique, les principales familles d'essais publiées à ce jour seront passées en revue et les différentes techniques de projection avec une attention particulière pour les deux principales techniques sur lesquelles nous avons travaillé HVOF et plasma APS, leurs élaborations et la caractérisation des dépôts.

Les applications de ces dépôts concernent essentiellement la protection contre l'usure et la corrosion, la décoration ou la réalisation de dépôts à propriétés physique spécifiques (électrique, magnétique, thermique,...etc.) [1].

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

- 1) Les revêtements par voie sèche ou humide.
- 2) Les traitements de conversion (réaction superficielle entre le matériau d'apport et le substrat).
- 3) Les traitements de diffusion (le matériau d'apport diffuse dans le substrat).
- 4) Les transformations structurales (modification de structure métallurgique du substrat) [2].

Ces traitements de surface jouent un rôle fondamental dans la maintenance et la prévention des pièces mécaniques. Leur aspect économique est considérable dans la lutte contre la corrosion et l'usure.

D'autres exigences et objectifs conditionnent l'utilisation de ces traitements tel que :

- 1) L'amélioration de l'aspect.
- 2) La conductibilité et l'isolation thermique.
- 3) La conductibilité et l'isolation électrique.
- 4) L'amélioration des caractéristiques de glissement.
- 5) La soudabilité.

- 6) La modification des propriétés optiques.
- 7) L'anti oxydation à haute température [3].

1.2 Place de la projection thermique

L'utilisation de divers revêtements est susceptible de propriétés nouvelles aux surfaces qu'ils recouvrent, cependant, on est confronté à divers problèmes tel que :

- Le choix du type de revêtement qui se fait en fonction du type de sollicitation mécanique et en fonction de l'environnement et des impératifs techniques (agressivité du milieu, maintenance...etc.).
- Le choix du procédé permettant le traitement qui se fait en tenant compte d'une jonction technico-économique.

Parmi les techniques les plus utilisées : la projection thermique accapare une place primordiale, présentant une souplesse quant :

- 1) Au choix du couple substrat-dépôt.
- 2) Au choix du procédé.
- 3) A la taille des pièces à traiter [4].

La figure ci-dessous présente les principales techniques utilisées en traitement de surface.

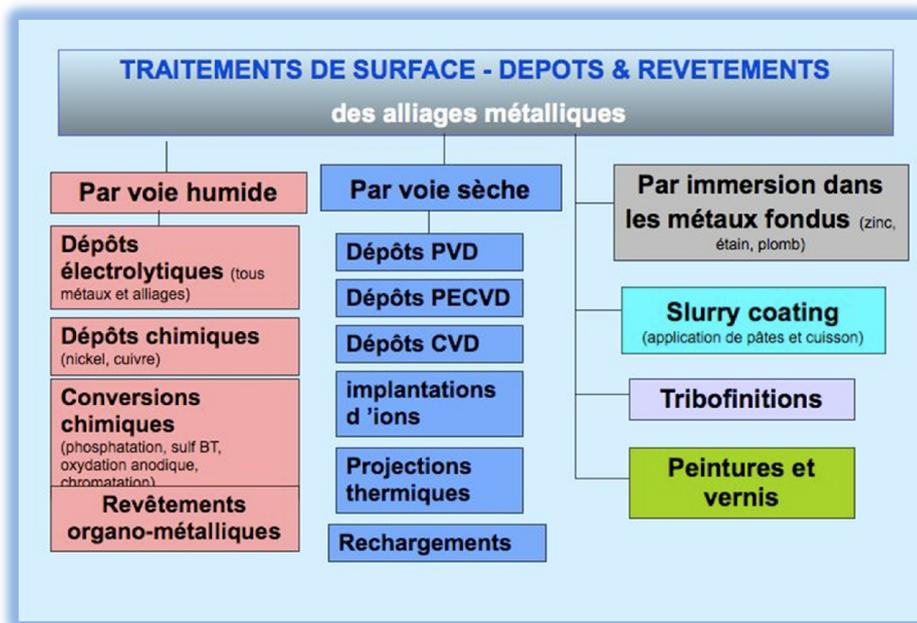


Figure 1.1 : Place de la projection thermique dans les traitements de surface [2].

1.3 Principe de la projection thermique:

La projection thermique est un procédé qui consiste à projeter un matériau, fondu ou ramolli par une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma), sur une surface à revêtir sur laquelle il se solidifie après écrasement. Le matériau d'apport peut être, à l'état initial, sous

forme de poudre, de fil ou de baguette. Le principe fondamental de la projection thermique est présenté **figure 1.2**. Un gaz vecteur permet la pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir.

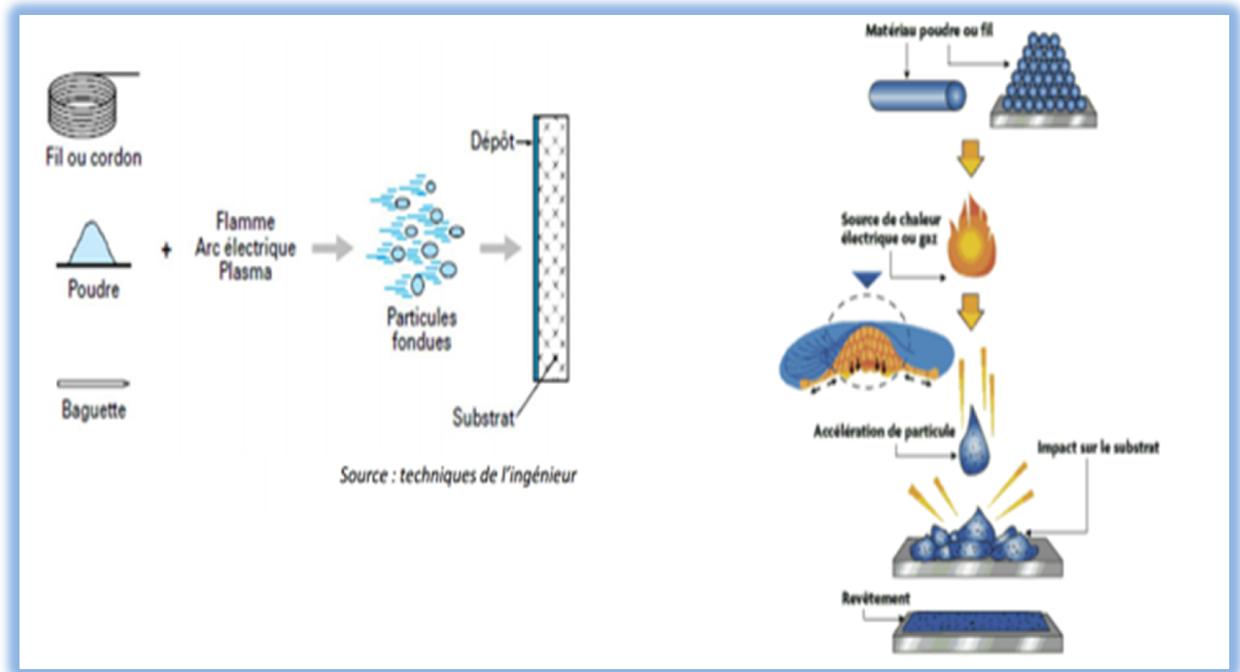


Figure 1.2: Principe fondamental de la projection thermique.

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 de type lamellaire [1,5] comme c'est décrit dans la **figure1.3**.

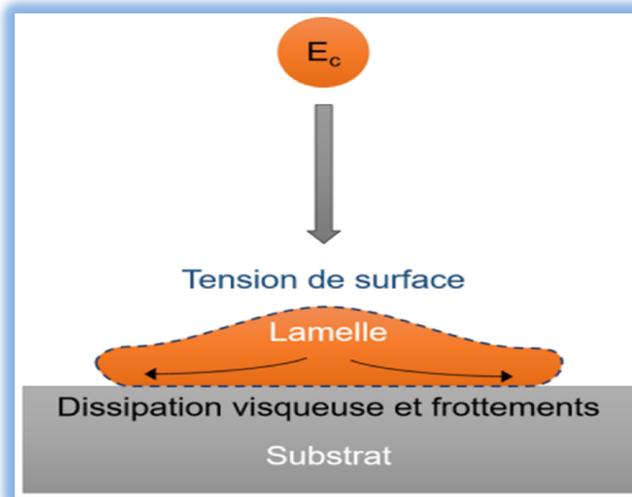


Figure 1.3: Microstructure D'un Dépôt Projeté Thermiquement [6].

Les matériaux concernés: tous les types de substrats tolérant l'élévation de température, dépôts métalliques, minéraux ou même polymères.

Résultat recherché: résistance à la corrosion et à l'usure, esthétique, résistance à la chaleur [7].

1.4 Présentation des différents procédés

Les techniques de projection se développent suivant trois axes :

1. L'augmentation de l'énergie cinétique des particules.
2. L'amélioration de la production de projection.
3. Le meilleur contrôle d'atmosphère de projection [8].

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

1. Les conditions en service de la pièce traitée.
2. La forme de la pièce.
3. La nature du matériau de base.

La nature du matériau d'apport performant [9].

1.5 Techniques de projection thermique

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés dans lesquels, un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté à l'aide d'un gaz vecteur sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. La matière à déposer, sous forme de poudre, de fil ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans la source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma). Ces techniques permettent de projeter une grande gamme de matériaux : métaux et alliages, cermets, céramiques et dans certaines conditions, des polymères. Une différence de 300°C entre la température de fusion et la température de décomposition ou d'évaporation du matériau est nécessaire pour que le matériau puisse être projeté dans de bonnes conditions [1].

1.5.1 Flamme

Ce procédé utilise la combustion d'un gaz pour projeter le matériau d'apport sur le substrat. En général, on utilise un chalumeau. Cette technique est très simple et très répandue dans l'industrie, mais elle est limitée en température et en vitesse de projection. Il est possible de projeter indifféremment le matériau sous forme de poudre ou de fil [10].

La projection à flamme utilise l'énergie calorifique provenant de la combustion d'un gaz, généralement oxyacétylénique, générant une température de l'ordre de 3000° C. les particules sont projetées avec une vitesse moyenne de 40 m/s. les revêtements obtenus ont une adhérence inférieure à 40 MPa et un taux de porosité compris entre 10 et 20 %, on peut en citer deux types [7].

1.5.1.1 Flamme-poudre

On désigne généralement sous le nom de projection flamme-poudre le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre

Dans un oxy-combustible et à le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion [11].

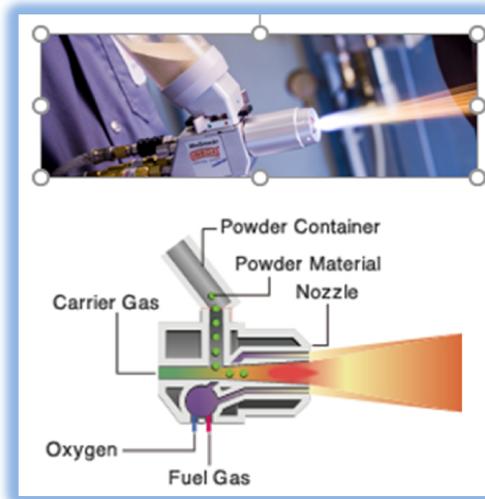


Figure 1.4: Schéma de Principe d'un Pistolet Flamme-Poudre [1].

1.5.1.2 Flamme-fil

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

Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé [11].

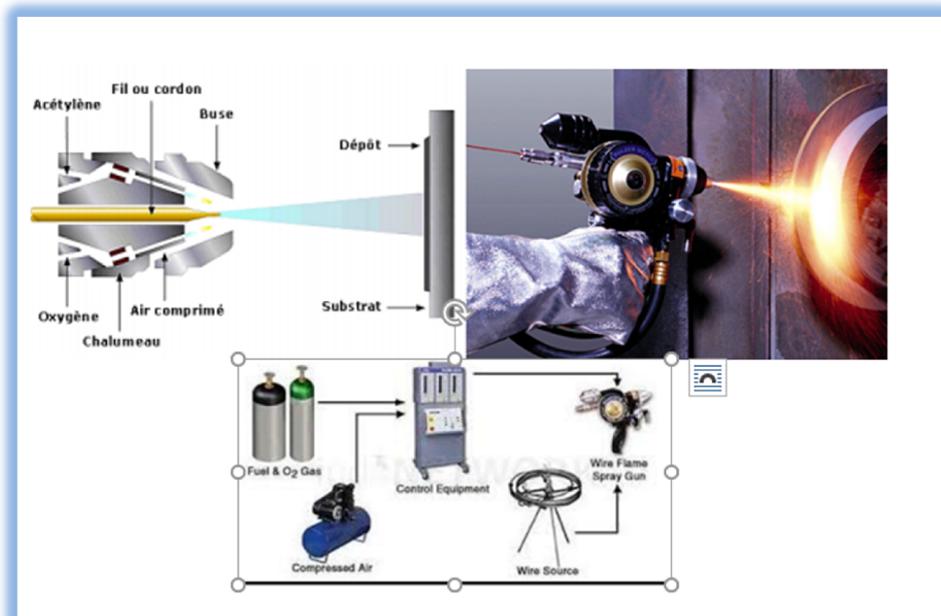


Figure 1.5: Principe de fonctionnement d'un Pistolet Flamme fil [12].

1.5.2 Flamme supersonique (HVOF)

1.5.2.1 Principe

Le procédé HVOF (High vélocité Oxy-fuel flamme) utilise la combustion à l'oxygène d'un carburant gazeux tel que : propane, propylène, éthylène, méthane ou l'hydrogène, ou liquide (généralement du kérosène). La **figure 1.6** illustre le principe de ce procédé.

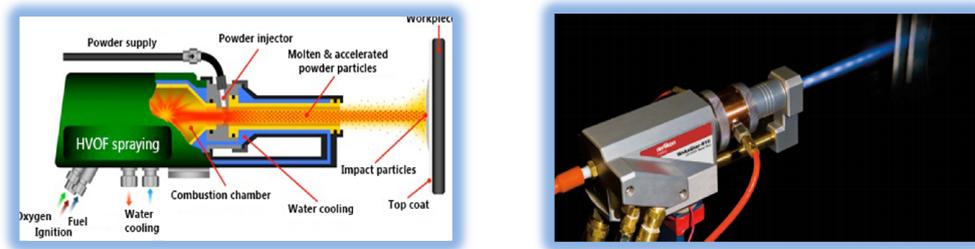


Figure 1.6: Schéma de Principe d'un Pistolet HVOF [1].

1.5.2.2 Les principales caractérisations des revêtements obtenus par HVOF

Ce mode de projection permet d'élaborer des revêtements durs particulièrement intéressants dans le cadre des applications tribologiques. En développant une grande énergie cinétique, ce procédé permet de réaliser des revêtements présentant un faible taux de porosité (inférieur à 1%) et une grande adhérence (proche voire supérieur à 100MPa) [13].

La projection HVOF de carbures ou de stellites de protéger des pistes de glissement dans les pièces mobiles dans les domaines de haute technologie.

1.5.2.3 Paramètres influençant la qualité du revêtement

Les paramètres qui influent sur la qualité des revêtements sont :

- La pression dans la chambre de combustion.
- Les débits relatifs oxygène/carburant.

Le débit du gaz des poudres : la géométrie de la tuyère d'éjection, la distance de projection.

1.5.3 La Projection Plasma

1.5.3.1 Le plasma

C'est un gaz ionisé constitué de molécules d'atomes, d'ions et d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre ou excité. Un plasma Ar/H₂ ou N₂/H₂ sera ainsi constitué des espèces suivantes : Ar, H, H⁺, Ar⁺, e⁻. Plus de 99% de la matière de l'univers existe à l'état de plasma.

Le plasma est considéré comme état de la matière



Figure 1 .7 : La Position du Plasma par rapport aux autres états de la matière [14].

Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont :

1. Une source de puissance (générateur à courant continu).
2. Une décharge ionisant le gaz (générateur haute fréquence ou haute tension).
3. Un couplage assurant le contact entre deux propriétés conditionne vitesse et température des particules projetées.
4. La conductivité thermique qui détermine les transferts plasma particules et donc l'état de fusion des particules lors de leur impact sur le substrat.
5. La viscosité qui permet de diminuer les entrées d'air dans le plasma, d'augmenter la longueur du jet et d'éviter les réactions chimiques des particules (oxydation en particulier).

1.5.3.2 Le principe de la projection plasma

Une torche de projection plasma est constituée de deux électrodes : une cathode conique placée à l'intention d'une anode cylindrique forme une buse Inerte (habituellement de l'argon, éventuellement associé avec de l'hydrogène ou de l'hélium) circule entre les deux électrodes ou il est ionisé pour former le plasma. Le matériau à projeter est introduit dès le jet de plasma ainsi créé. Le refroidissement des électrodes est assuré par de l'eau sous pression pour éviter leur échauffement et leur destruction.

Le schéma d'une torche à plasma est présenté **figure 1 .8**.

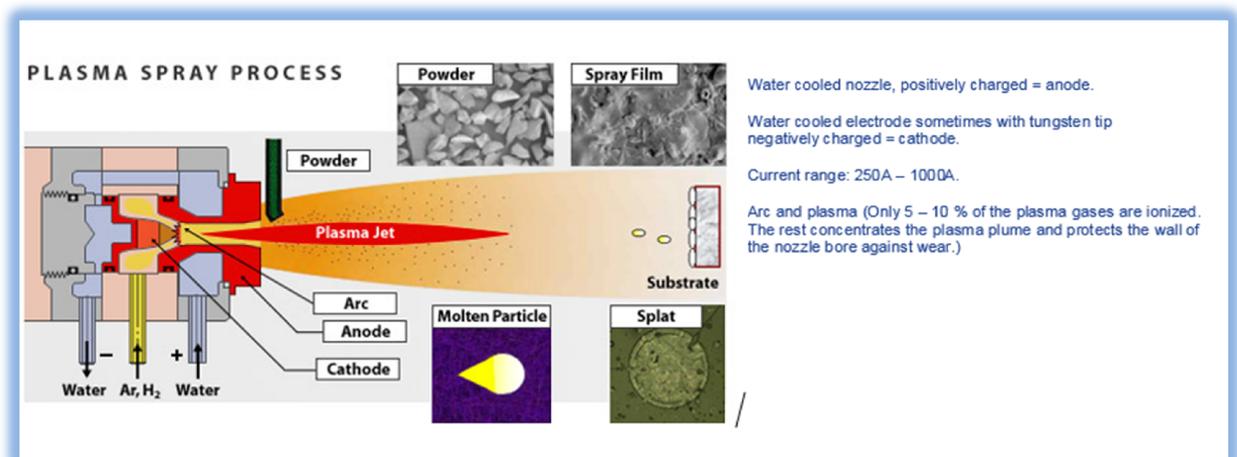




Figure 1.8 : Principe de la Projection par Plasma a l'Air -APS- [15].

La température du jet de plasma généré, nettement supérieure à celles des autres procédés de projection thermique une large variété de matériaux. Elle peut aller jusqu'à 20000°C. La seule condition est qu'il doit exister un écart d'au moins 300°C entre la température de fusion et celle d'évaporation d'oxyde avec le matériau projeté.

Les particules percutent le substrat dans un état de fusion avancée, à des vitesses importantes, de l'ordre de quelques centaines de mètres par seconde. Elles s'écrasent sur le substrat et refroidissement très rapidement, puis s'empilent les unes sur les autres réalisant ainsi progressivement un dépôt de plusieurs dizaines de microns.

Plus de soixante paramètres peuvent influencer sur la structure et les propriétés de revêtement les paramètres comme l'intensité de courant, les débits ou les compositions des gaz peuvent être contrôlés contrairement à la tension des électrodes, l'efficacité du refroidissement ou l'usure des électrodes.

1.5.3.3 Les différents procédés de projection plasma

Il existe un grand nombre de technique de projection plasma. On recense, de façon non-exhaustive, les procédés présentés ci-dessous :

- A.P.S: Atmosphérique plasma spraying (projection atmosphérique)
- V.P.S: Vacuum plasma spraying (sous vide)
- R.P.S: Réactive plasma spraying (sous atmosphère réactive, par exemple l'air est remplacé par un gaz neutre)
- H.P.P.S: High pressure plasma spraying (en présence une légère augmentation de pression pour favoriser le transfert de chaleur).

1.4.4.4 Quelques propriétés des revêtements obtenus par plasma

Les caractéristiques mécaniques des revêtements obtenus par projection thermique plasma dépendent du procédé utilisé. La résistance à la traction pourra ainsi être comprise entre 30 et 70 MPa et le taux entre 1et 10 % [1].

1.5.4 Arc-fil

La projection arc-fil est une technique de revêtement de surface relativement économique qui compte de nombreuses applications industrielles. Elle est utilisée industriellement en Europe depuis 1945.

Le principe consiste à faire éclater un arc électrique entre deux fils ductiles consommables et à atomiser le matériau aussi fondu par un jet de gaz comprimé (généralement de l'air) qui le projette sur le substrat. Les pistolets à arc électrique sont

Alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500A. Ils sont essentiellement constitués de deux parties :

- La première sert à l'entraînement des fils.
- La seconde assure la fusion et la projection du métal fondu [1].

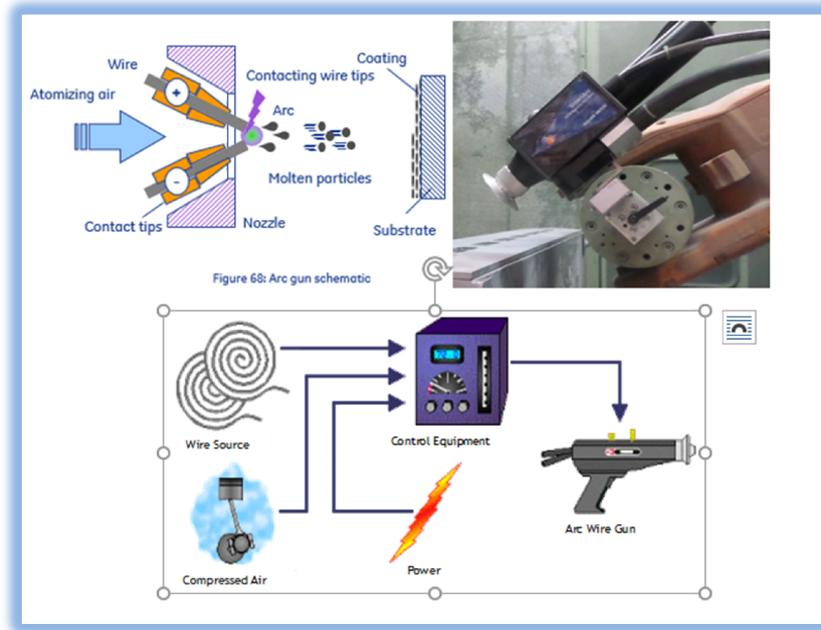


Figure 1.9 : Schéma de principe d'un dispositif de projection à l'arc électrique [1].

La plupart des matériaux métalliques tel que 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. Récemment, l'émergence de fils fourrés ductiles, composés d'une graine métallique remplie de poudre de matériaux non ductiles a permis de projeter une gamme plus large de matériaux, ce qui rend cette technique concurrente de la projection à la torche à plasma ou à la flamme pour certaines applications et, en particulier, pour le revêtement de grande surface [13].

1.5.4.1 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 : 5-40 Kg/h, et le rendement énergétique important 60 à 70 % de la puissance électrique fournie est utilisée pour fondre les fils
 - Le pistolet à arc électrique est très maniable et léger (moins de 2Kg) et compact.

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

- Un jet de particules diverge qui se traduit par une tache d'impact relativement large (25à50mm de diamètre à 100mm de la sortie de la torche).
 - Des dépôts présents 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 est au-delà de 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 [3-9].

1.6-Comparaison des procédés de projection thermique

Le tableau suivant résume et compare les différents procédés de projection thermique.

Tableau 1.1 : Les caractéristiques des différents procédés de projection thermique [2].

Caractéristique	Flamme poudre	Flamme-fil	Arc électrique	Plasma APS	HVOF
Source de chaleur	Flamme	Flamme	Arc électrique	Plasma	Flamme
Température maximale approximative °C	3000	3000	8000	20000	3000
Vitesse moyenne des particules (m/s)	40	150	250	200	>2100
Forme du produit d'apport	Poudre	Fil	Fil	Poudre	Poudre
Taux de dépôt (kg/h)	1 à 3	1 à 10	5 à 15	1 à 4	< à 1
Rendement intrinsèque de dépôt caractéristique (%)	50	70	80	70	70
Adhérence moyenne (MPa)	20 à 40	20 à 40	50	30 à 70	> à 100
Taux moyen de porosité (%)	2 à 10	2 à 10	1 à 10	1 à 10	0,5 à 2

Caractéristique	Flamme poudre	Flamme-fil	Arc électrique	Plasma APS	HVOF
Epaisseur déposée (mm)	0,2 à 1,5	0,2 à 1,5	0,2 à 3	0,1à1,5	0,1 à 1
Exemple des matériaux projetés	alliage oxyde polymère	-alliage -oxyde -carbure	alliage	Alliage Oxyde Carbure	alliages oxyde carbure

APS= Air plasma Spraying, (projection dans l'air ambiant).

- Rendement moyen = pourcentage du matériau d'apport projeté qui adhère au substrat.

1.7 Matériaux d'apport déposés par la projection thermique

1.7.1 Matériaux utilisés

Les matériaux couramment utilisés comme revêtement sont nombreux et leur application ne cesse d'augmenter avec le développement des appareils de projection et des applications. Ils sont classifiés suivant les normes A81—981 en groupes, chaque alliage étant défini ensuite par un code. Ces matériaux peuvent être classés comme suit :

- Les aciers alliés et non alliés.
- Les alliages à base de cobalt.
- Les alliages à base de nickel.
- Les alliages à base de cuivre.
- Les alliages à base de zinc
- Les matériaux 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 Abordables (nickel/graphite et aluminium).
- Les matériaux antifriction (Étain /antimoine et Étain /plomb).

La figure ci-dessous résume les matériaux d'apport qu'on peut déposer par la méthode de la projection thermique.

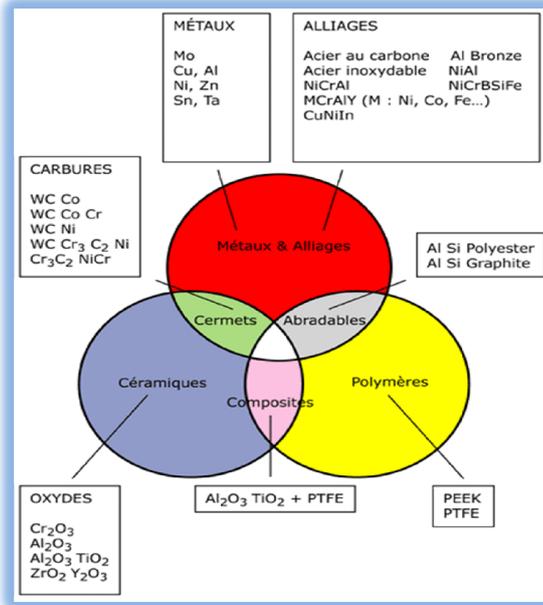


Figure 1.10 : Matériaux d'apport déposés par la projection thermique [1]
 Ces différents matériaux ne se présentent pas sous la même forme, car il faut tenir compte de certaines propriétés intrinsèques et également les procédés employés pour la projection.

1.7.2 Les principales formes qu'on peut rencontrer sur le marché

❖ Les Fils

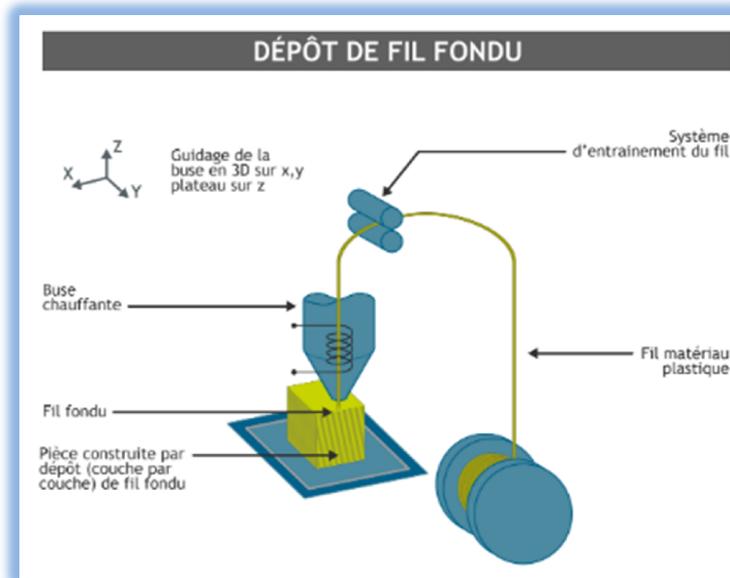


Figure 1.11 : Dépôt de fil fondu

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

❖ Les poudres



Figure 1.12 : Dépôt sous forme d'une poudre.

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

- Composition chimique.
- Dimension des particules.
- Forme des particules : sphérique, lamellaires, ... etc.
- Type d'élaboration : électro-fondues, frittées, agglomérées, enrobées ...etc.
- Coulabilité.
- Densité : tassées ou non tassées.

1.8 Substrat

Toutes sortes de substrats peuvent être utilisés mais des compatibilités existent avec certaines techniques (fragilité, sensibilité thermique forme trop complexe ou inaccessible) ou avec le matériau d'apport (problème de mouillabilité, adhérence, dilatation différente) [12].

Dans le cas de la projection thermique, l'état physico-chimique de la surface du substrat joue un rôle très important sur la structure des lamelles, la formation du dépôt et, par conséquent, son adhérence. Cette propriété est un critère de qualité important, car il est en effet inutile de réaliser un revêtement aux propriétés remarquables, si celui-ci n'adhère pas à son substrat [1].

1.8.1 Préparation du substrat

Les techniques de préparations de surface doivent permettre de nettoyer les matériaux et de modifier l'état géométrique de leur surface. La réalisation d'un dépôt par projection thermique nécessite la réalisation d'une série d'opération indispensable dans un ordre bien établi :

- Un dégraissage qui consiste à débarrasser la surface des films passivant et des graisses.

C'est la première étape de préparation des pièces destinées à être revêtues. En effet, elle a pour conséquence la destruction et l'élimination de la plupart des impuretés (graisse,

inclusions superficielles, etc...) Généralement responsables de la mauvaise tenue des revêtements.

- Un traitement mécanique appelé sablage qui permet la création d'un état de surface rugueux. Après le nettoyage des pièces, il est nécessaire de créer une rugosité sur la surface à revêtir afin de permettre à la particule en fusion ou à l'état pâteux de venir épouser les rugosités de la surface et réaliser ainsi un bon accrochage mécanique.

- Outre la création d'une grande surface d'adhérence, la rugosité permet également de diminuer 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. En contrepartie, cependant, le sable crée des contraintes de compression dans le substrat au voisinage de la surface sablée. Le sablage se fait généralement à l'aide de particules d'abrasifs, le plus souvent de l'alumine, entraînées par de l'air sous pression et dirigées sur le substrat. Un nettoyage ultérieur (par ultrasons et solvant par exemple) est indispensable pour éliminer les particules de sablage incrustées dans les creux et toute trace de graisse (introduite par exemple par l'air de sablage) [1-3].

1.9 Dépôt

1.9.1 Construction du dépôt

La formation du revêtement est obtenue par l'impact, la déformation et la solidification rapide des particules sur substrat. Le revêtement présente une structure lamellaire comportant éventuellement des oxydes, des microporosités, des fissurations inter et intra lamellaire **figure 1.13** [1].

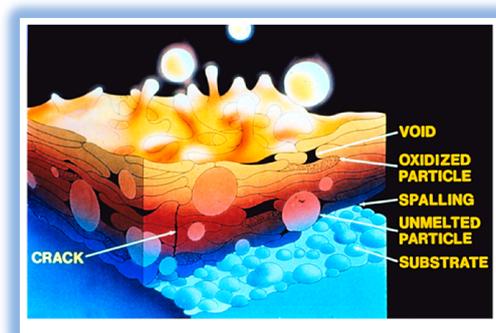


Figure 1.13: Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique [1].

1.9.1.1 Morphologie des particules écrasées

Après avoir été fondues, totalement ou partiellement, et accélérées par le gaz vecteur, les particules lors de leur impact, subissent un choc qui entraîne leur déformation et aplatissement sous forme de lamelles. Celles-ci sont fréquemment désignées par le terme anglais "splat" que l'on trouvera dans la suite du texte. Cet étalement est lié à la transformation de l'énergie cinétique en énergie d'écoulement visqueux et en énergie de tension de surface [16].

1.9.1.2 Solidification et empilement des lamelles

La manière dans les gouttelettes s'étalent et se solidifient influe sur les caractéristiques du dépôt et notamment sur sa porosité. Par ailleurs, la formation des lamelles peut s'accompagner d'un phénomène d'éclaboussure, à l'impact et ou la fin de la phase d'étalement. Les mécanismes d'étalement et de solidification des particules sont relativement complexes, car ils dépendent de l'énergie cinétique et thermique des gouttelettes, de leur viscosité et de leur mouillabilité vis-à-vis du substrat, ainsi que de la nature, l'état de surface et la température de ce dernier. Le phénomène d'éclaboussure peut être réduit en diminuant la taille des gouttelettes et ou leur vitesse d'impact en jouant sur le débit du gaz d'atomisation ou sur la géométrie des buses [1].

1.9.2 Propriétés du dépôt

Comme il a été préalablement démontré, les propriétés d'un matériau lorsqu'il est déposé ne sont pas forcément identiques à celles de sa forme massive. Hormis les propriétés intrinsèques du matériau de dépôt, trois autres facteurs vont influencer les propriétés finales des couches minces, à savoir :

- L'épaisseur du film.
- La nature du substrat et son état de surface.
- La méthode employée pour la déposition.

Il en résulte qu'une couche mince est souvent anisotrope. Cependant, cette anisotropie ne nous empêche pas d'étudier en gros les propriétés des films minces. De telles propriétés sont généralement classées en deux grandes familles, à savoir les géométriques et les propriétés physico- chimiques.

1.9.2.1 Epaisseur

L'épaisseur d'un dépôt est un paramètre de base qui influe considérablement les différentes propriétés physico-chimiques comme la dureté, la résistance à la corrosion et la porosité. Une épaisseur plus au moins élevée peut être souhaitable pour améliorer quelques propriétés notamment la résistance à la corrosion et la résistance à la fatigue mécanique et thermique. Toutefois, il arrive que l'augmentation de l'épaisseur engendre quelques difficultés pour flexibilité et parfois pour l'adhérence.

1.9.2.2 Structure tridimensionnelles de la surface

La structure tridimensionnelle des couches minces dépend d'une façon générale de la technique utilisée, des défauts formés durant la déposition et de la rugosité de la surface du Substrat. On peut assimiler cette structure à une représentation, plus ou moins déformée, de la topographie de surface du substrat.

1.9.2.3 Défauts tridimensionnels

Comme à chaque fois, l'ordre n'est jamais parfait dans les structures des matériaux que ce soit à l'échelle macroscopique ou microscopique. Autrement dit, les défauts structuraux occupent toujours une partie importante dans la caractérisation des matériaux Néanmoins, l'importance de ces défauts est accrue lorsqu'il s'agit des couches minces. Les défauts les plus

fréquents sont les stries et les sillons, les arrachements, les fentes, les marques d'outil, les piqures etc.

1.9.2.4 Propriétés physico -chimiques

✓ Teneur en oxyde et porosité

Fondamentalement, les paramètres principaux, la distance, la vitesse, la température et la taille de particules, influencent la porosité et la teneur en oxyde des dépôts. Elle est inversement proportionnelle au diamètre et à la vitesse de particule et directement proportionnelle à la température de surface des particules. L'augmentation de la température des particules se traduit par une diminution de leur viscosité et la rugosité du dépôt est réduite.

On peut distinguer trois types de porosités. La première est la porosité fermée avec des pores entièrement inclus dans le dépôt. La seconde est la porosité ouverte avec des pores qui présentent une "extrémité" fermée et une autre ouverte au niveau de la surface du dépôt ou de la surface de coup. La troisième concerne les pores ou plutôt des fissures qui traversent le dépôt, de sa surface jusqu'au substrat [1].

Le taux de porosité varie de moins de 1% à 25% suivant les procédés et les matériaux utilisés [2].

✓ Densité

Les dépôts projetés sont poreux, cette porosité est plus ou moins importante, cela dépend du mode de projection. La dimension et la vitesse des particules ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts métalliques, la densité est également fonction du taux d'oxydes formés au cours de la projection [4].

✓ Adhérence

On distingue deux types d'adhérence dépendants des phénomènes physico-chimiques qui ont lieu :

- Lors de la formation du dépôt : adhérence intrinsèque
- Lors de l'utilisation du dépôt : adhérence en service

L'adhérence intrinsèque dépend de

- L'état de surface du substrat, et par conséquence de l'énergie de surface.
- La similitude de nature chimique et en particulier, celle des mailles cristallines des dépôts et du substrat.
- La forme et l'énergie des espèces constituant le dépôt.
- La différence entre les coefficients de dilatation thermique du revêtement et du substrat dans le cas où le dépôt est réalisé à la température bien supérieure à la température ambiante.

L'adhérence en service correspond aux phénomènes ayant lieu lors de l'utilisation du dépôt, par exemple comme barrière thermique ou comme protection d'un outil de coupe, et dépend à son tour de :

- La nature et la valeur des sollicitations thermique, telle que par exemple les chocs thermiques d'une certaine amplitude et durée.
- La nature et la valeur des sollicitations mécanique, telle que par exemples les contraintes de cisaillement ou de compression.
- La différence entre les constantes mécaniques, surtout celle du module de Young, E, du revêtement et du substrat. Il faut tenir compte de ces deux types d'adhérence car bien des revêtements adhérents au substrat à l'issue de la procédure du dépôt se détachent rapidement lorsqu'on les soumet aux sollicitations de la mise en service. A

titre d'exemple, les revêtements diamantés qui n'adhèrent pas suffisamment bien aux substrats pour être appliqués sur certains outils de coupe.

L'adhérence intrinsèque peut être améliorée par divers traitements tandis que l'adhérence en service peut être également améliorée par une application d'une sous-couche d'accrochage. La sous-couche et un matériau dont les propriétés (α, E) sont intermédiaires entre le substrat et le dépôt. La sous-couche d'accrochage bien choisie adhère bien au substrat et au dépôt final [9].

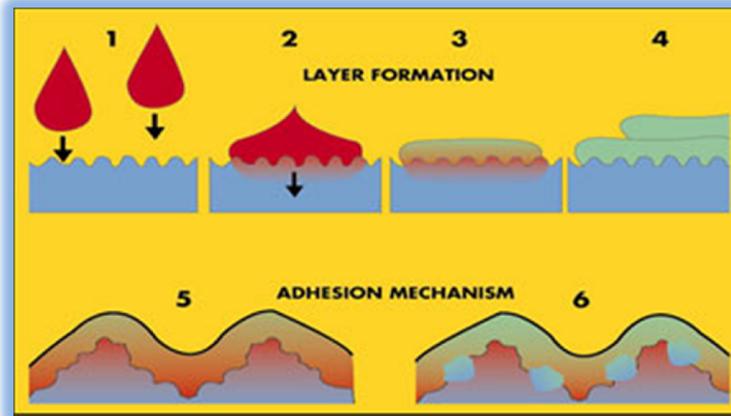


Figure 1.14 : Accrochage mécanique des particules sur les aspérités de surface [15].

✓ **Dureté**

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

On peut avoir une indication précise de la cohérence des particules entre elles, si on effectue une macro ou micro-dureté, sous une charge importante, on aura une idée précise de la qualité du dépôt qui craque si la cohérence n'est pas bonne [4].

La dureté des dépôts ne dépend pas du procédé, mais dépend surtout de la :

- Structure cristalline de dépôt
- La formation d'une phase amorphe ou nanocristalline peut augmenter la dureté d'un dépôt [9].
- L'augmentation de la porosité se traduit également par une diminution de la dureté moyenne du dépôt [1].

✓ **Dans la projection à l'arc**

La dureté des dépôts dépend de la nature du gaz de projection. Pour des dépôts d'acier, il a été observé que, avec l'air comme gaz d'atomisation, une teneur en oxydes plus élevée conduit à une dureté plus élevée, mais en utilisant de l'azote, une meilleure conservation du carbone permet aussi une augmentation de la dureté avec une tenue en oxyde limitée.

• **Résistance à la corrosion**

La corrosion, et en particulier l'oxydation, reste l'un des plus grands problèmes techniques auquel on doit faire face. Chaque année dans les pays développés, la corrosion détruit l'équivalent de 3 à 5 % du produit intérieur brut. Les dépôts réalisés par projection thermique peuvent en particulier prémunir de la corrosion des structures en acier et en fer. La résistance à la corrosion des dépôts dépend de leur microstructure et de la résistance à la corrosion des matériaux qui les constituent. Il faut en effet prendre en compte la

corrosion du substrat au travers des pores traversant ou d'autres défauts dans le dépôt les surfaces au contact.

Il peut également se produire une corrosion galvanique du dépôt ou du substrat. Celle-ci peut aussi se produire entre deux phases ou constituent du dépôt lui-même. Le colmatage

D'un dépôt poreux peut diminuer significativement le risque de corrosion générale et galvanique du dépôt.

Les dépôts réalisés par projection thermique on fondamentalement trois inconvénients quand ils sont utilisés pour lutter contre la corrosion. Le premier point faible est la teneur en oxydes générés pendant la projection. Il convient de noter que la présence d'oxydes dans le dépôt diminue sa passivité. Le deuxième inconvénient réside dans la présence de pores ouverts et de fissures entre les lamelles, par les quelles les environnements corrosifs pénètrent jusqu'au substrat. Les espaces entre les lamelles sont à l'origine également de la corrosion caverneuse. Le troisième est la dégradation des matériaux constitutifs des dépôts pendant la projection. Certain élément tel que le chrome et l'aluminium sont partiellement oxydés. En raison de ce phénomène, la composition chimique du dépôt est différente de celle du matériau projeté [1].

- **Usure**

Les principaux mécanismes d'usure sont suivants :

- L'adhésion et le transfert de masse entre deux surfaces en contact.
- L'abrasion et détachement des aspérités de dépôt.
- La fatigue et la microfissuration de dépôt.
- La fracture et l'arrachement des grains ou des lamelles de dépôt.

Les principaux mécanismes chimiques (tribo-chimiques) d'usure sont les suivants :

- La formation d'un microfilm mince sur la surface d'un dépôt.
- L'oxydation des dépôts métalliques [1].

Les principaux types d'usure sont

- L'usure adhésive est provoquée par le transfert de matière d'une surface à l'autre de deux pièces en contacte et en mouvement relatif. La composition, la microstructure et la topographie de la surface, la présence ou l'absence les lubrifiants ou d'autres médias, la charge et la vitesse de contact, ainsi que la température affectent ce type d'usure.
- L'usure érosive est provoquée par l'impact sur la surface d'un fluide, contenant une suspension des particules dures. Le taux d'érosion est fonction de l'angle d'impact, de la composition et de la microstructure de la surface et des particules impactes, de la vitesse, de la taille, de la forme et de la masse de ces particules, et des températures du fluide et de la surface [1].
- L'usure abrasive correspond à une perte progressive de matière à la surface de travail d'un corps et résultant d'un mouvement relatif au niveau de cette surface.
- L'usure par fatigue : elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et des contraintes thermiques générées par frottement. L'usure par fatigue se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique.

Les comportements face à ce mécanisme d'usure dépendent de la nature du matériau. Dans le cas de matériaux ductiles (matériaux métalliques ou polymères), la rupture par fissuration ou mécanisme de délaminage a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones ou les contraintes de cisaillement sont maximales. L'analyse des transferts thermiques sur la microstructure (déplacement des lacunes, des dislocations, des plans de glissement, l'effet des joints microstructure (déplacement des

lacunes, des dislocations, des plans de glissement, l'effet des joints de grains...) explique la formation de fissure associées à un écrouissage ou à un adoucissement de la surface. Ce phénomène peut se décomposer en plusieurs phases. Dans un premier temps, il y a augmentation de la densité de dislocations en surface provoquant un écrouissage superficiel. Dans un deuxième temps, l'énergie de frottement transmise à la surface de ce matériau a pour effet de redistribuer cette densité de dislocation en un réseau plus stable par glissement ou montée de dislocations. Il existe alors un déséquilibre entre les contraintes internes. En surface, suite à une densité plus élevée dislocation, des contraintes de compression sont générées alors qu'en sous couches, la densité de dislocations étant moindre, des cavités se forme, favorisant la en général, un matériau mou et malléable conduit à une usure uniforme tandis que pour un matériau plus dur, l'usure est plus localisée dans la région inter lamellaire ou les couches d'oxydes forment des points faibles et entraînent le décollement des lamelles. Pour le cas de dépôts élaborés par projection thermique, la perte volumique dépend de caractéristiques suivantes :

- La nature chimique du dépôt (composition et homogénéité).
- La microstructure (porosité et teneur en oxyde).
- La dureté du dépôt.
- L'adhérence du dépôt (mode d'accrochage, ...).
- L'épaisseur du dépôt [1].

1.9.3 Microstructure

Les particules fondues s'écrasent sur le substrat ou particules sont déposées et forment de fines lamelles qui s'adaptent aux irrégularités de la surface. Le temps de solidification d'une particule projetée est de l'ordre de la microseconde à la dizaine de microsecondes.

Les caractéristiques de la microstructure dépendent, d'une part, des paramètres des particules à l'impact (vitesse, taille, état de fusion et état chimique) et d'autre part, des paramètres du substrat (matière, rugosité, état chimique de la surface et température) [1].

La microstructure des dépôts résulte de la solidification et du frittage de ces particules. En raison de la très grande vitesse de refroidissement des particules au contact du substrat, leur structure métallurgique est du type trempé, généralement à phase unique. Ceci permet d'expliquer que la structure d'origine du matériau peut se trouver modifiée après dépôt [2].

Chapitre 2

Matériaux et procédés

2.1 Introduction

Une turbine à gaz industrielle est un moteur à combustion interne qui utilise un procédé de combustion continue. La chambre de combustion est alimentée en air à haute pression depuis le système de compression, le carburant est ajouté et allumé, le mélange brûle. L'air comprimé chaud produit dans la chambre de combustion passe dans la turbine où il se dilate. La fonction de la turbine est d'extraire l'énergie du flux d'air chaud.

Des matériaux résistants à l'usure et à la chaleur sont utilisés, et des revêtements par pulvérisation par le procédé plasma sont appliqués pour prolonger la vie opérationnelle et fournir la résistance à la corrosion. Les buses et mélangeurs de carburant sont construits au moyen de procédés de liaison métallique avancés tels que des techniques de brasage sous vide et de soudage par faisceau d'électrons.

2.2 Dépôt pour résister à l'usure (Carbure de chrome - nickel chrome)

2.2.1 Principe

Les revêtements de chrome sont très employés pour des applications décoratives liées à leur éclat miroir, mais aussi pour des applications de protection contre l'usure et la corrosion. D'autres procédés de dépôt permettent l'obtention des revêtements métalliques de chrome avec des sursaturations excessives en éléments métalloïdes comme le carbone ou le Nickel. Ces revêtements présentent souvent des propriétés accrues en dureté et en corrosion comparées à celles du chrome dur électrolytique.

Elles sont généralement présentes sur des pièces métalliques situées dans les parties chaudes des moteurs (aubes de turbine, chambres de combustions). C'est ainsi qu'on les retrouve dans les moteurs à usage maritime et aéronautique, ou encore dans les applications de production d'énergie [16]. Ils doivent protéger la pièce contre l'oxydation et la corrosion à chaud. Cependant, il n'existe pas de composition universelle de dépôt permettant de satisfaire toutes les conditions rencontrées, et il existe donc un grand nombre de compositions et de morphologies différentes pour ces dépôts.

Elle doit enfin être à même de conserver ses propriétés, en particulier sa conductivité thermique, pendant de longues périodes d'exposition au milieu à haute température.

Une couche résistante à l'oxydation et à la corrosion à chaud est intercalée sur le substrat pour le protéger des dégradations qui pourraient être induites l'agressivité du milieu environnant. Elle doit rester peut contrainte et stable dans le temps, et surtout, doit adhérer au substrat quelle que soit la température et la durée d'exposition à cette température [17].

2. 3 Poudres Cr_3C_2 25(Ni20Cr)

2.3.1 La composition chimique et la morphologie de la poudre

Metco 81VF-NS offre plusieurs avantages, lorsque les revêtements minces sont

Satisfaisants, en ce que les revêtements tels que pulvérisés sont très lisses. Metco 81VF-NS produit enduits minces, denses, durs et lisses qui sont extrêmement résistants à l'usure et à l'oxydation.

La composition chimique

La poudre est composée de 75% de Carbure de Chrome (Cr_3C_2) et de 25% de Nickel Chrome (80% Ni / 20% Cr) conforme au tableau ci-dessous, et selon la norme ASTM E354.

Tableau 2.1: La composition chimique de la poudre.

Elément	Cr	Ni	C	Autres
Pourcentage	69.25	18.75	9.75	2.25

2.4 Substrats

Dans cette étude, nous avons un substrat du Hastelloy X (HX)

2.4.1 Hastelloy X (HX)

Possède une excellente résistance à la corrosion. En outre, il offre des caractéristiques de résistance à des températures très élevées qui arrivent jusqu'à 1200°C . Le HX est très présent dans l'industrie du formage et du soudage. Il est utilisé pour la réalisation de turbines à gaz industrielles ou marines, de turbomachines aéronautiques et, de façon plus limitée, dans l'industrie des fours et l'industrie chimique. [18].

2.4.1.1 La composition chimique [18].

Tableau 2.2: Proportion des éléments de Hastelloy X en (%) pourcentage massique.

Elément	% Massique
Nickel:	47
Chrome:	22
Fer:	18

Elément	% Massique
Molybdène:	9
Cobalt:	1.5
Tungstène:	0.6
Carbone:	0.1
Manganèse:	1 max.
Silicium:	1 max.
Bore:	0.008 max.
Niobium:	0.5 max.
Aluminium:	0.5 max.
Titane:	0.15 max

2.5 Préparation du Projection

Avant d'entamer la projection thermique on place sur la pièce à revêtir des échantillons des différentes formes.



Figure 2.1: Forme de l'échantillon

2.5 .1 Préparation du substrat

2.5.1.1 Sablage

La qualité d'un revêtement dépend énormément de la préparation préalable de la surface. De façon générale, le but de la préparation de la surface est l'augmentation de l'adhérence. Pour qu'il y ait adhérence, il faut avoir des liaisons directes entre le substrat et le revêtement. Algesco utilise Al_2O_3 (Alumine) pour préparation de la surface.

Les paramètres de sablage sont présentés dans le tableau ci-dessus

Tableau 2.3. Paramètres de sablage:

Angle	60°-80°
Distance	120mm-150mm
Pression	3.5-4 Bar
Taille de grain	24mm
Diamètre de la Buse	4mm
Temps	2.5min

2.5.2 Préparation de la poudre

Les poudres sont mises à sécher dans un four à 70° pendant (2 - 8) h, afin d'évacuer une éventuelle l'humidité en présence.

2.5.3 Procédés de projection

L'installation de projection SULZER-METCO (Oerlikon) du centre ALGESCO est entièrement automatisée, dont l'installation de projection thermique est similaires pour l'ensemble des procédés, leur degré de sophistication et de coût étant toutefois variables **figure 2.2.**



Figure 2.2 : Dispositif de projection plasma APS

Les constituants de base sont :

- une source de chaleur (gaz, générateurs électriques).
- un chalumeau dans lequel sont réalisées les opérations de fusion du matériau projeté, et d'acquisition d'énergie cinétique par les particules.
- un dispositif de régulation et de contrôle de l'énergie calorifique (simples débitmètres pour une installation de base de projection flamme, ou armoire automatique, par exemple).
- un dispositif d'alimentation en produit d'apport.

D'autres constituants assurent le contrôle, l'automatisation, la traçabilité ou la sécurité :

- ❖ Cabine d'insonorisation.
- ❖ Extraction-filtration de l'air dans la zone de travail.
- ❖ Systèmes d'animation du chalumeau et de la pièce revêtue.
- ❖ Asservissement entre animation et paramétrage de l'installation.
- ❖ Systèmes d'acquisition de données.

2.5.3.1 Paramètres de la projection

Les conditions de projection différentes telles que sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau 2.4: Les conditions de la projection.

Test #	Test # 1	Test # 2	Test # 3	Test # 4
Recette #	63	163	163	163
Cellule de revêtement #	01	01	01	01
Nom de la poudre [type]	Metco 81VF-NS	Metco 81VF-NS	Metco 81VF-NS	Metco 81VF-NS
Composition chimique en poudre	Cr3C2 25(Ni20Cr)	Cr3C2 25(Ni20Cr)	Cr3C2 25(Ni20Cr)	Cr3C2 25(Ni20Cr)
Canon à plasma [type]	9MBM	9MBM	9MBM	9MBM
Type de buse / électrode	G	G	G	G
Ø d'injecteur [mm]	La norme #2	La norme #2	La norme #2	La norme #2
Gaz distribué.	Ar	N2	N2	N2
Courant [A]	500	430	500	500
Tension enregistrée [V]	64.4	76.9	77.9	77.9
Puissance enregistrée Kw	32.2	32.7	38.9	38.9
Argon (Ar) / N2 [nlpm]	Ar:39.9	N2:58	N2:65.7	N2:65.7
Hydrogène (H ₂) [nlpm]	5	2.3	2.6	2.6
Distance de pulvérisation [mm]	85	85	85	100
Vitesse de rotation [mm]/[RPM]	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel
Vitesse du robot [mm/s]	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel
Angle de pulvérisation °	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel

Test #	Test # 1	Test # 2	Test # 3	Test # 4
Pièce d'épandage / aspiration [type]	NL 16 1.2	NL 16 1.2	NL 16 1.2	NL 16 1.2
Type de gaz vecteur de poudre ; [nlpm]	Ar: 4.5	Ar: 4.5	Ar: 4.5	Ar: 4.5
Taux d'alimentation en poudre [g/min]	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel
Réglage numérique.	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel
Vitesse de l'agitateur [RPM]	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel
Nombre de passes #	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel
Refroidissement du pistolet	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel
Refroidissement du substrat	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel	GE confidentiel
Approuvé par Nom/date	A.HAMRIT/ 03/2011	A.HAMRIT/ 06/2019	A.HAMRIT/ 06/2019	Rejeté

Chapitre 3

Techniques Expérimentales

3.1 Introduction

Diverses approches expérimentales exploitées nous ont permis d'atteindre notre objectif. Dans le présent chapitre, nous allons introduire, présenter et détailler les caractéristiques et le principe d'analyse des différentes techniques et moyens utilisés pour la concrétisation de notre étude.

Dans ce chapitre la forme et les dimensions des échantillons sont gouvernées par des contraintes imposées par les principes de fonctionnement des appareils utilisés, ainsi que par les dimensions des portes échantillons.

3.2 Caractérisations morphologiques

Les observations métallographiques ont été réalisées à l'aide d'un microscope optique et d'un microscope électronique à balayage couplée à l'analyse des phases (EDS). Pour les caractérisations au microscope électronique à balayage, pratiquement aucune préparation n'est nécessaire, si ce n'est le prélèvement d'échantillons pour un volume total de l'ordre de quelques centimètres cube. En revanche, les observations au microscope optique, nécessitent une préparation classique : découpage, enrobage (à chaud ou à froid), polissage mécanique suivi d'une attaque chimique.

3.3 Préparation des échantillons

Le découpage : On découpe les échantillons avec un micro-tronçonneuse.

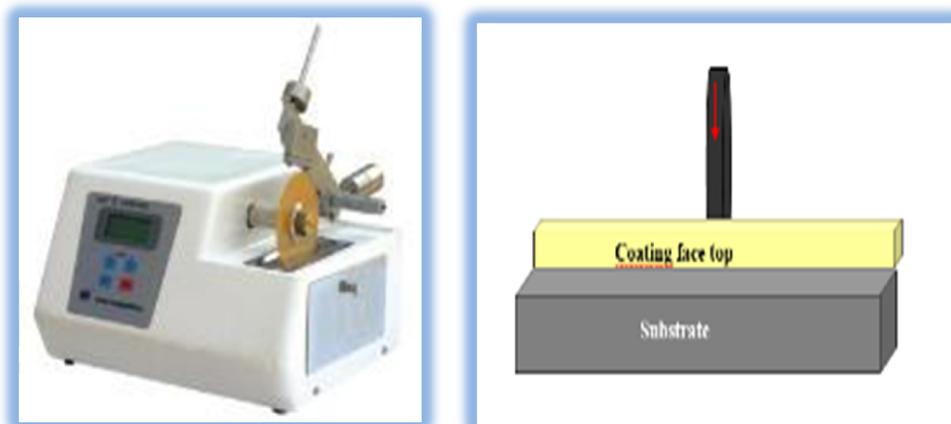


Figure3.1 : Schéma montrant le procédé de découpe l'échantillon revêtu

L'enrobage : Pour les échantillons réalisés par plasma APS l'enrobage se fait à froid ; tandis que les réalisés par HVOF, l'enrobage se fait à chaud et nous avons utilisé une enrobeuse de marque IPA 40 REMET.



Figure 3.2: Echantillon enrobé froid



Figure 3.3: Echantillon enrobé à chaud

Le polissage : Les échantillons sont d'abord dégrossis sur un disque abrasif grossier pour assurer la planéité de la surface.

Ensuite, le polissage est effectué dans une polisseuse à disque tournant (vitesse 300tr/mn) ou l'on colle à chaque fois un papier abrasif (en carbure de silicium) de plus en plus fin, allant de 180 à 1200 grain/cm². L'opération de polissage se fait avec lubrification à l'eau afin d'éviter les transformations structurales.

Pour la finition (obtention de l'état miroir), on polit les échantillons sur des papiers à feutre en utilisant comme suspension des pâtes diamantées de granulométrie de 6 à 1 micron.

Les échantillons une fois polis, sont lavés dans un bain à ultrason puis séchés par une sècheuse, pour éviter les auréoles qui se produiraient par un séchage en air calme.

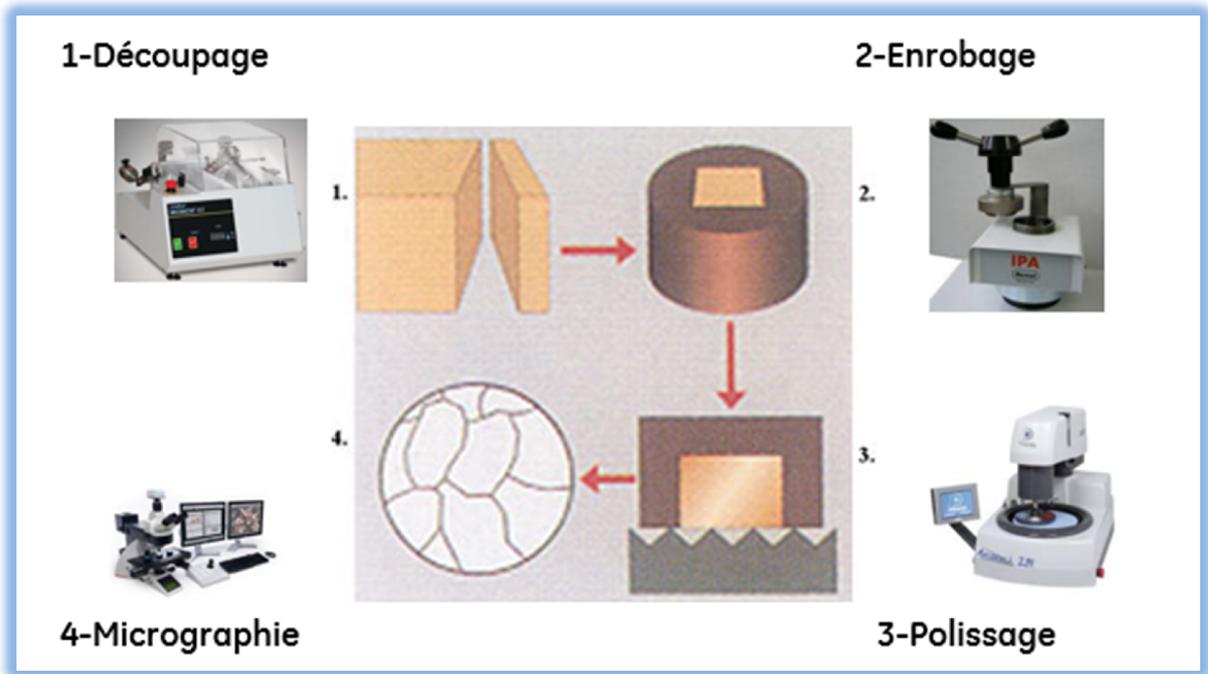


Figure 3.4 : Préparation des échantillons pour la micrographie

3.4 Appareillage

3.4.1 Microscopie optique

L'observation d'images au microscope optique a été pendant longtemps la seule possibilité qui existait en métallurgie. Elle en est restée une des bases fondamentales malgré le développement important de la microscopie électronique, d'abord en transmission, puis à balayage, qui a vraiment ouvert des horizons nouveaux en ce qui concerne l'échelle observable. Elle reste la base de toute observation métallurgique et la première méthode à utiliser, avant de passer éventuellement à une autre, plus puissante ou plus spécialisée, mais aussi plus difficile à mettre en œuvre, plus lourde et plus coûteuse. Malheureusement cette technique est limitée, de par la longueur d'onde utilisée, à une résolution de l'ordre de $0,2\mu\text{m}$, ce qui correspond à des grossissements de 1200 à 1500. Autre inconvénient, la profondeur de champ très limitée ce qui exclut l'examen à fort agrandissement d'échantillons non plans. La microscopie optique permet l'observation de surface par la réflexion de la lumière. Une source lumineuse, dans le domaine visible, illumine la surface à étudier. Les photons réfléchis passent à travers une série de lentilles, et forment une image grossie de la surface. Afin d'avoir le plus de détails possibles, les photons doivent être réfléchis dans une seule direction. Et c'est pour cela qu'on fait un polissage soigné (pour rendre la surface la plus plane possible). La profondeur de champ et la résolution sont assez faibles (détail le plus petit visible de l'ordre de $1\mu\text{m}$). Les grossissements sont de l'ordre de 50 à $500\times$ [17].

Nos examens métallographiques ont été réalisés moyennant un microscope optique à réflexion **figure 3.5** relié à un ordinateur (laboratoire ALGESCO). Les échantillons peuvent être observés sous divers agrandissements (50 à 500 fois). Le microscope optique est essentiellement constitué de deux composants optiques : l'objectif et l'oculaire. Cet ensemble solidaire d'un tube est pointé sur l'objet posé sur une platine dotée d'organes permettant le positionnement de l'objet dans son plan, généralement par deux mouvements de translation. La mise au point est assurée par deux dispositifs de translation rapides et lents parallèles à l'axe optique et l'éclairage de l'objet est assuré par un ensemble condenseur et source.



Figure 3.5 : Microscope optique

Dans le but d'exploiter au mieux les micrographies, nous avons utilisé un logiciel de traitement d'image.

3.4.2 Microscopie électronique à balayage

Nos échantillons ont été caractérisés par un microscope électronique à balayage, qui permet une étude morphologique poussée grâce aux forts grossissements qu'il peut atteindre, et à la très grande profondeur des champs qui le caractérisent. En effet, la microscopie électronique à balayage (MBE ou SEM pour les Anglo-Saxons) constitue un excellent prolongement de la microscopie optique. Elle possède par rapport à ces derniers deux avantages important :

- L'obtention possible de forts grossissements, jusqu'à 150000 en format photo, ce qui peut correspondre à 600 000 sur un écran, mais également le recoupement avec la microscopie optique puisque les grossissements minimaux sont de l'ordre de 10 à 15.
- Une profondeur de très importante : environ cent fois celle de la microscopie optique à même grossissement, ce qui autorise la réalisation d'images sur des échantillons non plans

En effet cet outil rend possible l'observation de reliefs importants tel que les interfaces (substrat+ couches).

Le recours à la microscopie Electronique à balayage (MEB type JEOL JSM-6380) a permis l'obtention d'images classiquement à 20KV. L'appareil offre la possibilité de faire des observations en utilisant les électrons secondaires (contraste topographique) ou les électrons rétrodiffusés (contraste chimique). De plus, il est équipé d'un analyseur X à dispersion d'énergie(EDS), de marque EDAX, qui permet une analyse qualitative et semi-quantitative des phases en présence.

3.4.3 Spectromètre dispersif en énergie (EDS Energie dispersive spectrométrie)

D'EDS (Energie dispersive spectrométrie) et un détecteur en énergie, il s'agit d'une diode en silicium dopé au lithium. Pour analyser l'émission des rayons X, le détecteur convertit l'énergie du photon X en paire électron-trou qui provoque à la sortie de la diode une impulsion de tension proportionnelle à l'énergie de se photon. Les photons X sont émis par des atomes ionisés par un l'impact du faisceau d'électron en revenant à l'état fondamental. Chaque photon possède une énergie caractéristique propre à l'élément qui les a émis, ce qui nous permet de connaître la composition chimique des échantillons. Ces photons son recueillis et classés suivant leurs énergies par l'EDS et on obtient un spectre X qui est un histogramme du nombre d'impulsion en fonction de leur énergie. L'EDS permet détecter simultanément les photons X dans une large bande d'énergie, il est donc particulièrement bien adapté à l'analyse d'échantillon de nature inconnue.



Figure 3.5.1 : Microscope EDS

3.5 Essais Mécaniques

3.5.1 Essais de la micro dureté

La notion de micro-dureté est l'une des plus intuitives destinée à définir les propriétés mécaniques à l'intérieur des grains, soit de la matrice, soit de diverses phases constituantes. Sa mesure correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. La micro-dureté est alors une propriété physique, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration. Les essais habituels de la micro-dureté sont simples, rapides, et généralement non destructifs ; ils offrent donc un moyen très commode, et très utilisé dans les ateliers, pour vérifier l'évolution des propriétés d'une pièce métallique, notamment lors des traitements thermiques et mécaniques, ou pour contrôler la conformité des fournitures.

Pour nos essais, nous avons utilisé un micro-duremètre au niveau du laboratoire d'algesco, grossissement X400 et de charge maximale de 1 kgf.



Figure 3.6: Micro d'uromètre & l'empreinte du pénétrateur dans l'essai de micro dureté

L'essai consiste à imprimer dans l'échantillon (après polissage)

Un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carré, d'angle au sommet 136° , sous une charge (p), et à mesurer la diagonale (d) de l'empreinte laissée sur la surface après suppression de la charge, la micro- dureté est déterminer an appliquant la relation suivante : **$H_v = 1854x p/d^2$**

Avec : p : charge d'essai en newtons (N)/ d : diagonale moyenne de l'empreinte (μm).

$D = (d_1 + d_2) / 2$ **figure 3.7.**



Figure 3.7 : Schéma de l'empreinte de pénétrateur dans l'essai de micro dureté Vickers

Conditions opératoires

L'essai est effectué à la température ambiante.

- Une charge de 0,3kg est appliquée progressivement sans chocs, ni vibration et maintenu à sa valeur finale pendant 5s pour substrats et les échantillons à revêtement dur (contre l'usure).
- La surface à étudier est préparée (polissage).

3.5.2 Mesure de rugosité

Une surface usinée n'est pas une surface parfaitement lisse : selon la méthode d'usinage et les outils utilisés, mais aussi selon le matériau, elle présente de nombreuses irrégularités micro-géométriques ou macro-géométriques. Ces irrégularités sont définies par comparaison avec une ligne "moyenne", et son classées en deux catégories : des aspérités ou "pics", et des cavités ou "creux". Ou l'ensemble de ces défauts de surface constitue la rugosité.

La rugosité d'une surface donnée peut être déterminée par la mesure d'un certain nombre de paramètres. On peut citer notamment, parmi les plus utilisés :

Tableau 3.1 : Paramètres de la rugosité

Rp	Pic maximal observé sur la longueur analysée. Si l'on pose un repère cartésien dont l'axe des abscisses est aligné sur la ligne centrale de la surface à mesure, le pic maximal, la sur l'axe des ordonnées, pourra également être noté $R_p=y_{max}$ (voir diagramme ci-dessous)
Rc	Creux maximal observé sur la longueur analysée (voir diagramme ci-dessous). $R_c=[y_{min}]$
Ri	Rugosité totale. Elle correspond à la somme du pic maximal et du creux maximal observé sur la longueur analysée. $R_t= R_p+R_c$ (voir diagramme ci-dessous)
Ra	Ecart moyen, ou moyenne arithmétique des distances entre pic et creux successifs. "Ra" correspond à la différence entre cette distance moyenne et la "ligne centrale". Ce paramètre "moyen" permet de donner une indication générale résumant les autres paramètres de rugosité d'une surface donnée, et par conséquent fréquemment utilisé.

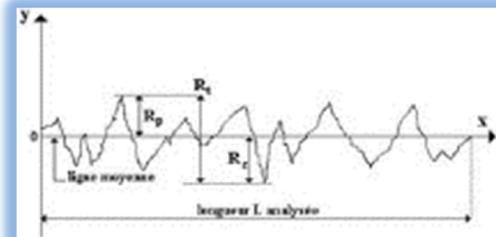
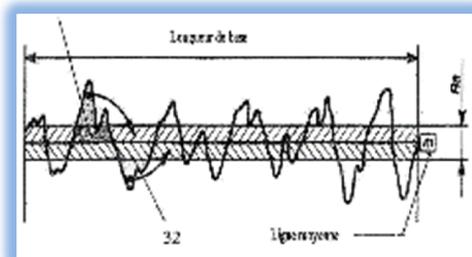


Figure 3.8 : Paramètres de mesure de rugosité

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne sont pas suffisantes pour distinguer une différence de rugosité entre deux surfaces, on utilise un rugosimètre. Les rugosimètres reprennent les principes de fonctionnement déterminant de manière sûre et précise un certain nombre de paramètres de rugosité (Ra, Rz...) [19].

Dans notre cas, nous avons utilisé un rugosimètre de marque **figure 3.9**, après sablage nous relevons 5 mesures de Ra sur les substrats (étape avant revêtement).



Figure 3.9 : Instrument de mesure de la rugosité (Rugosimètre).

Tableau 3.2 : Valeur des rugosités mesurées:

Echantillon#	#1	# 2	# 3	# 4	# 5	Ra moy (μm)
Ra (μm)HX	3.77	3.73	4.03	3.49	3.99	3.73

Au début de nos expériences, nous avons réalisé un sablage avec de l'oxyde d'aluminium assez fin et il en a résulté un Ra très faible, nous avons essayé d'y faire un revêtement.

L'accrochage était quasi nul **figure 3.10**.



Figure 3.10 : Décollement du revêtement pour cause de mauvaise préparation de surface

3.5.3 Essai Normalisé de traction

Echantillons pour la traction (détermination de l'adhérence) : En forme de pastille de dimension : 25cm de diamètre et de 6cm d'épaisseur pour le type de revêtement (Plasma)



Figure 3.11: Echantillons pour traction

L'essai de traction est un rare essai normalisé pour la mesure de la résistance de l'interface. Ses normes sont européennes (EN582), américaine (ASTMC633) ou internationale (ISO14916). Il s'agit de l'essai le plus répandu dans le laboratoire industriel et même le laboratoire scientifique jusqu'à récemment.

Pour réaliser l'essai une éprouvette cylindrique standard, revêtu sur sa face plane, est assemblée par collage, généralement avec de la résine d'époxy, à une contre-éprouvette de dimension identique **figure 3.12**. Cet assemblage est soumis à un essai de traction jusqu'à sa rupture. La valeur de la résistance à la traction est obtenue en divisant la force maximale de rupture par l'aire de la surface projetée [20].



Figure 3.12: Assemblage d'une éprouvette pour l'essai de traction selon l'ASTMC633

Au cours de cet essai, plusieurs ruptures peuvent apparaître. Il pourra s'agir de rupture dite *adhésive* quand la rupture de l'interface entre le substrat et le revêtement de rupture de la colle à l'intérieur de la couche de colle ou à l'interface entre la colle et le revêtement ou l'interface entre la colle et la contre- éprouvette. Ces différents modes de rupture peuvent apparaître simultanément [20].

La figure 3.13 représente une éprouvette revêtue ayant subi l'essai de traction. On peut y observer les trois modes de rupture. L'interprétation du résultat de l'essai est dans ce cas très difficile et des valeurs identiques de résistance à la traction peuvent représenter des mécanismes de rupture extrêmement différents.

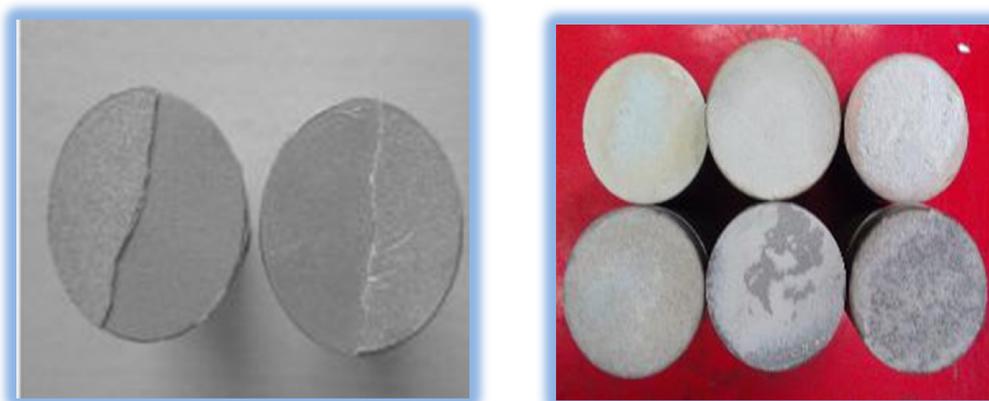


Figure 3.13 : Représentation schématique d'un revêtement après essai de traction

L'utilisateur de colle est une source de problèmes de différents ordres. Tout d'abord, la colle possède une résistance à la traction qui est parfois de celle du revêtement, ce qui limite les capacités de l'essai. De plus, la colle peut pénétrer dans les porosités ouvertes du revêtement [20], et dans le cas des revêtements minces, atteindre le substrat, forment une sorte

de composite *colle – revêtement*. Ce composite possède des propriétés mécaniques différentes de celle du revêtement et n'est pas représentatif du comportement observé. La norme utilisée recommande alors l'utilisation d'un essai de flexion mais ce dernier a aussi ses propres limitations et est très sensible aux conditions de préparation.

De même, il faut noter que cet essai est difficile à mettre en œuvre car il impose que le système soit parfaitement aligné pour que la sollicitation en traction soit unidirectionnelle. Cet alignement peut être favorisé par l'utilisation de rotules sur l'axe de traction mais n'est jamais parfait dans la pratique [20].

3.5.4 Essai de pliage

L'essai de pliage consiste à plier le substrat afin d'amener le dépôt dans des conditions extrêmes de tension. Il permet de façon qualitative d'évaluer l'adhérence du dépôt ainsi que sa souplesse, c'est-à-dire sa capacité à accommoder les contraintes. Un essai de ce type induit les mêmes types de contraintes que celles supportées par le dépôt lorsqu'il est exposé à de hautes températures, ou le substrat se dilate plus que le dépôt de zircone (pour les barrières thermiques). A la fin du déroulement de l'essai, les deux bords opposés de l'éprouvette forment un angle de presque 180° (**figure 3.14**, droite) [17].

Pour nos tests nous avons utilisé un dispositif de pliage sur mandrin cylindrique selon la norme ASTM522



Figure 3.14: Dispositif de pliage à mandrin cylindrique & Exemple d'éprouvette en fin d'essai

-Mode opératoire du dispositif de pliage à mandrin cylindrique : pour l'essai on met en place le mandrin désiré. On place le levier du système de pliage vers la gauche (face au manche noir pivotante). On passe alors la tôle d'essai entre le mandrin et les gales de pression et on l'insère dans la mâchoire de serrage, En tournant le manche noir, les mâchoires de

serrage se referment aussitôt (ne pas encore serrer à fond) et, à l'aide du même manche noir, la tôle d'essai sera mise en contact avec le mandrin. Alors seulement à ce moment-là, on serre à

Fond en tournant, ce qui retient fermement le dispositif de serrage avec les galets de guidage en tournant la vis du levier de serrage on comprime les galets de guidage contre la tôle d'essai et le mandrin. En faisant tourner le levier de pliage de 180° jusqu'à la butée qui se trouve sur le côté droit de l'appareil, on centre la tôle d'essai portant la peinture autour du mandrin choisi. Le processus de pliage doit s'effectuer sans à-coups et durer 1-2s

Chapitre 4

Résultats et discussions

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif du travail consiste à présenter les résultats des analyses et essais réalisés à différentes échelles ainsi que les interprétations correspondantes.

L'étude métallographique (la microscopie optique, MEB, EDS) consiste à caractériser le dépôt, principalement l'aspect structural et morphologique des différentes couches et leurs cohésions avec le substrat, il s'agit principalement de mettre en évidence les points suivants :

- Ligne de contamination.
- Les mesures d'épaisseurs.
- Taux de porosité par analyse d'images.

La seconde partie de ce chapitre sera consacré à l'étude du comportement mécanique de notre revêtement à savoir

- Mesure de micro-dureté.
- Evaluation l'adhésion du dépôt grâce à un test d'arrachement avec test de la traction et test du pliage ;

Les essais ont été réalisés au laboratoire de Centre de Recherche et de Développement de l'Electricité et du Gaz (**Credeg**) et au centre de recherche en technologies industrielles (**Crti**) et au centre d'excellence (**Algesco**).

4.2 Caractérisation des dépôts

4.2.1 Morphologie

4.2.1.1 Ligne de contamination

Les caractéristiques d'adhérence dépendent d'une part des paramètres des particules à l'impact (la vitesse, taille, état de fusion et état chimique) d'une part, ainsi que la préparation de la surface du substrat (matière, rugosité, état chimique de la surface, température) avant dépôt d'autre part, ces paramètres sont fondamentaux dans les phénomènes d'adhérence, tant au niveau de l'adhérence chimique que l'adhérence mécanique. Par exemple, un mauvais nettoyage aura pour conséquence de laisser des impuretés à l'interface, d'autres caractéristiques surfaciques entrent en compte dans les phénomènes d'adhérence.

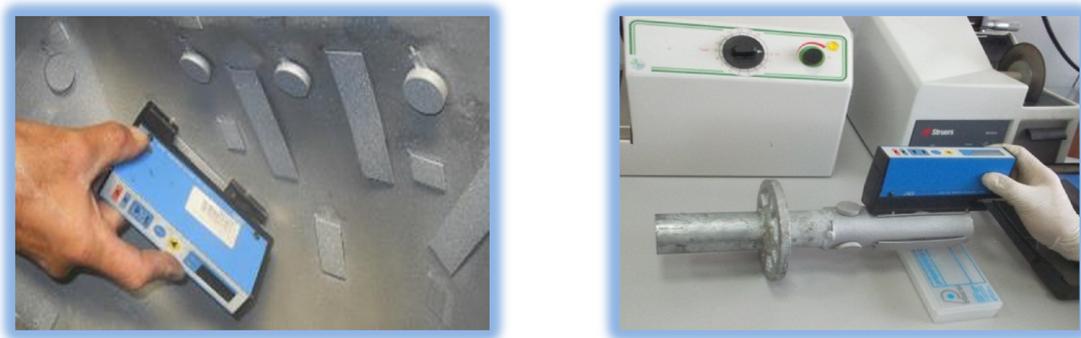
4.2.1.1.1 Interface substrat /couche

Lors des étapes de préparation pour le dépôt, le substrat a été sablé [cf-chapitre 3] dans le but d'augmenté la rugosité afin de crée un accrochage mécanique entre le dépôt et le substrat.

La mesure de rugosité obtenue se fait à l'aide d'une rugosité a palpeur mécanique donnant directement la valeur de la rugosité moyenne (Ra), une série de 3 mesure sur des points différents on a été effectué, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 4.1 : Mesure de rugosité Ra après sablage

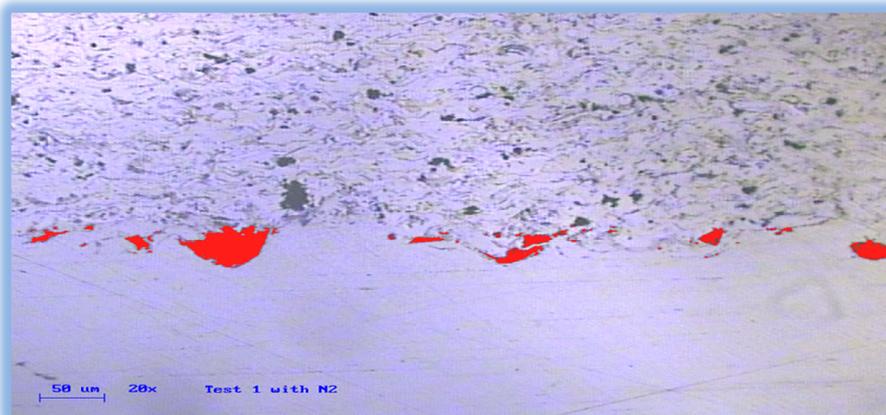
MESURE	Ra (μm)
1	6.02
2	7
3	6.6
MOYENNE	6.53

**Figure 4.1 : Mesure de la rugosité après sablage**

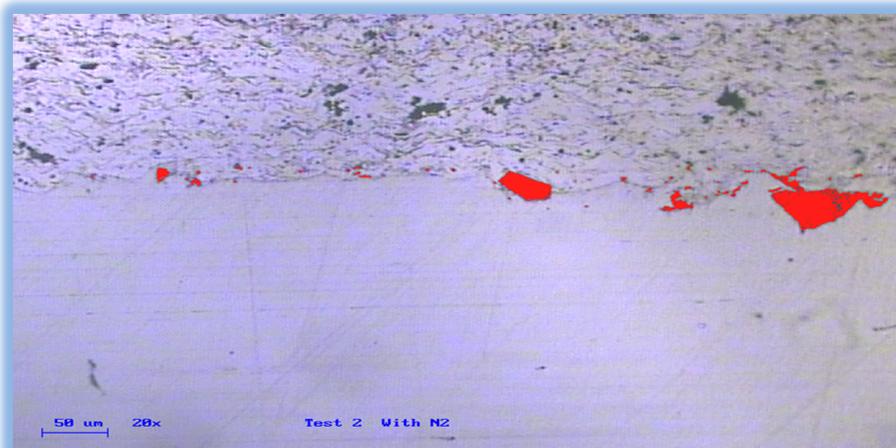
Interface couche substrat pour Ar Test # 1.



Interface couche substrat pour N₂ Test # 2.



Interface couche substrat pour N₂ Test # 3.



Interface couche substrat pour N₂ Test # 4.

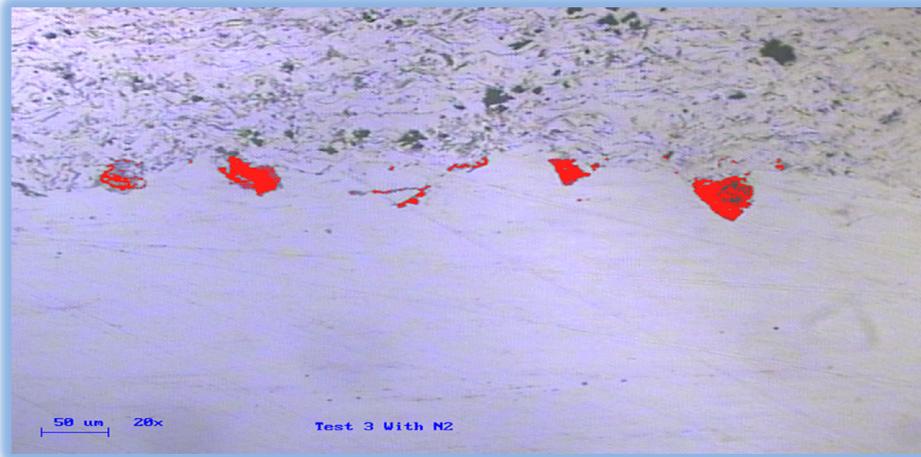


Figure 4.2 : Image micrographique montrant l'interface couche/substrat

On voit bien que nous sommes en présence d'un accrochage de type mécanique, le dépôt épouse les irrégularités de la surface créée lors du sablage, la micrographie montre une bonne adhérence entre le substrat et la couche d'accrochage.

L'interface présente une certaine continuité avec la présence d'irrégularité due à un fort taux de porosités. L'adaptation de la morphologie des particules sur la surface du substrat met en évidence l'effet de l'accrochage mécanique. A noter que la présence de porosité ouverte sur la couche est non négligeable. Ce qui donc peut présenter un handicap quant à une meilleure adhérence du dépôt et le risque de décollement sera important.

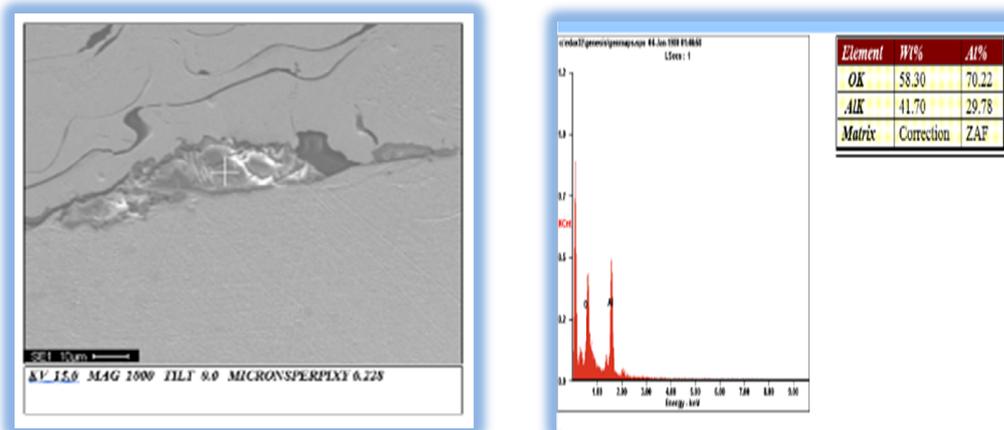


Figure 4.3 : Image MEB (rétrodiffusé) et analyse EDS d'un point de la contamination couche/Substrat.

4.2.1.2 Mesure de l'épaisseur

Les particules percutent le substrat dans un état de fusion avancée, à des vitesses importantes, de l'ordre de quelque centaine de mètre par seconde. Elle s'écrase sur le substrat et refroidissent très rapidement, puis s'empilent les unes sur les autres réalisant ainsi progressivement un dépôt de plusieurs dizaines de microns à quelques centimètres d'épaisseur. L'épaisseur de revêtement a été mesurée par la méthode métallographique, à l'aide d'un microscope optique et d'un logiciel de traitement d'image Easy-Analysis, il s'agit d'une méthode fiable et précise, cette méthode est normalisée selon ISO 1463.

Conformément à la norme en vigueur, les valeurs obtenues sont la moyenne des mesures effectuées sur des images prises le long de l'interface avec une dizaine de mesures sur chaque image, pour chaque couche les mesures sont présentées dans la **figure 4.4**.



Figure 4.4 : profil d'épaisseur couche projetée par Plasma APS

Tableau 4.2 : Epaisseurs de dépôt élaboré par plasma APS mesurées par Easy-Analysis

Test #	Samples #	Location #1 (µm)	Location #2 (µm)	Location #3 (µm)	Location #4 (µm)	Location #5 (µm)	Moyenne/Ech (µm)	Moyenne (µm)
Ar Test # 1	A#1	569	546	594	557	573	568	550
	A#2	554	551	584	558	564	562	
	A#3	508	492	512	544	540	519	

Test #	Samples #	Location #1 (µm)	Location #2 (µm)	Location #3 (µm)	Location #4 (µm)	Location #5 (µm)	Moyenne/Ech (µm)	Moyenne (µm)
N ₂ Test # 2	A#1	588	589	615	544	619	591	566
	A#2	562	580	604	583	554	577	
	A#3	526	552	504	523	545	530	

Test #	Samples #	Location #1 (µm)	Location #2 (µm)	Location #3 (µm)	Location #4 (µm)	Location #5 (µm)	Moyenne/Ech (µm)	Moyenne (µm)
N ₂ - Test # 3	A#1	421	441	437	479	459	447	444
	A#2	456	444	440	435	454	446	
	A#3	457	445	430	426	437	439	

Test #	Samples #	Location #1 (μm)	Location #2 (μm)	Location #3 (μm)	Location #4 (μm)	Location #5 (μm)	Moyenne/Ech (μm)	Moyenne (μm)
N ₂ - Test # 4	A#1	674	679	650	655	645	661	666
	A#2	653	667	643	686	660	662	
	A#3	655	691	700	670	666	676	

*Les valeurs de l'épaisseur obtenue, résultant de la moyenne de 5 mesures.

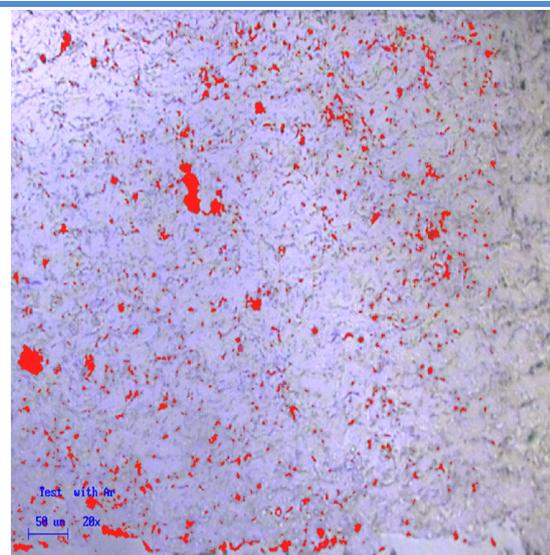
4.2.1.3 Porosité et oxydation

Les porosités ont été caractérisé par l'observation de coupes métallographique par microscopie et ont été quantifié par analyse d'image elles apparaissent en tache noires, la teneur d'oxyde a été déterminé par analyse d'image aussi en évaluant le niveau du gris avec le logiciel Easy -Analyse. Dans notre cas les oxydes ont été confondus et qualifier avec les pores.

L'ensemble des résultats obtenu est reporté dans le tableau 4.3

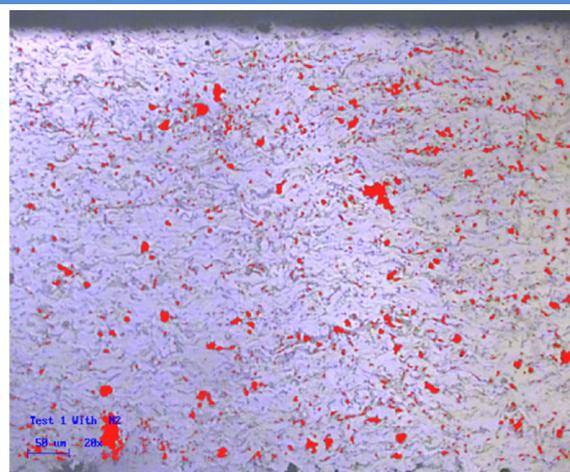
Tableau 4.3: Traitement d'image illustrant la répartition de la porosité dans la couche.

Calcul de porosité et oxyde pour Ar Test # 1.



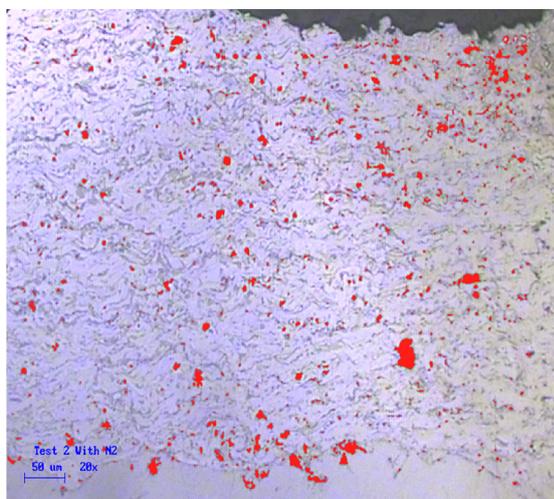
Misure campi: 2			
Area ROI =	281965,9 µm²		
Area Totale =	379310,0 µm²		
(Area ROI/Area Totale) % =	74,3		
Numero Oggetti nella ROI =	1239		
Area Oggetti =	11965,9 µm²		
(A.Oggetti/A.Totale) % =	3,2	(A.Ogg./A.ROI) % =	4,2
Perimetro minimo =	3,8 µm	Oggetto N. =	6 - 2
Perimetro Massimo =	196,8 µm	Oggetto N. =	566 - 2
Perimetro Medio =	10,7 µm	Stdev =	12,4 µm
2P Inf. (3*stdev) =	-26,4 µm	2P Sup. (3*stdev) =	47,8 µm
Area minima =	1,5 µm²	Oggetto N. =	6 - 2
Area Massima =	664,3 µm²	Oggetto N. =	566 - 2
Area Media Obj =	9,7 µm²	Stdev =	28,6 µm²
Area Inf. (3*stdev) =	-76,2 µm²	Area Sup. (3*stdev) =	95,5 µm²
F. Forma minimo =	0,2	Oggetto N. =	222 - 2
F. Forma Massimo =	1,3	Oggetto N. =	6 - 2
F_Forma Medio =	1,0	Stdev =	0,3
F.F. Inf. (3*stdev) =	0,1	F.F. Sup. (3*stdev) =	1,8

Calcul de porosité et oxyde pour N2 Test # 2.



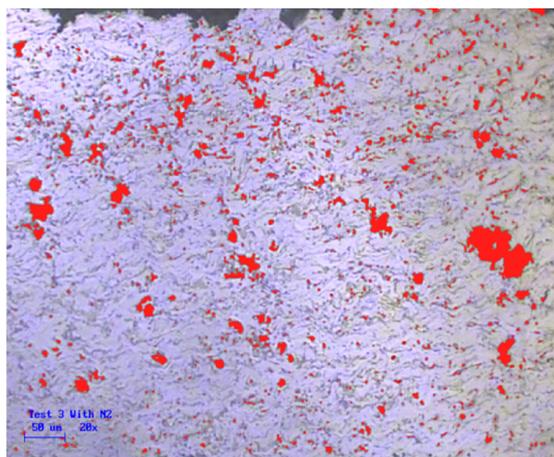
Misure campi: 3			
Area ROI =	289977,1 µm²		
Area Totale =	379310,0 µm²		
(Area ROI/Area Totale) % =	76,4		
Numero Oggetti nella ROI =	1228		
Area Oggetti =	12105,9 µm²		
(A.Oggetti/A.Totale) % =	3,2	(A.Ogg./A.ROI) % =	4,2
Perimetro minimo =	3,8 µm	Oggetto N. =	6 - 3
Perimetro Massimo =	262,4 µm	Oggetto N. =	1542 - 3
Perimetro Medio =	10,7 µm	Stdev =	13,2 µm
2P Inf. (3*stdev) =	-29,0 µm	2P Sup. (3*stdev) =	50,4 µm
Area minima =	1,5 µm²	Oggetto N. =	6 - 3
Area Massima =	684,6 µm²	Oggetto N. =	1542 - 3
Area Media Obj =	9,9 µm²	Stdev =	28,5 µm²
Area Inf. (3*stdev) =	-75,7 µm²	Area Sup. (3*stdev) =	95,4 µm²
F. Forma minimo =	0,1	Oggetto N. =	1542 - 3
F. Forma Massimo =	1,3	Oggetto N. =	6 - 3
F_Forma Medio =	1,0	Stdev =	0,3
F.F. Inf. (3*stdev) =	0,1	F.F. Sup. (3*stdev) =	1,8

Calcul de porosité et oxyde pour N₂ Test # 3.



Misure campi: 4			
Area ROI =	299048,9 μm ²		
Area Totale =	379310,0 μm ²		
(Area ROI/Area Totale) % =	78,8		
Numero Oggetti nella ROI =	819		
Area Oggetti =	11161,7 μm ²		
(A.Oggetti/A.Totale) % =	2,9	(A.Ogg./A.ROI) % =	3,7
Perimetro minimo =	2,5 μm	Oggetto N. =	762 - 4
Perimetro Massimo =	515,4 μm	Oggetto N. =	4 - 4
Perimetro Medio=	11,6 μm	Stdev=	24,3 μm
2P Inf. (3*stdev)=	-61,4 μm	2P Sup. (3*stdev)=	84,5 μm
Area minima =	1,1 μm ²	Oggetto N. =	762 - 4
Area Massima =	1833,1 μm ²	Oggetto N. =	4 - 4
Area Media Obj=	13,6 μm ²	Stdev=	79,8 μm ²
Area Inf. (3*stdev)=	-225,8 μm ²	Area Sup. (3*stdev)=	253,1 μm ²
F. Forma minimo =	0,1	Oggetto N. =	4 - 4
F. Forma Massimo =	2,1	Oggetto N. =	762 - 4
F. Forma Medio=	1,0	Stdev=	0,3
F.F. Inf. (3*stdev)=	0,1	F.F. Sup. (3*stdev)=	1,8

Calcul de porosité et oxyde pour N₂ Test # 4.



Misure campi: 6			
Area ROI =	323544,7 μm ²		
Area Totale =	379310,0 μm ²		
(Area ROI/Area Totale) % =	85,3		
Numero Oggetti nella ROI =	1209		
Area Oggetti =	20384,0 μm ²		
(A.Oggetti/A.Totale) % =	5,4	(A.Ogg./A.ROI) % =	6,3
Perimetro minimo =	3,8 μm	Oggetto N. =	18 - 6
Perimetro Massimo =	467,0 μm	Oggetto N. =	1 - 6
Perimetro Medio=	12,4 μm	Stdev=	22,6 μm
2P Inf. (3*stdev)=	-55,5 μm	2P Sup. (3*stdev)=	80,3 μm
Area minima =	1,5 μm ²	Oggetto N. =	18 - 6
Area Massima =	2379,0 μm ²	Oggetto N. =	1 - 6
Area Media Obj=	16,9 μm ²	Stdev=	104,4 μm ²
Area Inf. (3*stdev)=	-286,4 μm ²	Area Sup. (3*stdev)=	330,1 μm ²
F. Forma minimo =	0,1	Oggetto N. =	1 - 6
F. Forma Massimo =	1,3	Oggetto N. =	18 - 6
F. Forma Medio=	1,0	Stdev=	0,3
F.F. Inf. (3*stdev)=	0,1	F.F. Sup. (3*stdev)=	1,8

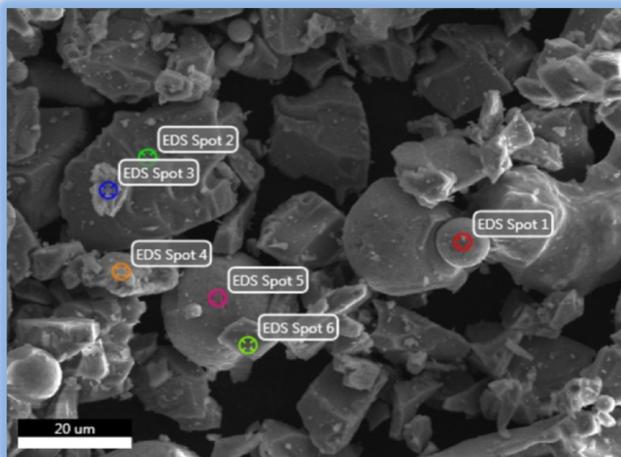
La porosité et l'oxydes dans le cas de la projection thermique par plasma APS semblent beaucoup plus importants Lorsque la distance est plus grande.

4.2.1.4 Analyses Physico –Chimique

La couche est réalisée à partir d'une poudre à base de Chrome, après analyses au MEB ; nous avons obtenus les résultats dans Tableau 4.4 et tableau 4.5.

Tableau 4.4: Le résultat au MEB et la composition chimique de la poudre à base de chrome.

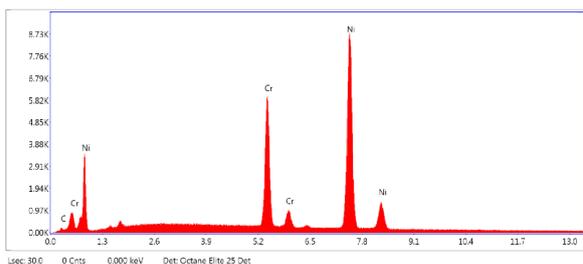
Microstructure en MEB (Poudre)



Analyse EDS dans la poudre

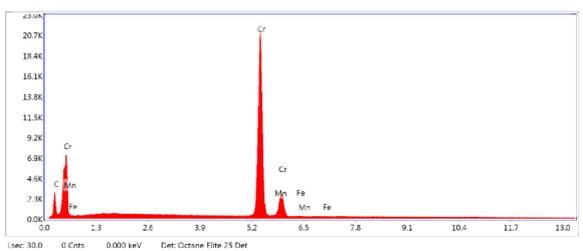
Proportion des éléments de la poudre

Spot 1



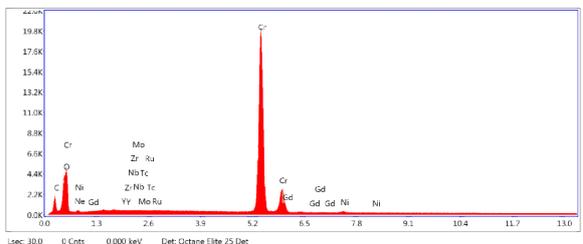
Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	2.86	12.27	14.64
CrK	22.09	21.89	2.74
NiK	75.04	65.84	2.24

Spot 2



Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	19.78	51.67	8.53
CrK	78.63	47.43	1.63
MnK	1.04	0.59	14.88
FeK	0.55	0.31	32.21

Spot 3



Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	11.85	35.73	9.25
O K	1.32	2.98	10.31
CrK	81.91	57.02	1.60
NiK	0.95	0.59	19.62

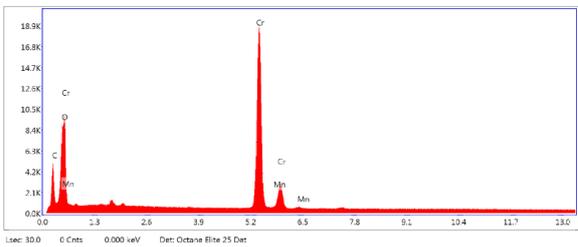
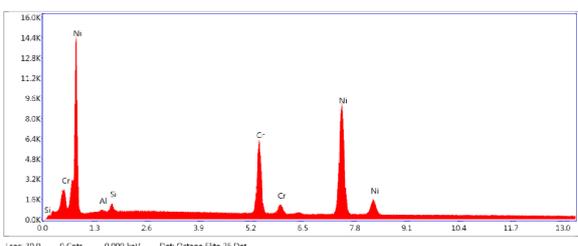
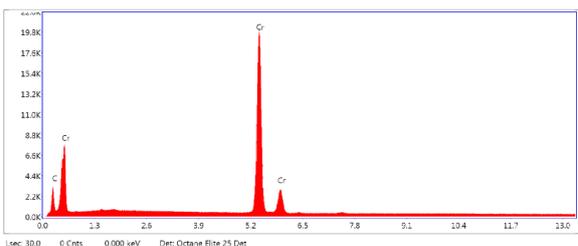
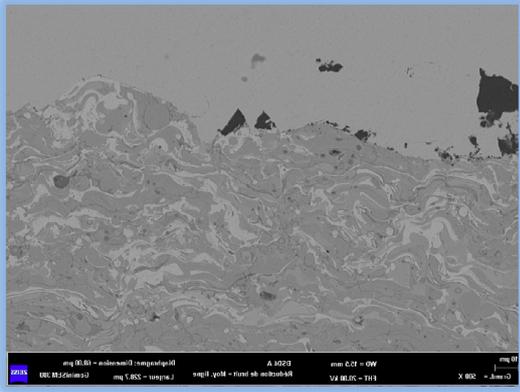
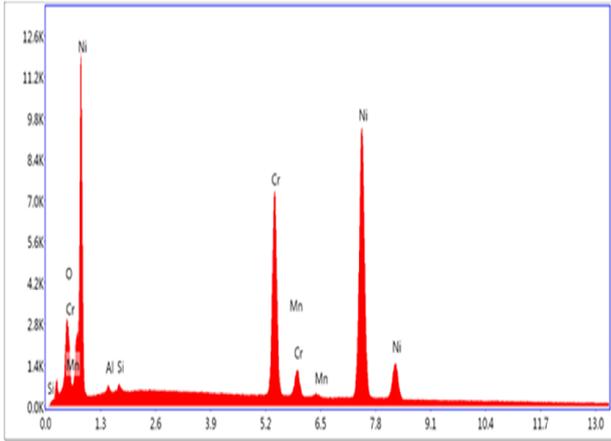
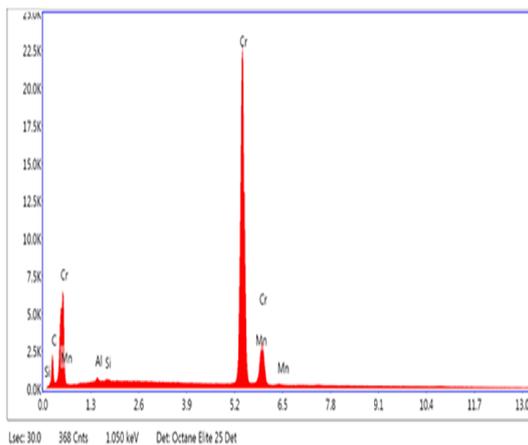
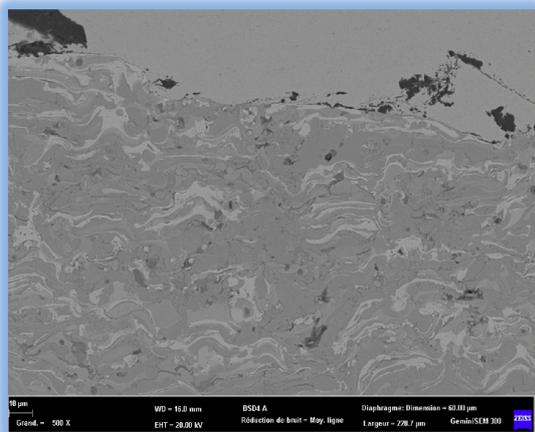
	Analyse EDS dans la poudre	Proportion des éléments de la poudre																				
Spot 4		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight %</th> <th>Atomic %</th> <th>Error %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C K</td> <td>31.03</td> <td>64.78</td> <td>7.91</td> </tr> <tr> <td>O K</td> <td>1.83</td> <td>2.88</td> <td>12.52</td> </tr> <tr> <td>CrK</td> <td>65.52</td> <td>31.60</td> <td>1.73</td> </tr> <tr> <td>MnK</td> <td>1.61</td> <td>0.74</td> <td>8.16</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Weight %	Atomic %	Error %	C K	31.03	64.78	7.91	O K	1.83	2.88	12.52	CrK	65.52	31.60	1.73	MnK	1.61	0.74	8.16
Element	Weight %	Atomic %	Error %																			
C K	31.03	64.78	7.91																			
O K	1.83	2.88	12.52																			
CrK	65.52	31.60	1.73																			
MnK	1.61	0.74	8.16																			
Spot 5		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight %</th> <th>Atomic %</th> <th>Error %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AlK</td> <td>1.13</td> <td>2.32</td> <td>14.20</td> </tr> <tr> <td>SiK</td> <td>1.63</td> <td>3.23</td> <td>10.11</td> </tr> <tr> <td>CrK</td> <td>21.25</td> <td>22.67</td> <td>2.94</td> </tr> <tr> <td>NiK</td> <td>75.98</td> <td>71.78</td> <td>2.32</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Weight %	Atomic %	Error %	AlK	1.13	2.32	14.20	SiK	1.63	3.23	10.11	CrK	21.25	22.67	2.94	NiK	75.98	71.78	2.32
Element	Weight %	Atomic %	Error %																			
AlK	1.13	2.32	14.20																			
SiK	1.63	3.23	10.11																			
CrK	21.25	22.67	2.94																			
NiK	75.98	71.78	2.32																			
Spot 6		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight %</th> <th>Atomic %</th> <th>Error %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C K</td> <td>22.31</td> <td>55.42</td> <td>8.42</td> </tr> <tr> <td>CrK</td> <td>77.69</td> <td>44.58</td> <td>1.67</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Weight %	Atomic %	Error %	C K	22.31	55.42	8.42	CrK	77.69	44.58	1.67								
Element	Weight %	Atomic %	Error %																			
C K	22.31	55.42	8.42																			
CrK	77.69	44.58	1.67																			

Tableau 4.5: Le résultat en MEB (rétrodiffusé) montre l'aspect morphologique du revêtement élaboré par APS.

	<p>Microstructure en MEB</p>	<p>Analyse EDS d'un point dans la couche.</p>																													
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Ar - Test # 1</p>																															
	<p>Proportion des éléments de la couche</p>																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight %</th> <th>Atomic %</th> <th>Error %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O K</td> <td>2.55</td> <td>8.38</td> <td>8.64</td> </tr> <tr> <td>AlK</td> <td>0.81</td> <td>1.58</td> <td>13.00</td> </tr> <tr> <td>SiK</td> <td>0.51</td> <td>0.95</td> <td>17.02</td> </tr> <tr> <td>CrK</td> <td>23.78</td> <td>24.10</td> <td>2.63</td> </tr> <tr> <td>MnK</td> <td>0.78</td> <td>0.75</td> <td>10.99</td> </tr> <tr> <td>NiK</td> <td>71.58</td> <td>64.24</td> <td>2.26</td> </tr> </tbody> </table>				Element	Weight %	Atomic %	Error %	O K	2.55	8.38	8.64	AlK	0.81	1.58	13.00	SiK	0.51	0.95	17.02	CrK	23.78	24.10	2.63	MnK	0.78	0.75	10.99	NiK	71.58	64.24	2.26
Element	Weight %	Atomic %	Error %																												
O K	2.55	8.38	8.64																												
AlK	0.81	1.58	13.00																												
SiK	0.51	0.95	17.02																												
CrK	23.78	24.10	2.63																												
MnK	0.78	0.75	10.99																												
NiK	71.58	64.24	2.26																												

Microstructure en MEB

Analyse EDS d'un point dans la couche.



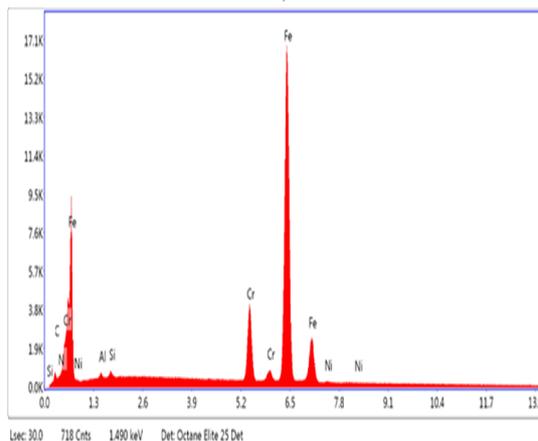
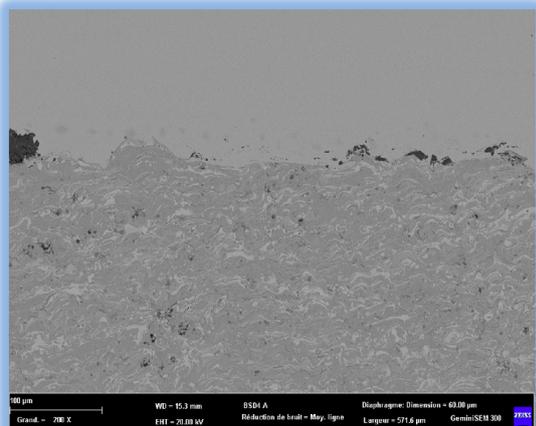
N₂ - Test # 2

Proportion des éléments de la couche

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	11.51	35.91	9.00
AlK	0.37	0.52	14.58
SiK	0.18	0.24	23.93
CrK	86.29	62.20	1.57
MnK	1.64	1.12	8.22

Microstructure en MEB

Analyse EDS d'un point dans la couche.



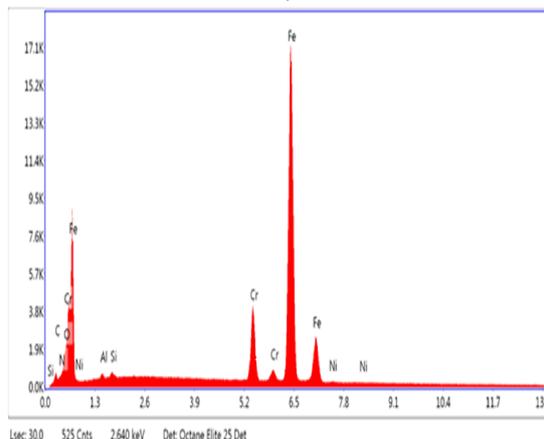
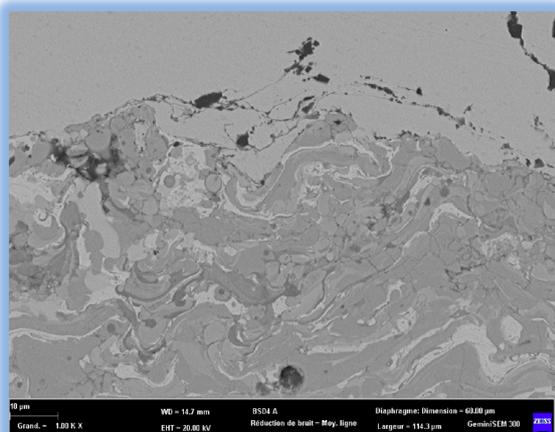
N₂ -Test # 3

Proportion des éléments de la couche

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	2.65	11.06	12.68
N K	0.15	0.55	64.85
AlK	0.39	0.72	16.62
SiK	0.38	0.68	15.92
CrK	9.96	9.58	3.80
FeK	85.68	76.75	1.88
NiK	0.79	0.67	18.80

Microstructure en MEB

Analyse EDS d'un point dans la couche.



N₂ - Test # 4

Proportion des éléments de la couche

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	2.08	8.68	14.23
N K	0.03	0.12	73.84
O K	0.95	2.99	10.54
AlK	0.25	0.46	24.74
SiK	0.29	0.52	17.85
CrK	9.62	9.28	3.89
FeK	86.65	77.85	1.88
NiK	0.12	0.10	58.46

Après analyses au MEB nous avons obtenus les résultats dans (tableau 4.5) la couche du revêtement c'est une couche réaliser à partir d'une poudre à base de chrome.

4.2.2 Test de Micro dureté

Les essais de dureté ont été à l'aide d'un appareil électronique type micro d'uromètre automatique (cf-chapitre 3) le dispositif permet d'avoir une mesure directe sur écran. La dureté a été mesurée sous une charge de 300g pendant 5s.

L'appareil utilise un pénétrateur en diamant, de forme d'une pyramide quadrangulaire droite à base carrée. L'angle forme par deux arêtes opposées est de 136°.

La distance entre deux mesures est de 0.10µm.

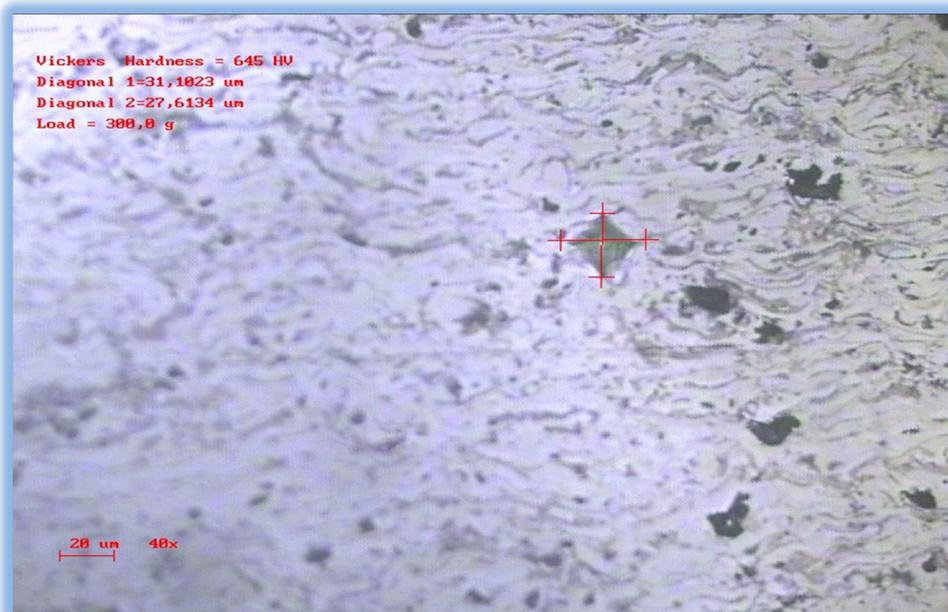


Figure 4.5 : La méthode de calcul de la micro dureté à l'aide de logiciel Easy analysis.

Le tableau suivant donne les résultats de la dureté obtenus pour différents tests sur l'échantillon.

Tableau 4.6 : Tableau des résultats de micro-dureté pour les deux gaz.

Test #	Samples #	Location #1 (Hv)	Location #2 (Hv)	Location #3 (Hv)	Location #4 (Hv)	Location #5 (Hv)	Moyenne/Ech (Hv)	Moyenne (Hv)
Ar - Test # 1	A#1	608	685	693	763	635	677	676
	A#2	693	640	673	655	629	658	
	A#3	690	687	720	700	680	695	

Test #	Samples #	Location #1 (Hv)	Location #2 (Hv)	Location #3 (Hv)	Location #4 (Hv)	Location #5 (Hv)	Moyenne/Ech (Hv)	Moyenne (Hv)
N ₂ -Test # 2	A#1	639	673	736	663	733	688	688
	A#2	653	666	730	678	730	691	
	A#3	680	650	719	678	698	685	

Test #	Samples #	Location #1 (Hv)	Location #2 (Hv)	Location #3 (Hv)	Location #4 (Hv)	Location #5 (Hv)	Moyenne/Ech (Hv)	Moyenne (Hv)
N ₂ -Test # 3	A#1	673	598	710	685	608	655	662
	A#2	663	644	707	650	697	672	
	A#3	680	620	690	606	699	659	

Test #	Samples #	Location #1 (Hv)	Location #2 (Hv)	Location #3 (Hv)	Location #4 (Hv)	Location #5 (Hv)	Moyenne/Ech (Hv)	Moyenne (Hv)
N ₂ -Test # 4	A#1	723	697	737	673	736	713	707
	A#2	673	707	690	687	689	690	
	A#3	693	682	725	703	787	718	

Les représentations graphiques qui suivent donnent l'évolution de la dureté en fonction des deux gaz pour les différents tests:

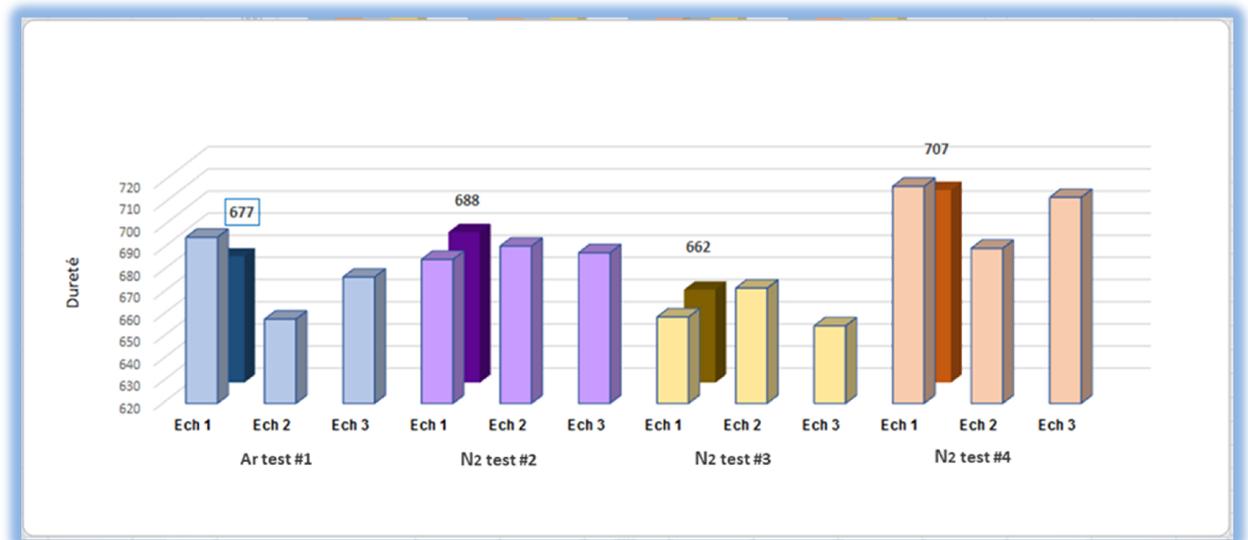
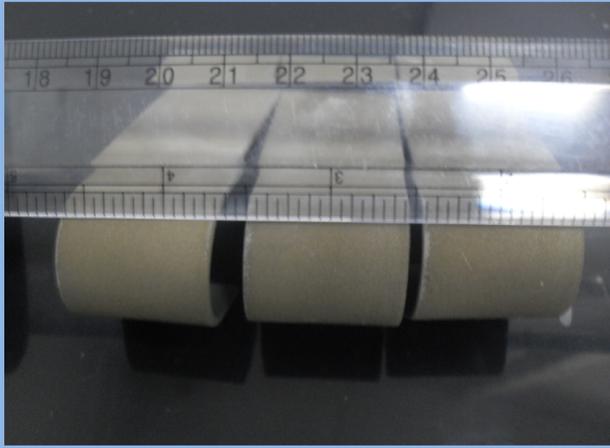


Figure 4.6 : Comparaison de la micro dureté des dépôts en fonction du changement de gaz de projection.

La **Figure 4.6** montre l'évolution de la micro dureté des dépôts en fonction de gaz de projection. La mesure de la micro dureté du dépôt donne les valeurs moyennes de 676Hv0.3 pour Ar, 688Hv0.3 Pour N₂ test 2 et 662Hv0.3 pour test 3 et tous ces résultats sont acceptables par l'exigence de GE, mais pour la valeur 707Hv0.3g correspondante à distance de projection de 100mm par N₂ on remarque que la dureté augmente avec l'augmentation de la distance de la projection thermique, cette augmentation de la dureté est probablement due à la présence des oxydes et les nitrures dans le dépôt obtenu après projection mais ce résultat est non accepté par GE.

4.2.3 Essai de pliage

La composition exacte de l'alliage est un compromis entre la meilleure résistance à l'oxydation et la meilleure résistance au décollement du dépôt, garantissant ainsi la plus grande durée de vie à la pièce [FRI95]. Les pièces revêtis sont exposé de haute température, cet essai nous permet. D'estimer l'écaillage de cette dernière par analogie au coefficient de dilatation (le substrat se dilate plus que céramique). On mesure les bords écaillés afin de les comparer aux normes spécifiques à l'entreprise.

<p>Ar-Test # 1</p>	 <p>A photograph of a cylindrical sample, likely a catalyst or reactor component, positioned horizontally. A ruler is placed above the sample for scale, showing markings from 18 to 26. The sample has a light-colored, textured surface and is supported by three black cylindrical stands. The image is framed with a blue border.</p>
<p>N₂-Test # 2</p>	 <p>A photograph of a cylindrical sample, similar to the one in the first image, positioned horizontally. The sample has a dark, textured surface and is supported by three black cylindrical stands. The image is framed with a blue border.</p>

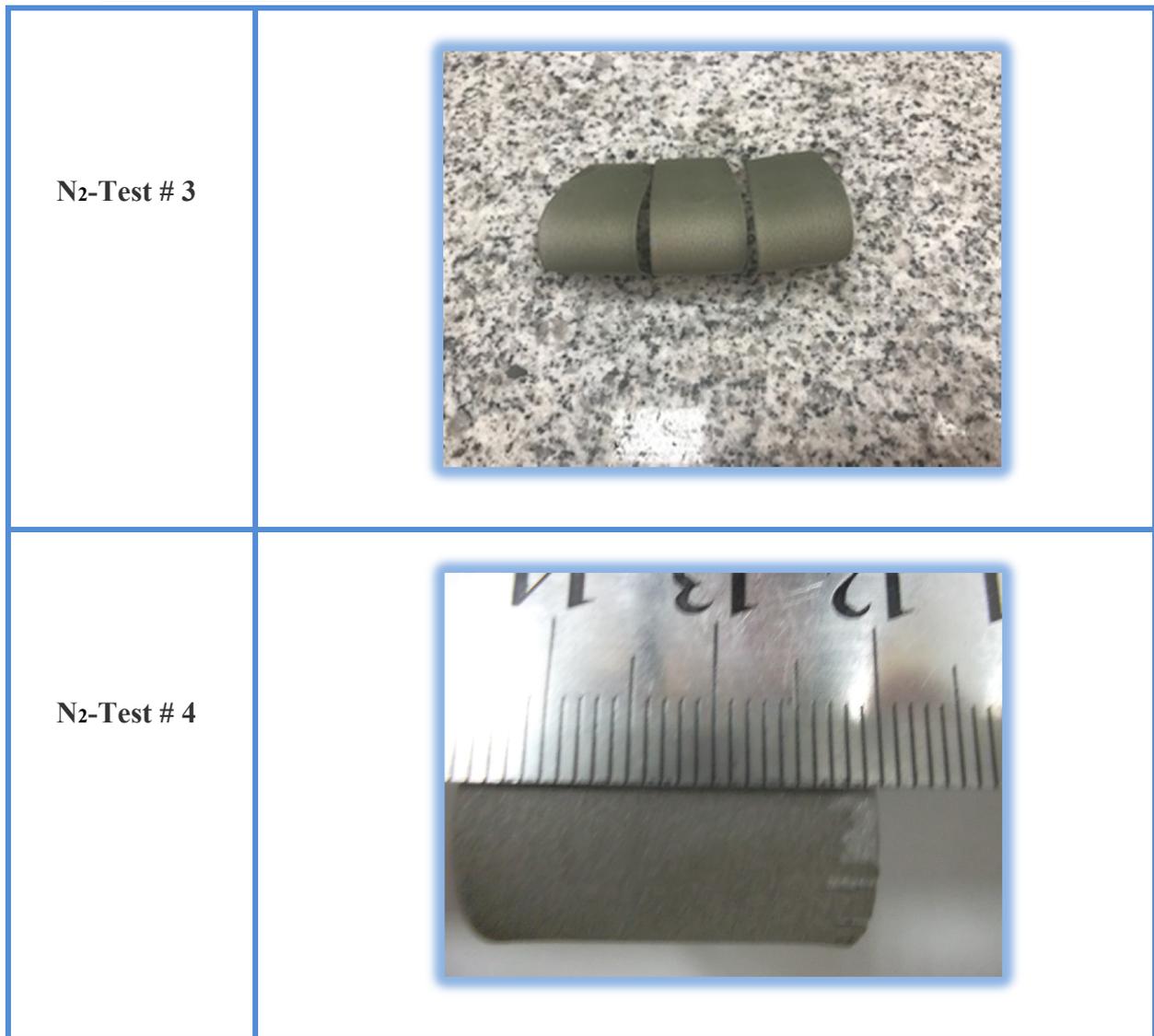


Figure 4.7 : Mesure de l'écaillage après test de pliage

Nous remarquons l'existence de l'écaillage dans tous les échantillons mais il est plus important dans la distance de la projection 100 mm (inacceptable).

Dans la distance 85 mm pour Ar et N₂ (test 2 ET test 3) l'écaillage est acceptable dans les exigences utiliser par **Algesco**.

4.2.4 Essai d'adhérence

➤ Il existe plusieurs tests déterminé l'adhérence d'un dépôt, entre le test de flexion à tris et quatre points, le test de rayure et de l'indentation. Bien que ces tests ne constituent que des essais comparatifs et dont l'interprétation des résultats est délicate [12].

Dans notre cas, nous avons utilisé le test d'arrachement réalisé sur une machine de traction. Notre choix (Utilise à Algesco) est basé sur :

➤ Un certain nombre de normes ont été établie pour la réalisation des tests d'arrachement (adhérence). Ces normes sont Européennes (**EN582**), Américaine (**ASTMC633**) [4].

Quatre éprouvettes ont été réalisées pour l'essai de traction.

-Une éprouvette avec uniquement de la colle. Afin de vérifier que la colle en elle-même présente une résistance suffisante tel qu'elle est présentée par le fabricant jusqu'à 70MPa.

-Trois éprouvettes avec dépôt substrat/couche.

Les éprouvettes utilisées sont de forme cylindrique, d'un diamètre de 25mm et d'une section de 490.62mm² répondant à la norme ASTM C633.

Pour chaque essai, nous obtenons l'effort maximal pour lequel nous calculons la contrainte maximale nécessaire pour rompre cette éprouvette, cette contrainte est donnée par le rapport :

$$\sigma_{max} = F/S$$

Les test de traction est effectué au niveau de **Credeg**, un laboratoire métallurgique de **Sonelgaz** , Pour ce type de test de traction , **Credeg** détient une machine de traction équipée d'un capteur de force interchangeable, fixé sur la traverse mobile, d'un capteur de

déplacement, de deux attaches(mors) mobiles idéalement auto-serrantes pour réaliser un essai de traction et d'un enregistreur graphique et numérique .

Un extensomètre mesure l'allongement de l'éprouvette et un dynamomètre mesure l'effort de traction applique. Le résultat est visualisé sur un écran via un système d'acquisition de données.

Les résultats sont représentés tels qu'ils sont fournis par **Credeg**. Les courbes présentées ci-dessous montrent l'évolution de la charge de traction F appliquée sur les éprouvettes jusqu'à l'arrachement de revêtement.

Les résultats des tests effectués sont présentés dans les (tableaux) ci-dessous, donnant la force maximale, contrainte et le type de rupture en fonction des dimensions des éprouvettes et la vitesse d'essai.

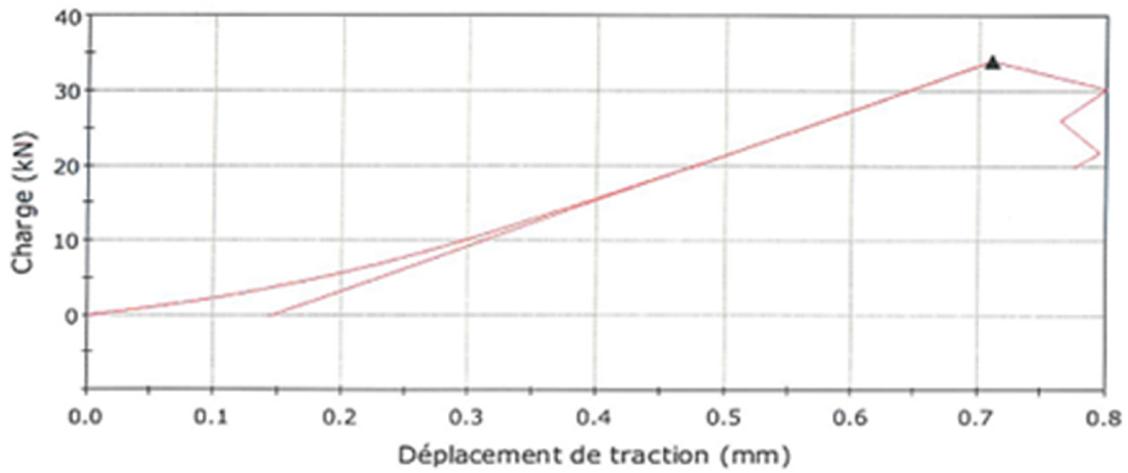
Les résultats du test de traction fournis par Credeg (Sonelgaz) :

Tableau 4.7: Résultats du test de traction:

Identification des échantillons	
Test/Inspection	Adhesion Test
N°des échantillons	3 échantillons / test
Type adhesive	FM1000 film adhesive
Dimension	Ø 25X6mm

Ar-Test # 1

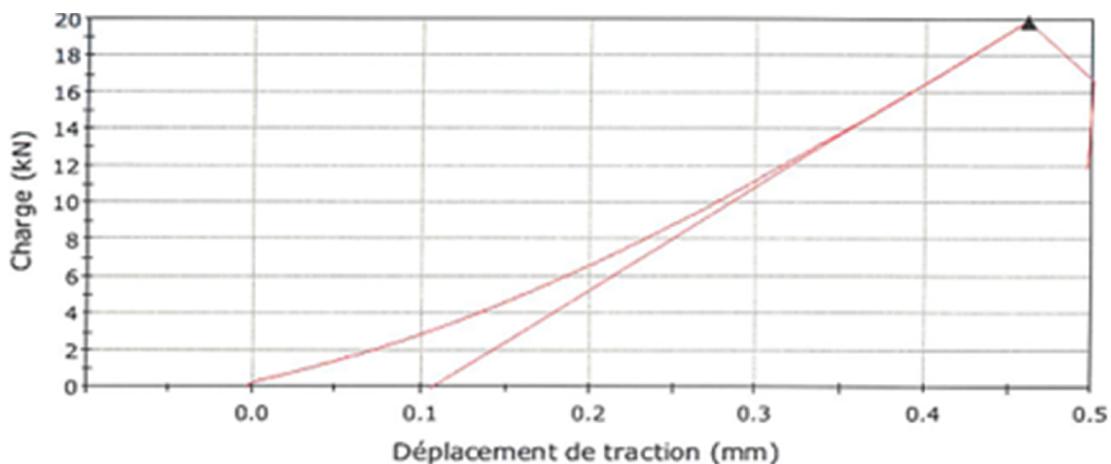
Test de glue



Eprouvette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai	Rupture		Observations
	Diamètre D_0 (mm)	Section S_0 (mm ²)	mm/min	F_M (KN)	R_m (Mpa)	
Test de glue	25	490.62	1	34.04	69.35	-

Ar-Test # 1

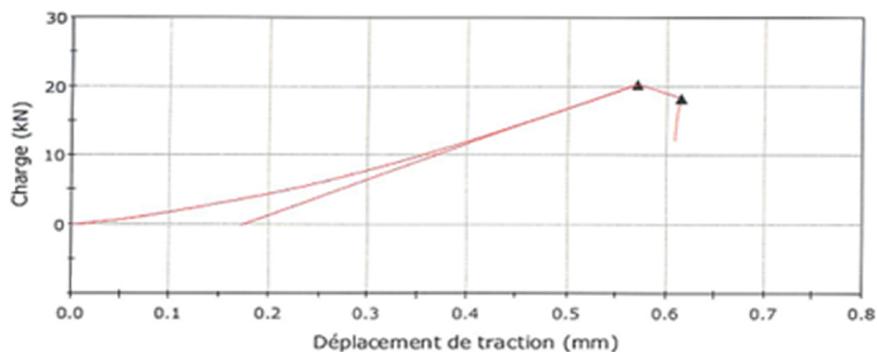
Echantillon E#1



Eprouvette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai mm/min	Rupture		Observations
	Diamètre D ₀ (mm)	Section S ₀ (mm ²)		F _M (KN)	R _m (Mpa)	
E#1	25	490.62	1	19.86	40.46	Fracture entre la colle et la surface supérieure revêtue,

Ar-Test # 1

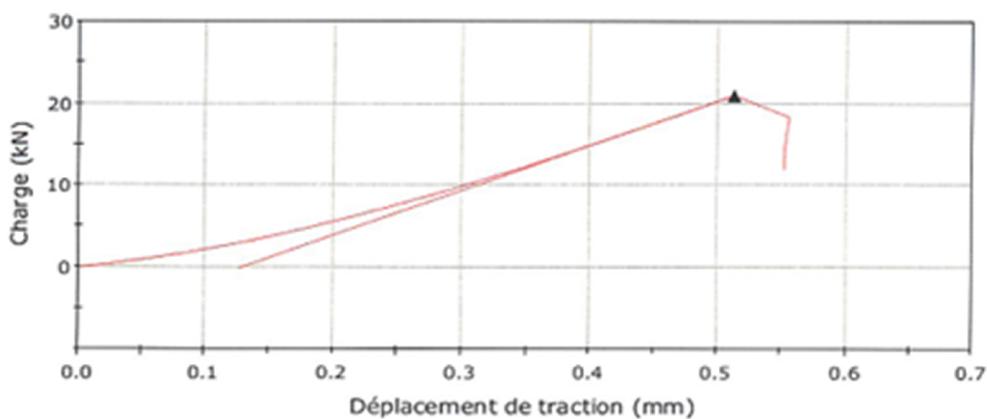
Echantillon E#2



Eprouvette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai mm/min	Rupture		Observations
	Diamètre D_0 (mm)	Section S_0 (mm ²)		F_M (KN)	R_m (Mpa)	
E#2	25	490.62	1	20.31	41.37	Fracture entre la colle et la surface supérieure revêtue,

Ar-Test # 1

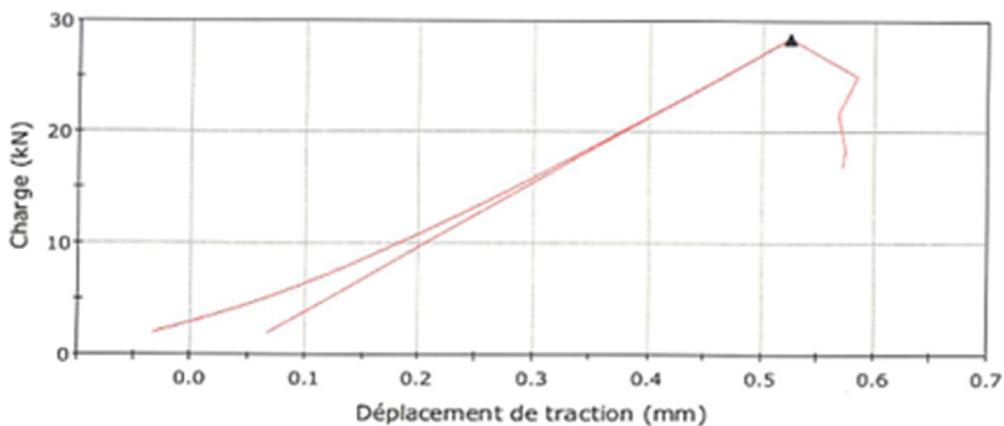
Echantillon E#3



Eprouvette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai mm/min	Rupture		Observations
	Diamètre D_0 (mm)	Section S_0 (mm ²)		F_M (KN)	R_m (Mpa)	
E#3	25	490.62	1	20.31	41.37	Fracture entre la colle et la surface supérieure revêtue,

N₂-Test # 2

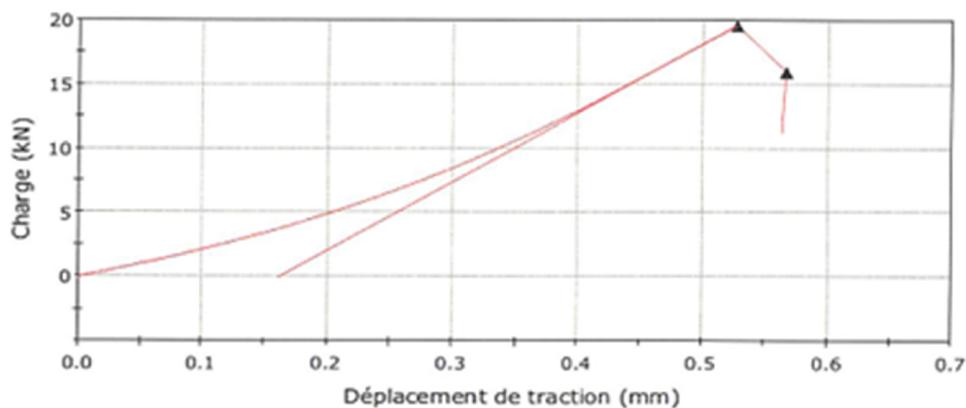
Test de glue



Eprouvette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai mm/min	Rupture		Observations
	Diamètre D ₀ (mm)	Section S ₀ (mm ²)		F _M (KN)	R _m (Mpa)	
Test de glue	25	490.62	1	28.42	57.89	-

N2-Test # 2

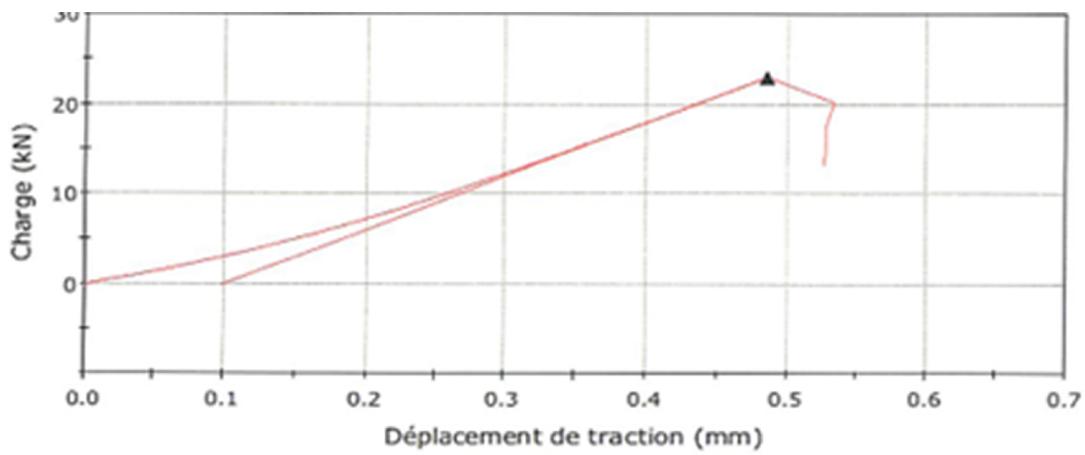
Echantillon E#1



Eprouvett e N°	Dimension épreuvette (mm)		Vitesse d'essai mm/min	Rupture		Observations
	Diamètre D ₀ (mm\$)	Section S ₀ (mm ²)		F _M (KN)	R _m (Mpa)	
E#1	25	490.62	1	19.56	39.86	Fracture entre la colle et la surface supérieure revêtue,

N₂-Test # 2

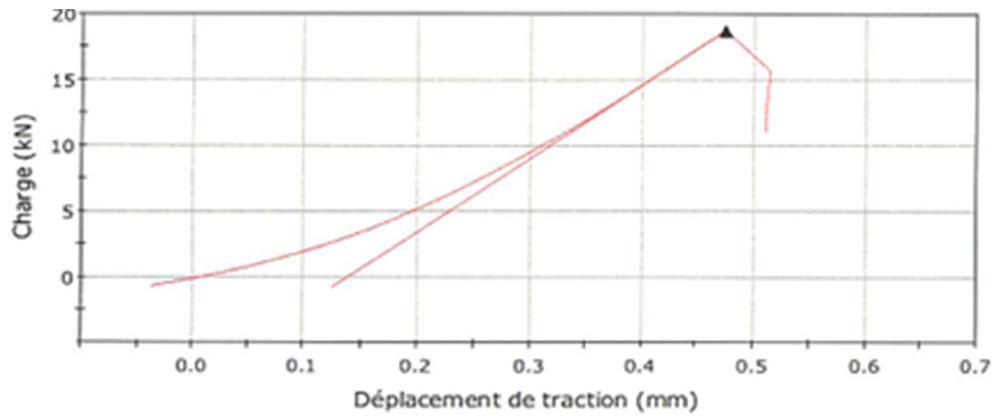
Echantillon E#2



Eprouvette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai mm/min	Rupture		Observations
	Diamètre D ₀ (mm)	Section S ₀ (mm ²)		F _M (KN)	R _m (Mpa)	
E#2	25	490.62	1	22.98	46.81	Fracture entre la colle et la surface inférieure revêtue,

N₂-Test # 2

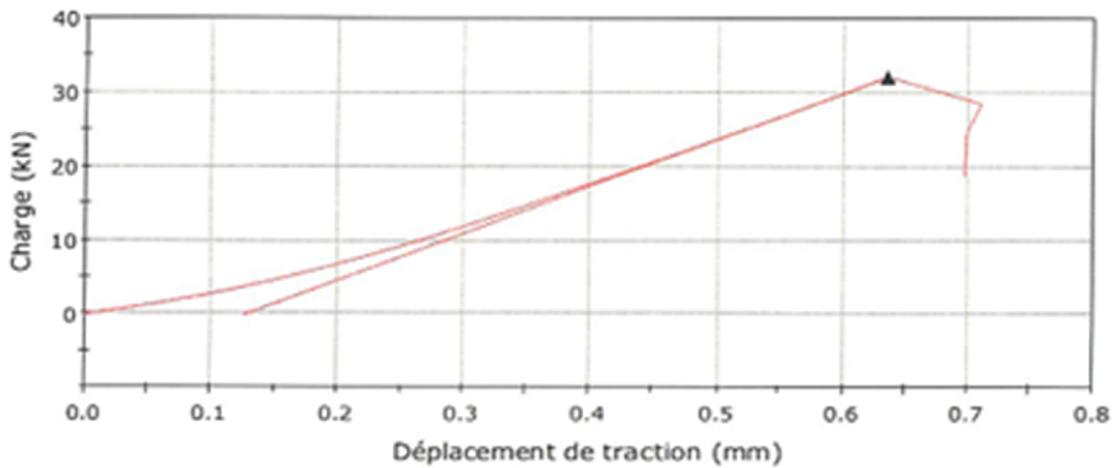
Echantillon E#3



Eprouvette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai	Rupture		Observations
	Diamètre D_0 (mm)	Section S_0 (mm ²)	mm/min	F_M (KN)	R_m (Mpa)	
E#3	25	490.62	1	18.73	38.16	Fracture entre la colle et la surface supérieure revêtue,

N₂-Test # 3

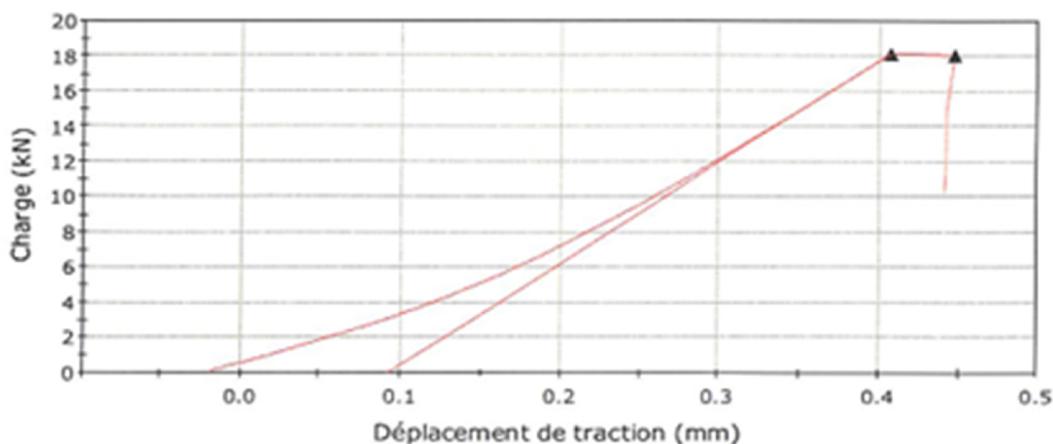
Test de glue



Eprouvette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai mm/mi n	Rupture		Observations
	Diamètre (mm)	D ₀ Section S ₀ (mm ²)		F _M (KN)	R _m (Mpa)	
Test de glue	25	490.62	1	32.09	65.38	-

N₂-Test # 3

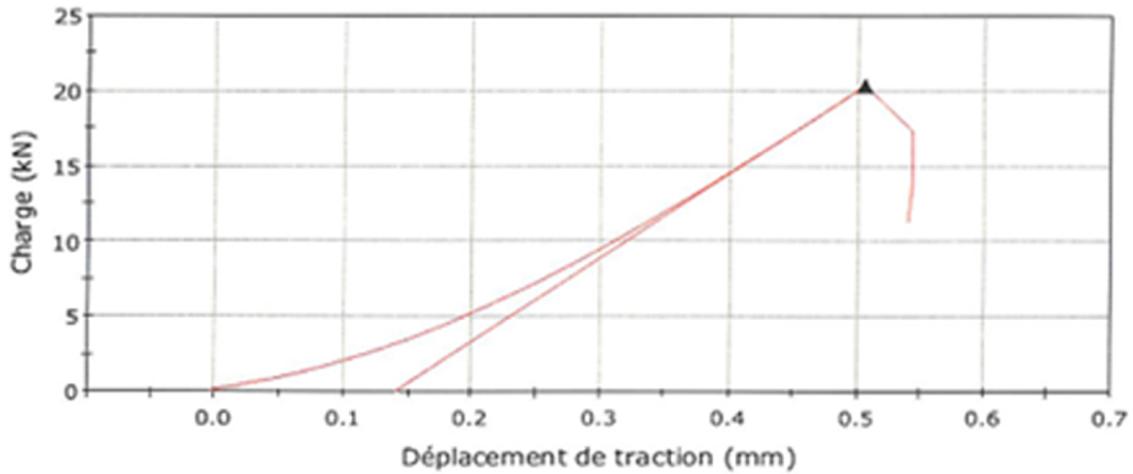
Echantillon E#1



Eprovette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai mm/min	Rupture		Observations
	Diamètre D ₀ (mm)	Section S ₀ (mm ²)		F _M (KN)	R _m (Mpa)	
E#1	25	490.62	1	18.17	37.01	Fracture entre la colle et la surface supérieure revêtue,

N₂-Test # 3

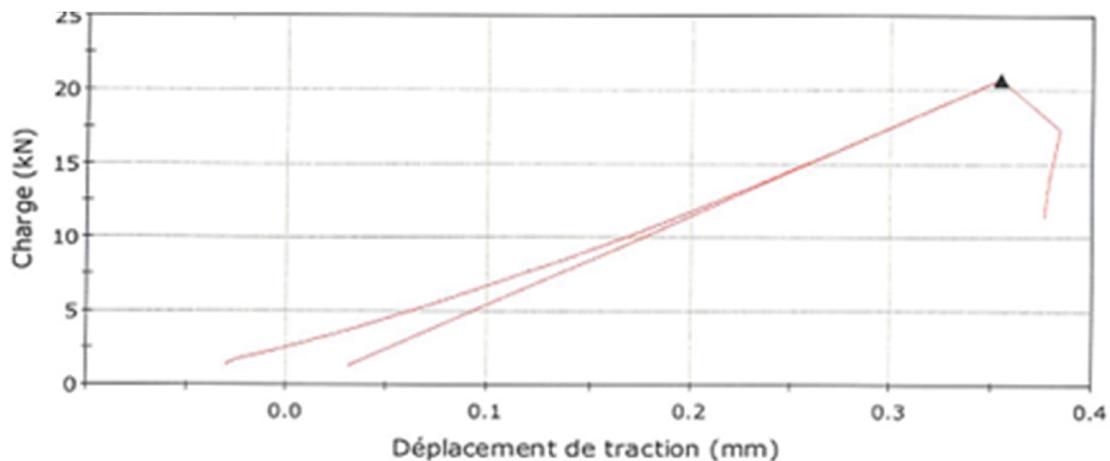
Echantillon E#2



Eprouvett e N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai mm/min	Rupture		Observations
	Diamètre D ₀ (mm)	Section S ₀ (mm ²)		F _M (KN)	R _m (Mpa)	
E#2	25	490.62	1	20.39	41.55	Fracture entre la colle et la surface supérieure revêtue,

N₂-Test # 3

Echantillon E#3



Eprouvette N°	Dimension éprouvette (mm)		Vitesse d'essai mm/min	Rupture		Observations
	Diamètre D ₀ (mm)	Section S ₀ (mm ²)		F _M (KN)	R _m (Mpa)	
E#3	25	490.62	1	20.74	42.25	Fracture entre la colle et la surface supérieure revêtue,

Tableau 4.8 : Les résultats du test de traction fournit per Credeg (Sonelgaz)

Force de liaison des spécimens revêtus par Ar-Test # 1				
Echantillon ID	E#1	E#2	E#3	Moyenne
Valeur de force de liaison	40.46Mpa	41.37Mpa	42.72Mpa	41.51Mpa

Force de liaison des spécimens revêtus par N ₂ -Test # 2				
Echantillon ID	E#1	E#2	E#3	Moyenne
Valeur de force de liaison	39.86 MPa	46.81 MPa	38.16 MPa	41.61MPa

Force de liaison des spécimens revêtus par N ₂ -Test # 3				
Echantillon ID	E#1	E#2	E#3	Moyenne
Valeur de force de liaison	37.01 MPa	41.55 MPa	42.25 MPa	40.27 MPa

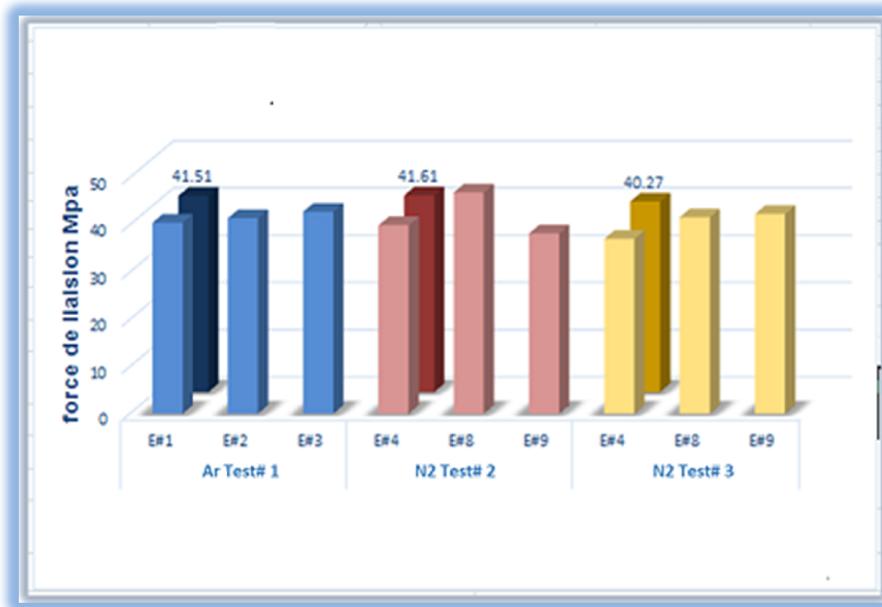


Figure 4.8: Comparaison entre la force de liaison Mpa en fonction du changement de gaz de projection.

Pour les tests de la colle, une force d'adhérence 69.35MPa, 57.89 MPa et 65.38 MPa. Ces forces sont les forces nécessaires pour enlever la colle- FM1000 – de la surface des éprouvettes D'autre part, on a noté des valeurs moyenne de la contrainte superficielle de revêtements qui sont : 41.51 MPa pour la projection avec **Ar-Test # 1** et la valeur moyenne 41.61 MPa pour la projection **N2-Test # 2** et même pour **N2-Test # 3** de la valeur 40.27 MPa ces valeurs sont bien conformes aux exigences et aux normes de **GE**, ce qui montre que le revêtement est réussi et accepté par le laboratoire d'**Algesco**.

D'autre part, nous avons constaté que les résultats du test de traction de la distance de pulvérisation à 100 mm **N2-Test # 4** est non conforme aux exigences et aux normes de **GE** ce qui montre que le résultat inacceptable par le laboratoire d'**Algesco**.

Conclusion générale

A la lumière de notre étude sur la projection thermique par plasma APS, utilisant deux gaz différents et faisant l'objet des tests mécaniques (Traction, dureté, pliage), et microscopiques sur quatre types d'éprouvettes.

Nous pouvons conclure que les résultats obtenus décrits ci-dessous sont probants et motivants pour d'éventuels projet d'étude:

- Observation des porosités et des oxydes dans la projection par (Ar et N₂), lesquels sont proportionnels à la distance de projection. Ce phénomène est confirmé par le test (N₂-test # 4) où la distance est la plus importante (100 mm). Toutefois, ces résultats sont toujours dans l'intervalle d'acceptation selon les normes GE.
- Les valeurs de dureté sont acceptables dans la projection par l'Argon et l'Azote (test #2 et #3). Sachant que, dans le cas (N₂-test # 4), cette valeur de dureté augmente avec l'augmentation de la distance de projection, justifiée par la présence des oxydes et les nitrures. Ce dernier résultat ne répond pas aux exigences d'ALGESCO.
- L'écaillage est présent dans tous les échantillons, dans le cas de projection par Ar ou N₂ (Test # 2 et #3). Il est acceptable par le laboratoire d'ALGESCO. Cependant, il est plus important à une distance de projection de 100 mm (test #4), ce résultat ne répond pas aux exigences de GE.
- N'ayant pas obtenu des résultats acceptables pour le cas (N₂-test # 4), comme indiqué dans les deux (02) points sus-cités, le test de traction pour ce cas n'a pas été appliqué. Les échantillons des autres tests (Argon et l'Azote test #2 et #3) sont acceptables selon les normes de GE.

Les résultats obtenus dans le cadre de notre étude se sont avérés satisfaisants, et valident la substitution du gaz utilisé Argon (Ar) par l'Azote (N₂). Cette substitution offre un gain économique significatif estimé à **dix millions** de dinars algérien par an.

Références bibliographies

[1]. S. Nourouzi, « Contribution à l'étude du procordé Arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasifs », thèse doctorale n°49-2004, université de limoges.

[2]. M.Bendjedi, « Etude de la corrosion d'un acier inoxydable réalisé par projection thermique », mémoire de fin d'étude 2006.

[3]. D.Djeziri, « Comportement électrochimique d'un dépôt en acier inoxydable réalisé par projection thermique », thèse de Magister, Ecole national polytechnique, Juin 2007.

[4]. M. Elbesseghi, « Elaboration et caractérisation des multi-matériaux projeté thermiquement à base d'alliage d'aluminium », mémoire de fin d'étude Ecole national polytechnique, Juin 2007.

[5]. A. Kellai, « Etude de la bio corrosion dans un milieu marin (Bejaia et Boumerdes) », mémoire de fin d'étude, Ecole national polytechnique, Juin 2006.

[6]. G. England « Nature of thermal spray coating». (Journée scientifique, ONERA 2003).

[7]. M. Guillaume « Modélisation de l'essai d'indentation interfaciale et confrontation aux essais normalisés pour la détermination de l'adhérence de revêtements obtenus par projection thermique » thèse doctorale n°4093, université de LILLE 1 p 21, 23, 30, 31.

[8]. M.F.Benettouil, « Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc », thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Limoges, Thèse N° 8,2008.

[9]. L. Pawlowski, « Dépôts physique techniques, microstructures et propriétés », Ed ppur 2003

[10]. [Http:// fr. Wikipedia .org/wiki/projection_ thermique](http://fr.wikipedia.org/wiki/projection_thermique)

[11]. A. Proner, « Revêtements par projection thermique», techniques de l'ingénieur 1645, 1999.

[12]. A. Proner, « Revêtement par projection thermique », technique de l'ingénieur, 1645,2005.

[13]. M .Guillaume « Modélisation de l'essai d'indentation interfaciale et confortation aux essais normalisés pour la détermination de l'adhérence de revêtements obtenus par projection thermique » thèse doctorale n° 4093, université de LILLE I P 21, 23, 30, 31 2006.

[14]. <http://www.advanced-coating.com/projection-plasma.htm>

[15]. S. Valette « Influence de la peroxydation d'un acier sur l'adhérence de son revêtement en alumine déposé par voie plasma thermique » thèse pour le grade de docteur de l'université de Limoges thèse N°50,2004.

[16]. L. Holloman, « ceramic-coated components for the combustion zone of natural gas engines », journal of thermal spray technology 1(1),1992,27-31.

[17]. T. Aurelien « Barrières thermiques fissures verticalement par projection plasma pour applications aéronautiques : Compréhension des phénomènes, réalisation et caractérisation des dépôts». Thèse doctorat de l'université de LIMOGES n°52- 2005,19octobre2005 p.23, 81, 83,85.

[18]. Thermal_Spray_materials_guide_022007 Diamalloy4060 NS.

[19]. L. Bianchi, « Projection par plasma d'arc et plasma inductif de dépôts céramiques mécanismes de formation de la première couche et relation avec les propriétés mécaniques des dépôts », Thèse de l'université de limoges, 1995.

[20]. G. Espié, « Oxydation de particules de fer dans plasma d'arc Ar-H2, influence sur les propriétés du dépôt», thèse de doctorat, procédés céramiques et traitements de surface, université de limoges, 2000.

ANNEX 1**1.1 PROPRIETER DU SUPERLLIGE HX**

Usinabilité : L'alliage X est usinable par des méthodes conventionnelles est similaire à l'usinage des aciers austénitiques inoxydables (série 300).

Soudage : Se fait facilement par des procédés classiques tels que le soudage à l'arc métallique, MIG ou TIG le métal d'apport doit être utilisé. Le préchauffage et / ou post-chauffage ne sont pas obligatoire.

Traitement thermique : L'alliage est généralement livré à l'état recuit. Il est chauffé à 2150° F et refroidi rapidement.

Vieillessement : L'alliage peut être vieilli, après le traitement de mise en solution, à des températures de 1200 à 1600°F. Le vieillessement se traduira par une légère augmentation de la résistance et la dureté.

Durcissement : Durci par le formage à froid et un peu par le vieillessement. Cet alliage n'est pas durci sable par chauffage classique avec une tempe comme les aciers au carbone.

ANNEX 2

Résultat des tests sur l'échantillon d'étalonnage du Micro dureté :

Tableau 2.1 : Valeurs obtenu sur le bloc d'étalonnage

HV0.3	1	2	3	4	5
Résultat du substrat	503	511.3	501	512	501.8

Tableau 2.2 : Comparatifs des résultats du laboratoire et ceux du certificat conformité

HV 0.3	Résultat Du laboratoire	Valeurs Du certificat
MIN	501	506.3
MAX	512	514.7
MOY	505.8	511.9

ANNEX 3

MODULE PrgMove_Collar

```

!*****
!***** Algesco *****
!*****
!
! ----- MODULE SPECIFICATION -----
! PROJECT: ....
! Comm. No.: 4.....
! VERSION: V 1.1
! AUTHOR  : Ahmed.HAMRIT
!
! ----- DESCRIPTION -----
!
! This program module is written to define all process
! Variables (Recipes, surface speed, passes...), movements
! Related to the Part Program
!
! The module contains the following routines:
! - rPath xxx

```

! - rHeader

! - rVar

! - rHomePos()

! - rSprayParkPos

! - rStartPos

! - rInterruptPos

!*****

```

CONST      robtarget      pSprayPark:=[[2293.98,-463.21,1462.90],[0.49476,-
0.516368,0.484652,-0.503675],[-1,-1,1,0],[-
0.0210701,21.9886,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

```

CONST robtarget pHome:=[[1229.77,-328.74,1241.55],[0.507862,-0.506864,0.470841,-
0.513297],[-1,-1,1,0],[-0.019239,21.2542,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

```

CONST robtarget pInterrupt:=[[769.83,-154.99,1509.85],[0.476255,-0.544089,0.495192,-
0.481595],[-1,-1,-3,0],[0.789172,3.6219,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

```

CONST robtarget pAbs0:=[[1272.24,3.39,1565.05],[0.707733,-0.00397599,0.706466,-
0.00203917],[0,-1,0,1],[390.083,-0.369287,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

```

CONST robtarget pStart := [[2293.98,-463.21,1462.90],[0.49476,-0.516369,0.484652,-
0.503675],[-1,-1,1,0],[-0.0210701,21.9886,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

```

CONST robtarget p10:=[[2331.22,1.33,1181.65],[0.0204972,0.999533,0.0110025,-
0.0198212],[0,-1,1,0],[1932.97,21.9886,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

```

CONST robtarget p20:=[[2340.11,0.25,1157.14],[0.0206232,0.998971,0.0104522,-
0.0390086],[0,-1,1,0],[436.476,21.9886,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

```

CONST robtarget p30:=[[2346.54,0.25,1132.40],[0.0206238,0.998971,0.0104504,-
0.0390097],[0,-1,1,0],[436.452,21.9886,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

```

CONST      robtarget      p40:=[[355.01,-6.16,-901.60],[0.495656,0.511239,0.51326,-
0.479087],[-1,0,0,0],[499.242,31.074,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];

```

!*****

PROC rPath1()

MoveJ p10, v300, z1, t_9MB_100;

MoveL p20, vProcess, z1, t_9MB_100;

MoveL p30, vProcess, z1, t_9MB_100;

MoveL p20, vProcess, z1, t_9MB_100;

MoveL p10, v300, z1, t_9MB_100;

ENDPROC

```
PROC rPath2()
  MoveJ pHome, v100, z10, t_Home;
  MoveL pSprayPark, v100, z10, t_SafePos;
ENDPROC
```

```
PROC routine000()
  MoveAbsJ [[0,0,0,0,0,0],[0,0,0,9E+09,9E+09,9E+09]]\NoEOffs,v100,fine,tool0;
ENDPROC
```

```
PROC rSprayParkPos()
  TPErase;
  TPWrite sMsgTextArray{93};
  MoveJ pSprayPark, v1000, z10, t_SafePos;
  TPErase;
ENDPROC
```

```
PROC rStartPos()
  TPErase;
  TPWrite sMsgTextArray{95};
  MoveJ pStart, v1000, z10, t_SafePos;
  TPErase;
ENDPROC
```

```
PROC rInterruptPos()
  TPErase;
  TPWrite sMsgTextArray{96};
  MoveL pInterrupt, v100, z10, t_SafePos;
  TPErase;
ENDPROC
```

```
PROC rTeachPos()
  ! This Routine is written to teach position
  ! No call from a program
  MoveJ p10, v200, z10, t_Tool;
  MoveJ p20, v200, z10, t_Tool;
```

```
! pSpraypark is the position to spray in the Exhaust
MoveJ pSprayPark, v200, z10, t_SafePos;
! Phome is the position, home where you have access to the workpiece,
! UnLoad/ Load Position
MoveJ pHome, v200, z10, t_Home;
! PStart is the Position very close to the position of the Workpiece
MoveJ pStart, v200, z10, t_SafePos;
! Interrupt Position
MoveJ pInterrupt, v200, z10, t_SafePos;
! Tool Calibration Position
!MoveJ pVerifyToolPos9MB, v200, z10, t_Tool;
ENDPROC
```

```
PROC rVar()
!Accset Coatprocess
nACC_P2:=100;
!Rampset Coatprocess
nRamp_P2:=100;
!Recipe
nRecipe_h:=63;
! Plasma Recipe Heat
nRecipe_b:=63;
! Plasma Recipe Bond Coat
nRecipe_t:=63;
! Plasma Recipe Top Coat
!Rotation
nRot_h:=150;
! Speed RPM Turntable Plasma Heat
nRot_b:=150;
! Speed RPM Turntable Plasma Bond Coat
nRot_t:=150;
! Speed RPM Turntable Plasma Top Coat
nRot_c:=40;
! Speed RPM Turntable Cooling
nPath_h:=1;
! Motion Path Heat
```

nPath_b:=1;
! Motion Path Bond Coat
nPath_t:=1;
! Motion Path Top Coat
! Spraydistance
nSpray_h:=100;
! Spay distance Plasma Heat
nSpray_b:=85;
! Spay distance Plasma Bond Coat
nSpray_t:=85;
! Spay distance Plasma Top Coat
! Velocity
nVelo_h:=20;
! Velocity Plasma Heat
nVelo_b:=15;
! Velocity Plasma Bond Coat
nVelo_t:=15;
! Velocity Plasma Top Coat
! Cooling
nCooling:=10;
! Cooling TIME in Seconds after Process
!Gun and Process
nGun:=2;
!1= F4-MB, 2=9MB, 3=3MB, 4=11MB, 5=F1 , 6=F210, 7= Triplex, 8=F4-HBS
!21= DJ2600,22=WokaStar,23=G-Gun, 24=JP5000, 25=WokaJet410
!31= 6P-II, 32=EGD-K
!41= SmartArc, 42=OSU Arc, 43=XXX
nProcess:=1;
!1=Plasma, 2=HVOF, 3=Flame, 4=Arc, 9=Test Acceptance
nHeat:=0;
! Heat passes in numbers
nBond:=0;
! bond Coat passes in numbers
nTop:=10;
! Top Coat passes in numbers (5bond +5)
nInspection:=2;

! Inspection requested! Can only be used for Bond OR Topcoat
nReport:=0;
!0= without report, 1= with report
!bUseAccura:=TRUE;
!TRUE = Robot moves to Accura position
!FALSE= Accura spray not used

ENDPROC

PROC rHeader()

rVar;
TPErase;
TPWrite "COMPONENT TYPE: Test";
TPWrite "COMPONENT DESCRIPTION: Test-Progr";
TPWrite "AUTHOR : Ahmed.HAMRIT ";
TPWrite "GUN TYPE : ";
TPWrite "SPRAY PROCESS: ... ";
TPWrite "REVISION V1.0/EH ";
WaitTime 4;
TPErase;
ENDPROC

ENDMODULE