République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia FARES de MÉDÉA
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Génie mécanique

Option : Ingénierie Des Matériaux et des surfaces

Mémoire

Étude de revêtement métal-céramiques SM8297 projete par arc-fil sur un substrat acier faiblement allié 42CrMo4

Présenté par :

Mr : BOUAICHA Hamza

Proposé et Dirigé par :

Dr : BENIMAM Samir

Année Universitaire 2022-2023

REMERCIEMENTS

Nous remercions Allah pour Sa générosité et exprimons notre reconnaissance pour nous avoir donné le courage et la force d'accomplir cette tâche.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude envers nos parents pour les sacrifices qu'ils ont consentis afin de nous permettre de poursuivre nos études.

En accomplissant humblement cette tâche, nous tenons à remercier notre superviseur, **M. Samir Benimam**, pour ses encouragements à notre égard.

Sans oublier notre enseignante, Mme **Rabhi Salma**, et Mme **Najat Bouhelal**, nous les remercions pour tous leurs précieux conseils.

Nous souhaitons également exprimer notre sincère gratitude à toute l'équipe du département de métallurgie et en particulier à M. **Lahmar** et Mme **Yamina Mebdoua**, qui nous ont accompagnés avec beaucoup de patience et de professionnalisme.

Nous demandons à tous nos enseignants en génie mécanique qui ont supervisé notre formation de trouver ici notre gratitude pour leur sérieux, la qualité de leurs cours et l'attention qu'ils ont portée à notre parcours à l'Université de Technologie "Yahia Farès" de Médéa.

Nous exprimons toute notre gratitude aux membres du comité d'évaluation qui superviseront notre travail. À tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement au développement de ce projet, nous vous remercions sincèrement.

DEDICACE

Avec l'aide de Dieu Tout-Puissant et l'amour de tous ceux qui m'aimaient et que j'aimais, j'ai été soutenu et j'ai pu mener à bien ce travail que je leur ai dédié :

Tout d'abord, je tiens à remercier mes chers parents qui tiennent une place importante dans mon cœur. Tu as toujours été là pour moi et tu n'as jamais cessé de me soutenir.

Je tiens également à remercier mes chers frères **Mohammed** et **Bilal** pour leur soutien continu tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos soi-disant désirs, et je vous remercie pour votre soutien inépuisable et votre présence constante à mes côtés.

A tous mes amis et collègues, en particulier mes chers amis **Yahia**, **Soufien**, **Lakhdar**, **Sabah** et **Abderrahim**, et à tous ceux qui m'ont aidé directement ou indirectement, je prie pour que Dieu vous garde et vous bénisse pour toujours, si Dieu le veut .

Projet de suivi d'un revêtement par projection thermique d'un acier faiblement allié 42CrMo4 par métal-céramiques

Résume :

Cette thèse présente le travail réalisé dans le cadre de projet de fin d'étude (PFE) effectué au sein de la centre de développement des technologie avancée située à baba hassan, Alger, Le stage s'est déroulé au sein de plateforme de la projection thermique. L'objectif de ce projet est de suivi d'un revêtement par projection thermique d'un acier faiblement allié 42CrMo4 par métal-céramiques.

Les points abordés comprennent :

- Élaboration des échantillons par projection thermique,
- La caractérisation mécanique (à travers l'essai de dureté).

L'étude expérimentale a été menée à travers les analyses suivantes:

- L'analyse de matériaux de base (42CrMo4),
- L'analyse de matériau de revêtement (SM 8297),
- L'analyse métallographique,
- En outre, Le Test de corrosion.

Nous avons fini par une interprétation des résultats obtenus.

Mots-clés : Projection thermique, Acier 42CrMo4, Arc fil, Grenaillage.

مشروع متابعة طلاء بالرش الحراري لسبائك فولاذية ضعيفة المزج (42CrMo4) بواسطة سيراميك معدني

ملخص العمل :

تقدم هذه الأطروحة العمل الذي تم تنفيذه في إطار مشروع نهاية الدراسة (PFE) المنفذ داخل مركز تطوير التكنولوجيات المتقدمة الموجود في بابا حسن ، الجزائر العاصمة ، وقد تم التدريب داخل منصة الرش الحراري. الهدف من هذا المشروع هو مراقبة الطلاء بالرش الحراري لسبائك فولاذية منخفضة 42CrMo4بواسطة السيراميك المعدني.

تشمل الموضوعات التي يتم تناولها ما يلي:

- تحضير العينات بالرش الحراري.
- التوصيف الميكانيكي (من خلال اختبار الصلابة).

أجريت الدراسة التجريبية من خلال التحليلات التالية:

- تحليل المواد الأساسية (42CrMo4) ،
- تحليل مواد الطلاء (SM 8297) ،
- تحليل المعادن ،
- بالإضافة إلى اختبار التآكل.

ننتهي بتفسير النتائج التي تم الحصول عليها.

الكلمات المفتاحية: الرش الحراري ، 42CrMo4، القوس السلكي ، السفع الرملي.

Follow-up project of a thermal spray coating of a 42CrMo4 low alloy steel bymetal-ceramics

Abstract:

This thesis presents the work carried out within the framework of the end-of-study project (PFE) carried out within the advanced technology development center located in baba hassan, Algiers, The internship took place within the projection platform thermal. The objective of this project is to monitor a coating by thermal spraying of a low alloy steel 42CrMo4 by metal-ceramics.

Topics covered include:

- Preparation of samples by thermal spraying,
- The mechanical characterization (through the hardness test).

The experimental study was conducted through the following analyses:

- Analysis of basic materials (42CrMo4),
- Coating material analysis (SM 8297),
- Metallographic analysis,
- In addition, The Corrosion Test.

We end with an interpretation of the obtained results.

Keywords: Thermal spraying, steel 42CrMo4, Wire arc, blast grinding.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciement……..... I
Dédicace……..….. II
Résumé……..... III
La liste des figures ……..…..…. VI
La liste des tableaux ……..…….…... V
Introduction générale……..…… 01

Chapitre I : Présentation de l'organisme d'accueil

I. Présentation de l'organisme d'accueil …….……..…….. 03
I.1 Présentation de la plateforme technologique de projection thermique……. 03
I.1.1 Mission…… 03
I.1.2 Les revêtement …… 04
I.1.3 Procédés Arc-fil …….……. 06
I.1.4 Procédé de Projection Plasma à Pression Atmosphérique (APS)……... 07
I.1.5 Test de corrosion dans un environnement salin……..…….. 08
I.1.6 Granulométrie des poudres……. 09
I.1.7 Sablage des surfaces nettoyage, rugosité et érosion……..…… 09
I.1.8 Equipements de la Plateforme de Projection Thermique……..…… 10

Chapitre II : Recherche bibliographique et l'état de l'art

II. Recherche bibliographique et l'état de l'art…… 11
II.1 Introduction…….…….. 11
II.2 Historique…….. 12
II.3 Les revêtements…….. 12
II.4 La projection thermique …….. 13
II.5 Techniques de projection thermique …..……. 15
II.5.1 Flamme…….. 15
II.5.2 Flamme supersonique……..… 16
II.5.2.1 HVOF…….…….……. 16
II.5.2.2 Canon a détonation…….…. 17
II.5.3 Projection à flamme-fil…….. 18

II.5.4 Projection à l'arc…… 20
II.5.4.1 Projection par plasma…….. 20
II.5.4.2 Projection à l'arc électrique…….…… 22
II.5.4.3 Principe de la projection Arc-fil…….…. 23
II.5.6 Fils fourrés…….…. 24
II.6 Formation et structure des dépôts……. 26
II.7 Préparation de surface ……. 27
II.7.1 La propreté …….. 28
II.7.2 La rugosité …… 28
II.7.3 Le préchauffage …….. 29
II.8 Caractéristiques des différentes techniques de la projection thermique……..... 29
II.9 Conclusion…….. 30

Chapitre III : Partie expérimentale

III. Partie expérimentale…….…….. 31
III.1 Introduction…….……. 31
III.2 Préparation des surfaces avant métallisation…….……... 31
III.2.1 Préparation de la surface…… …….……. 31
III.2.2 Présentation du sablage……..…… 31
III.2.3 Le sablage……. 32
III.2.4 Cabine de sablage……..…… 32
III.2.5 Préparation de la surface…… …….……. 34
III.2.6 Les modes de préparation…….……. 36
III.3 Projection par arc électrique…….…… 36
III.3.1 Avantages et inconvénients de la projection arc-fil…….……. 37
III.4 Le polissage……. 38
III.4.1 Le polissage grossier……..… 38
III.4.2 Le polissage de finition…….. 39
III.4.3 Analyse micrographique……..... 40
III.5 La corrosion……. 40

III.6 Essai de dureté…… 42
III.6.1 Objectifs de l'essai……. 42
III.6.2 Définition du principe de l'essai……. 42
III.6.3 Machines d'essai et éprouvettes……. 43

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1 Introduction…….……. 45
IV.2 Matériaux de l'étude…… 45
IV.2.1 Le matériau de revêtement……..... 45
IV.2.2 Le matériau de base (le substrat) ……... 45
IV.3 Techniques d'analyses……... 48
IV.3.1 Préparation métallographique……..……... 50
IV.4 Observations en microscopie optique des multi matériaux……..……. 53
IV.5. Interprétations des figures précédemment…… 56
IV.6 Test de corrosion……..……. 56
IV.6.1 Interprétation du résultat ……..…….. 60
IV.7 Essai de dureté Rockwell (HRC)…….. 60
IV.7.1 Expression des résultats ……... 62
IV.7.2 Interprétation…… 62
Conclusion générale……..……...…… 64
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES……..… VI

LA LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
	Chapitre I : Présentation de l'organisme d'accueil	
I.1	Représentation schématique de l'élaboration des dépôts	05
I.2	Les types des matériaux projetés.	05
I.3	Arc électrique utilisé dans notre travail.	06
I.4	Les pièces mécaniques avec des dépôts du procédé Arc-fil	06
I.5	Matériel de Projection Plasma existant au CDTA.	07
I.6	Cabine au brouillard salin	08
I.7	Cabinet de sablage	09
	Chapitre II : Recherche bibliographique et l'état de l'art	
II.1	Les principaux procédés de la projection thermique.	11
II.2	Place de la projection thermique dans les traitements de surface	13
II.3	Organigramme de la projection thermique	14
II.4	**P**rincipe de fonctionnement d'un pistolet flamme-poudre.	16
II.5	**P**rincipe de fonctionnement d'un pistolet HVOF.	17
II.6	Principe de fonctionnement d'un canon à détonation**.**	18
II.7	Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil	19
II.8	Pistolet de métallisation	20
II.9	Principe de la projection plasma.	21
II.10	La projection plasma à pression atmosphérique	22
II.11	Arc électrique entre deux fils consommables.	23
II.12	Principe d'un dispositif de projection à l'arc électrique	23
II.13	Matériaux utilisés dans la projection thermique	24
II.14	Principe du remplissage d'un fil fourré	25
II.15	Morphologies-type de dépôts obtenus avec des fils fourrés de Ni-TiB_2	26
II.16	Dépôt par projection thermique à la flamme.	27
II.17	Représentation schématique des contaminants d'une surface métallique.	28
	Chapitre III : Partie expérimentale	
III.1	cabine de sablage utilisé au cours de notre étude	33

III.2	Photographie de Compresseur utilisé au cours de notre étude.	33
III.3	Composants de la cabine de sablage	34
III.4	Appareil de mesure de la rugosité de surface	35
III.5	Schéma de principe de la projection à l'arc	37
III.6	Polisseuse utilisée au cours de notre étude	38
III.7	Papiers abrasifs (280, 400 et 1200) utilisé au cours de notre étude	39
III.8	Polisseuse de finition utilisé au cours de notre étude	39
III.9	Microscope optique utilisé au cours de notre étude	40
III.10	Machine universelle d'essai de dureté utilisée au cours de notre étude.	44
	Chapitre IV : Résultats et interprétations	
IV.1	Matériau de base (le substrat) des dimensions (50×25×4) utilisé	46
IV.2	Balance électronique utilisé .	49
IV.3	Palmer utilisé au cours de notre étude.	49
IV.4	**T**ronçonnage des échantillons à l'aide d'une scie mécanique.	50
IV.5	L'échantillon enrobée	51
IV.6	Pré-polissage de l'échantillon	52
IV.7	Polissage de finition de l'échantillon	52
IV.8	Micrographie du multi matériau 42CrMo4/SM8297 (Echantillon de 04 Couches)	53
IV.9	Micrographie du multi matériau 42CrMo4/SM8297 (Echantillon de 03 Couches)	54
IV.10	Micrographie du multi matériau 42CrMo4/SM8297 (Echantillon de 02 Couches)	55
IV.11	Echantillon revêtu avant qu'il ne soit placé dans la solution HCl.	57
IV.12	: Les échantillons à l'intérieur de la solution HCl	58
IV.13	Changement de couleur de la solution HCl après 24 heures.	58
IV.14	Les échantillons prélevés après leur immersion de 24 heures dans une solution HCl.	59
IV.15	Changement de couleur de l'échantillon après 24 heures à l'air	59
IV.16	Eprouvette dans l'appareil d'essai de dureté	61

IV.17	Lecture directe d'une longueur d’enfoncement d’un pénétrateur.	61
IV.18	La dureté Rockwell en fonction de nombre de couches.	62

LA LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	page
	Chapitre II : Recherche bibliographique et l'état de l'art	
II.1	Résume et compare les principales caractéristiques des techniques de projection thermique	29
	Chapitre III : Partie expérimental	
III.1	Différentes méthodes d'essai de dureté	43
	Chapitre IV : Résultats et interprétations	
IV.1	Composition chimique en pourcentage massique du fil fourre SM8297	45
IV.2	Composition chimique (% en poids) du métal de base (42CrMo4)	46
IV.3	Conditions de projection thermique à l'arc électrique de Série–A	47
IV.4	Conditions de projection thermique à l'arc électrique de Série–B	47
IV.5	Conditions de projection thermique à l'arc électrique de Série–C	48
IV.6	Résultats de la dureté rockwell en fonction de nombre de couches.	62

Introduction général

Introduction général :

La projection thermique est une technique couramment utilisée dans divers domaines industriels pour protéger, réparer et améliorer les surfaces des matériaux. Elle consiste à projeter des particules de matériaux chauffés à haute température sur une surface cible, où elles se solidifient rapidement pour former un revêtement résistant et durable. Ce processus polyvalent permet l'application de différents matériaux tels que les métaux, les céramiques, les polymères et les composites, répondant ainsi aux exigences spécifiques de diverses applications.

Dans cette étude, nous avons utilisé un acier faiblement allié 42CrMo4 comme substrat et un acier inoxydable de référence SM8297 comme métal d'apport, dans le cadre des travaux réalisés au Centre de Recherche et de Développement des Technologies Avancées (CDTA). L'acier faiblement allié 42CrMo4 est fréquemment employé dans l'industrie automobile, des machines et de l'énergie en raison de sa résistance et de sa ténacité élevée. L'acier inoxydable SM8297 est reconnu pour sa résistance à la corrosion et sa durabilité dans des environnements exigeants.

L'objectif principal de cette recherche était d'évaluer les performances des revêtements obtenus par projection thermique sur l'acier faiblement allié 42CrMo4 en utilisant l'acier inoxydable SM8297 comme métal d'apport. Nous nous sommes concentrés sur l'étude des propriétés des revêtements, telles que leur adhérence, leur microstructure, leurs propriétés mécaniques et leur résistance à la corrosion.

Les travaux ont été réalisés au Centre de Recherche et de Développement des Technologies Avancées (CDTA), la technique de revêtement appliquée était la projection à l’arc électrique entre deux fils consommables, les revêtements sur le substrat en acier faiblement allié 42CrMo4. Des analyses approfondies ont ensuite été effectuées pour évaluer les caractéristiques des revêtements, notamment à l'aide de différentes techniques.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude fournissent une meilleure compréhension des performances des revêtements obtenus par projection thermique sur l'acier faiblement allié 42CrMo4 en utilisant l'acier inoxydable SM8297 comme métal d'apport. Ces connaissances contribuent à l'optimisation des procédés de projection thermique, à la sélection appropriée des matériaux et des paramètres de projection, ainsi qu'à l'amélioration des performances des

composants dans des secteurs industriels tels que l'automobile, les machines et l'énergie, où la résistance et la durabilité sont des critères essentiels.

Chapitre I

PRESENTATION DEL'ORGANISME D'ACCUEIL

Chapitre I : PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

I.1 Présentation de la plateforme technologique de projection thermique :

La projection thermique est une technologie qui désigne un groupe de procédés de traitement de surfaces par voie sèche, elle permet de conférer aux surfaces traitées de nouvelles propriétés.

La variété et la rentabilité de cette technologie ont fait d'elle un centre d'intérêt des industriels qui l'ont introduite dans l'environnement de la production et de la fabrication industrielles.

La plateforme technologique de projection thermique du CDTA inclut actuellement deux techniques de projection thermique :

- La projection plasma à pression atmosphérique (APS);
- La projection Arc-fil (TWAS).

Le système est évolutif, il permettrait à l'avenir d'intégrer les autres techniques comme le HVOF et la projection à froid.

Dans ces techniques de projection, la combinaison du couple : Matériau de base/Dépôt, peut être adaptée pour apporter aux surfaces traitées une résistance à la chaleur, à l'usure, à l'érosion à la corrosion et autres fonctionnalités.

Ces techniques peuvent être utilisées aussi pour rétablir des pièces usées aux dimensions et caractéristiques originales.

Nous soutenons une variété de programmes de recherche et de développement technologiques, et nous sommes engagés à apporter des solutions collaboratives en science et ingénierie des procédés de projection thermique.

La plateforme regroupe un personnel chercheur et de soutien à la recherche pluridisciplinaires associant la physique, les sciences des matériaux, la métallurgie et l'électronique **[1]**.

I.1.1 Mission :

La plateforme Technologique de projection thermique a pour mission, conformément à la réglementation en vigueur, la mutualisation des moyens communs en matière de :

- Compétences dans le domaine de la projection thermique et de la caractérisation des matériaux ;
- Equipements scientifiques ;

- Financement

Elle contribue ainsi au développement des établissements de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, des structures de recherche scientifiques et de développement technologiques et des entreprises œuvrant dans ce domaine d'activité.

Elle offre de ce fait :

- Des formations théoriques et pratiques sur les procédés de projection thermique et sur le contrôle de qualité des dépôts,
- Un accès à une technologie avancée de traitement de matériaux et offre de produits finalisés à forte valeur ajoutée,
- Un accompagnement des entreprises dans le choix et la mise en place d'une technologie dans ce domaine d'activité **[1]**.

I.1.2 Les revêtement :

A. Solutions de Revêtements des : Aéronautique, Automobile, biomédical, mines, oïl & gaz, textile, papier, Imprimerie ...etc

B. Elaboration des dépôts :

La plateforme (TSP) assure l'élaboration des dépôts par projection Arc-fil et par projection Plasma Atmosphérique (APS).

L'élaboration d'un dépôt passe par plusieurs étapes comme illustré dans la figure I.1 suivant :

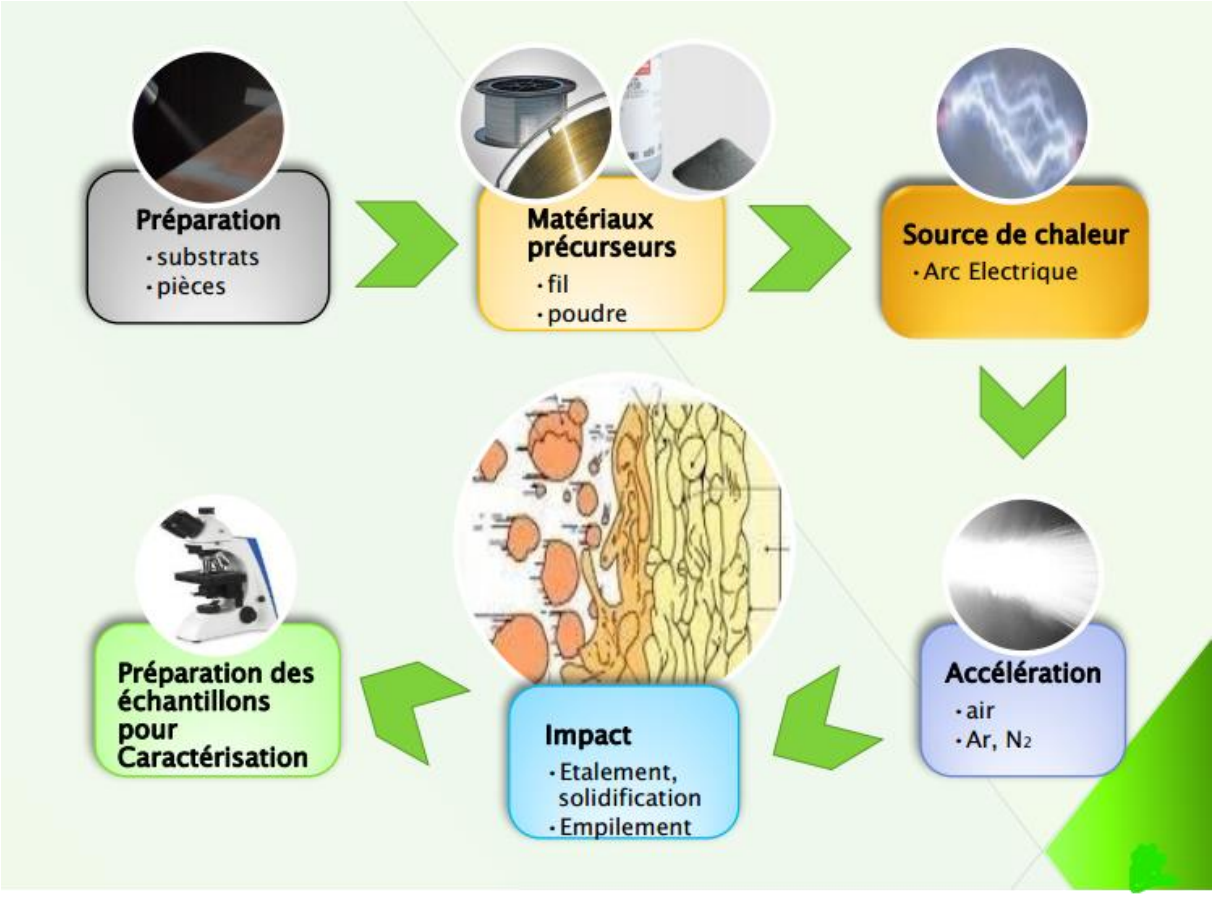


Figure I.1 : Représentation schématique de l'élaboration des dépôts **[1]**.

C. Les dépôts par Projection Thermique :

Trois types de matériaux peuvent être utilisés (en dépôts ou en substrats) :

- Matériaux monophasés : métaux, alliages, intermétalliques et céramiques,
- Matériaux composites : cermets (WC/Co,Cr3C2/NiCr, NiCrAlY/Al2O3, etc.), métaux renforcés, et polymères renforcés,
- Matériaux à gradient fonctionnel (FGMs).



Figure I.2 : Les types des matériaux projetés **[1]**.

Les surfaces à traiter peuvent être des :

- Échantillons de laboratoires;
- Pièces réelles dont les dimensions sont adaptées aux dispositif de projection.

I.1.3 Procédés Arc-fil :

Dans le procédé Arc-fil, le matériau d'apport est introduit sous forme de fil, ce matériau est fondu à l'aide d'un arc électrique qui se crée aux extrémités des fils et propulsé vers la surface à traiter à l'aide d'un flux de gaz de vitesse élevée.

Ses limites résident dans la nature des matériaux déposés. néanmoins, l'utilisation du matériau sous forme de fil constitue un des principaux avantages du procédé.

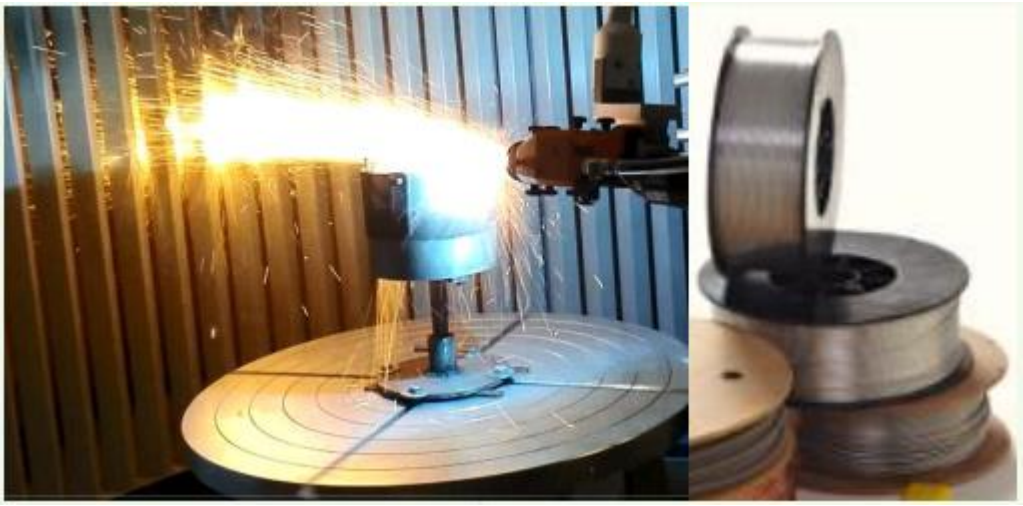


Figure I.3 : Arc électrique utilisé dans notre travail **[1]**.

Les matériaux utilisés sont des :

- **Métaux :** Zn, Al, Cu, Ni, Mo, …
- **Alliages :** acier inoxydable, inconel, …
- **Composites :** fils fourrés

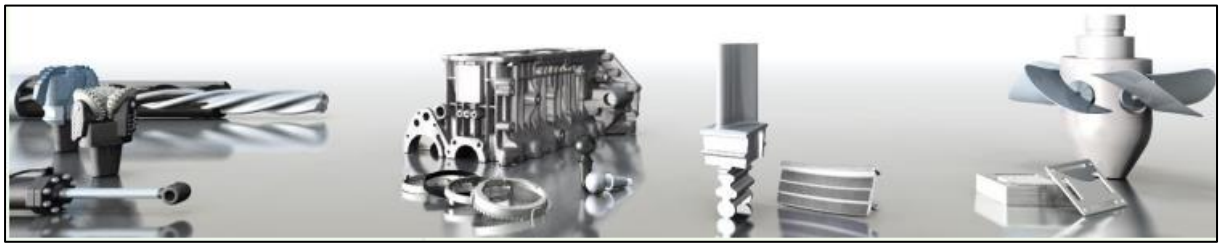


Figure I.4 : Les pièces mécanique avec des dépôts du procédé Arc-fil **[1]**

L'économie et la qualité des dépôts du procédé Arc-fil ont permis son utilisation dans l'industrie manufacturière à grande échelle.

- Une des principales applications de ce procédé est la protection contre la corrosion en utilisant des matériaux comme : Acier inoxydable, Zn, Al,…ces applications sont sollicités dans le domaine de l'automobile, de la marine, de la pétrochimie, etc…
- Il permet aussi de reconstruire de surfaces usées avec NiAl, NiCrAl, AlMg ou Mo. Ceci peut être le cas des pièces de moteur à réaction,
- Une autre application qui est en croissance continue et le formage de moule pour la fabrication d'outils **[1]**.

I.1.4 Procédé de Projection Plasma à Pression Atmosphérique (APS) :

Le jet de plasma est généré à partir d'un gaz continu chauffé par conversion d'énergie électrique en énergie thermique grâce à un arc électrique passant entre une cathode thoriée et une anode concentrique.



Figure I.5 : Matériel de Projection Plasma existant au CDTA **[1]**.

La température dans le cœur du jet de plasma est suffisamment élevée pour faire fondre n'importe quel matériau introduit dans le jet avec un temps de séjour suffisant.

Dans la projection plasma atmosphérique conventionnelle, le matériau d'apport est utilisé sous forme de poudre de taille micrométrique et de morphologie adaptée aux procédés de projection thermique.

Ce Procédé est de plus en plus introduit dans l'industrie comme les secteurs aéronautique, automobile, pétrochimie, énergie, biomédical, électronique, etc…

Dans l'industrie de gaz, de pétrochimie et de mines, de nombreuses pièces peuvent être traitées contre la corrosion à haute température et/ou haute pression, à titre d'exemple : outils de forage, arbres de pompe, boîtiers, vannes, forets de roche, tiges de compresseur, etc…

Ce procédé permet aussi de fabriquer des céramiques performantes, des composites, des matériaux à gradient fonctionnel et des matériaux réfractaires.

La dégradation par corrosion à chaud des métaux et alliages est un problème sérieux pour de nombreuses applications à haute température dans un environnement agressif :

- Dépôts de superalliages à base de Nickel contre la corrosion dans la chambre de combustion interne des moteurs, des chaudières et des incinérateurs de déchets industriels,
- Traitement des turbines à gaz terrestres :
  - Les dépôts à base d'alliages de Nickel ou de cobalt comme le NiCrMo ou le CoCrSiMo et MCrAlY contre l'oxydation et la corrosion sont appliqués sur les chemises de chambre de combustion, les injecteurs, pointe de turbine, buses et échappements.
  - Les dépôts MCrAlY sont utilisés sur les aubes et les ailettes comme couches d'accrochage et pour la protection contre la corrosion - oxydation.
  - Les TBCs sont généralement composé de SYZ, ils sont déposés sur certaines partie chaudes de la turbine.

Les applications de ces procédés sont présentées à titre indicatif, la liste des applications reste ouverte en fonction de l'évolution de ces procédés et/ou à la demande de l'utilisateur **[1]**.

I.1.5 Test de corrosion dans un environnement salin :

La cabine au brouillard salin permet d'effectuer effectuer des tests de corrosion standardisés conformément à la norme ISO 9227 ou ASTM B117.



Figure I.6 : Cabine au brouillard salin **[1]**.

Un brouillard salin est pulvérisé à température et vitesse constantes, pendant une durée définie au préalable, sur des éprouvettes pour tester la résistance à la corrosion des matériaux.

Le test peut être neutre au brouillard salin (NSS) pour simuler les conditions de l'eau de mer.

I.1.6 Granulométrie des poudres :

La granulométrie des poudres est un paramètre clé dans tous type de procédés, La distribution granulométrique, la morphologie, la composition chimique, la densité et la coulabilité de la poudre impactent sur les propriétés mécaniques de la pièce finale.

En complément des tests de caractérisation physico-chimique disponibles au CDTA, nous proposons une analyse granulométrique (taille et distribution) de matériau sous forme de poudre à l'aide d'un granulomètre laser performant.

I.1.7 Sablage des surfaces nettoyage, rugosité et érosion :

L'opération de sablage permet de :

- Nettoyer des surfaces encrassées à l'aide d'un matériau abrasif
- Créer une rugosité à la surface à traiter pour assurer un encrage du revêtement ;
- D'effectuer le test d'érosion afin d'évaluer la résistance à l'érosion des matériaux avec ou sans revêtement par un jet de particules d'alumine abrasives.



Figure I.7 : Cabinet de sablage **[6]**.

I.1.8 Equipements de la Plateforme de Projection Thermique :



1. Procédé Arc-fil OSU-Hessler T-Spray 400A LD/U

- Pistolet : LD/U-2 EM
- Intensité : 400A
- Diamètre fil : 1,62mm (14ga) **[1].**



2. Procédé Plasma atmosphérique AMTag MP200

- Torche : plasma F4-MB à buse standard 6mm
- Puissance : 55kW
- Poudrier injecteur : 2 x 1,5l
- Bras manipulateur : robot irb-1600
- Table tournante : □600mm, 300rpm avec charge de 250kg **[1].**

3. Enceinte à brouillard salin Ascott S450is



- Essai de brouillard salin en continu avec Compteur horaire
- Volume : 450l
- Dimension int. de l'enceinte (max) : H 1140mm, L 1010mm, P 640mm
- Capacité du réservoir de solution salée : 80l
- Porte-échantillon : 2 supports à 28 fentes (de 3mm) obliques (à 15°) **[1].**



4. Granulomètre Laser CILAS 990l

- Plage de mesure : 0,2 à 500µm
- Dispersion liquide : 2 pompes péristaltiques /Ultrason/Agitateur
- Précision : <3%
- Répétabilité : <1% **[1].**

5. Cabinet de sablage AIRBLAST AB-90

- Porte de chargement : H 850 mm, L 700
- Zone de travail : H 600 mm, L 1000 mm, P 600 mm
- Buse : 6 mm en carbure de bore
- Capacité d'éjection : 210 m^3/h **[1]**

Chapitre II

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE ET L'ETAT DE L'ART

Chapitre II : Recherche bibliographique et l'état de l'art

II.1. Introduction

C'est en 1909 qu'un ingénieur suisse de Zurich, le docteur Schoop observa l'incrustation de plomb suite à un tir d'une balle contre un mur en ciment, Ce dernier eut l'idée d'obtenir des revêtements métalliques par projection, il a tout d'abord déposé des matériaux à bas point de fusion comme le plomb, en pulvérisant, à l'aide d'un fluide chauffé, du métal fondu, mais les difficultés étaient considérables, l'appareil utilisé était intransportable et souvent le métal se refroidissait au cours de la pulvérisation et n'était plus dans l'état physique voulu pour former un revêtement lors de son impact. Pour cela il a amélioré le procédé en projetant le métal sous forme de poudre, à travers une flamme, malheureusement, il n'était pas facile d'obtenir un revêtement et un débit de poudre régulier, c'est pourquoi dès 1913, le docteur Schoop remplaça la poudre par un fil métallique entraîné par deux molettes. **[2]**

La figure I.1 présente les principaux procédés utilisés dans la projection thermique, Ils sont regroupés par la source d'énergie :

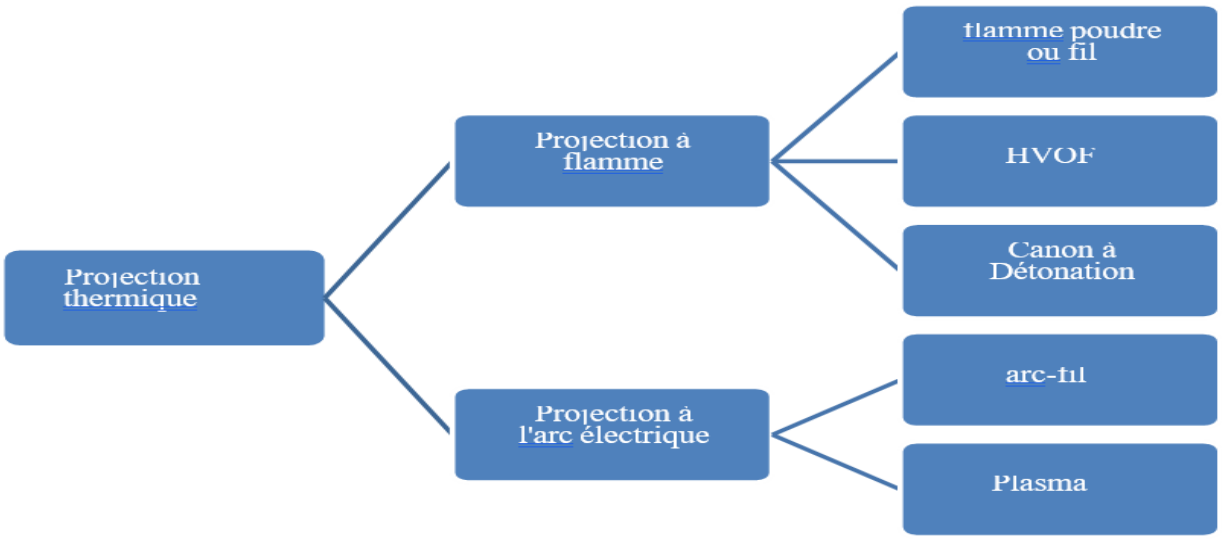


Figure II.1 : les principaux procédés de la projection thermique **[3]**.

II.2 Historique

Au début du 20ème siècle (1909) un ingénieur suisse de Zurich, le Docteur Max Ulrich Schoop a minutieusement étudié l'impact de balles en plomb sur un mur en béton, ce qui lui a inspiré de réaliser une invention portant sur l'utilisation de la technique de revêtement en plomb ou en zinc par projection de métal fondu.

Dans un premier temps, il a utilisé un creuset rempli de métal fondu et de l'air préalablement chauffé pour la pulvérisationet la projection du métal.

Après différentes évolutions techniques, l'utilisation d'un chalumeau comme source d'énergie et d'un métal en poudre a été qualifiée et brevetée en1911 comme "processus pour fondre un matériau dans une zone de chauffage et pour le propulser à l'état fondu et/ou ramolli par la chaleur, sur une cible pour y former un enduit **[3].**

II.3 Les revêtements

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

- Protection du métal de base contre les hautes températures,
- L'accroissement de la tenue mécanique, de la résistance à la fatigue et la résistance aux différents types d'usure (abrasion, adhésion, érosion…etc.),
- L'amélioration du frottement, L'isolation thermique ou électrique (projection de céramique...).
- Les traitements de surface se répartissent en quatre familles distinctes :

A. Les traitements à partir de vapeur ou gaz :

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

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

- La projection thermique

C. Les traitements à partir de solution

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

D. Les traitements mécaniques

- Mathoplastie,
- Explosion.

II.4 La projection thermique :

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

Parmi les techniques les plus utilisées nous pouvons citer : l'électrodéposition, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur (PVD et CVD) et la projection thermique.

En effet, la projection thermique est un traitement de surface (Figure II.2)

Par voie sèche visant à améliorer les propriétés du matériau tel que la résistance à l'usure et au frottement, les propriétés thermiques, les propriétés électriques et la protection contre la corrosion. **[4]**

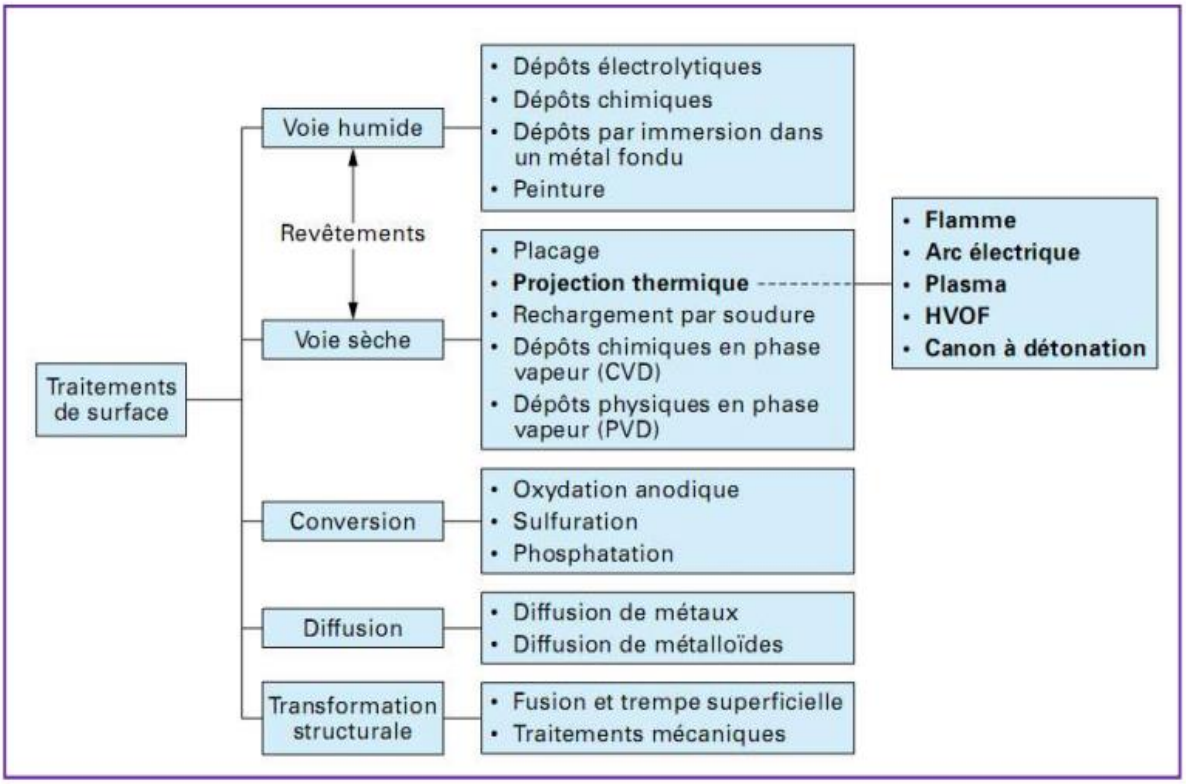


Figure II.2: Place de la projection thermique dans les traitements de surface **[4]**.

Tous les systèmes de projection thermique utilisent un gaz vecteur servant à accélérer et transporter de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) d'un matériau fondu sur une surface à recouvrir.

Les gouttelettes se déposent à la surface et se solidifient. C'est l'accumulation des particules sur le substrat qui crée le revêtement.

Les liaisons entre le substrat et la couche déposée sont donc entièrement mécaniques.

Le matériau à déposer peut-être sous forme de poudre, fil ou baguette.

L'apport d'énergie se fait de deux façons : la flamme et l'arc électrique.

La projection thermique occupe une place considérable dans le monde des traitements de surface. Son apparition date de 1909 grâce à l'invention de l'ingénieur suisse Schoop, portant sur la projection de plomb fondu à l'aide d'un vaporisateur, puis de plomb en poudre à travers une flamme.

Les premières applications industrielles sont apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'Aluminium). Dès 1914 des essais de projection par arc électrique furent réalisés.

Les procédés de projections thermiques peuvent être divisés en trois grandes catégories selon le type d'énergie qu'ils utilisent (Figure II.3) **[4].**

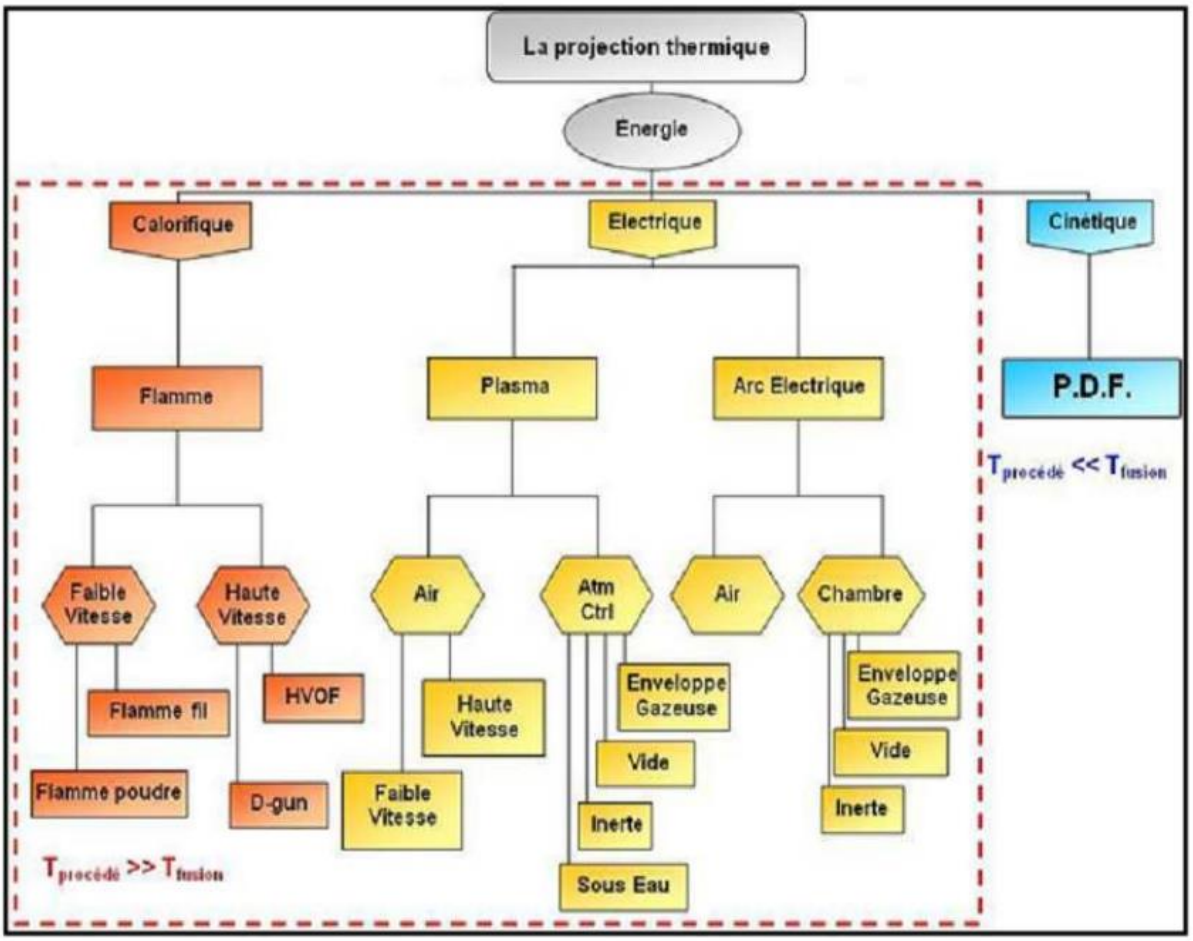


Figure II.3: Organigramme de la projection thermique **[4].**

II.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 K 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.

II.5.1 Flamme :

Le procédé de projection par flamme est basé sur la combustion d'un carburant sous forme gazeuse avec l'oxygène de l'air.

Dans la technologie dite flamme-poudre, le matériau est introduit sous forme de poudre dans la flamme diffusante qui le véhicule jusqu'au substrat.

Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000 °C, et donc les températures atteintes par les particules à projeter ne dépassent pas environ 2000 °C.

La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (~50m/s) et c'est pourquoi elles sont souvent accélérées avec de l'air.

La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondues.

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes à quelques centièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 2 à 3kg/h, sans échauffement important du substrat (T<250°C).

Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto-fusibles (alliages à base Nickel ou Cobalt contenant des éléments de petite taille tels que le bore et/ ou le silicium et chargés éventuellement en carbures), qui sont réchauffés à 1150 °C après dépôt pour améliorer l'adhérence, éliminer en partie les oxydes et diminuer la porosité du dépôt.

Notons que cette température exclut l'usage de substrats à base d'aluminium.

La projection d'acier, d'alliages à bas point de fusion ou de polymères est également possible par le procédé flamme-poudre.

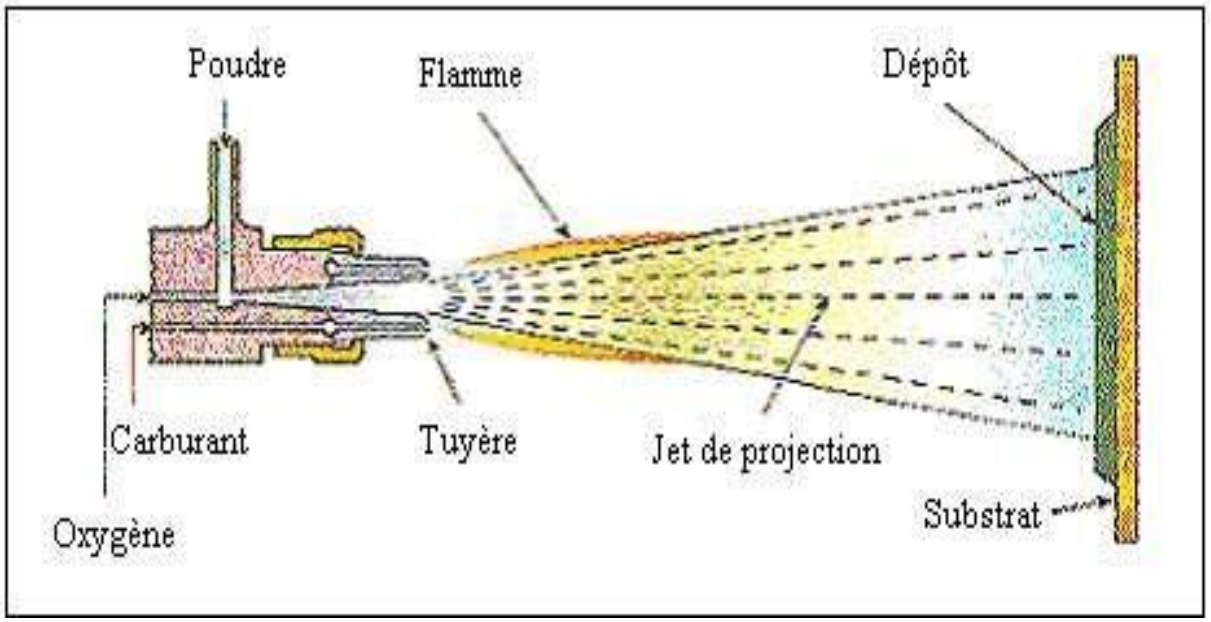


Figure II.4: Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-poudre **[4]**.

Il existe également un procédé appelé « projection flamme-fil » où le matériau d'apport est sous forme de fil, de baguette ou de cordon. Il utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme-poudre (oxygène gaz combustible) auxquels s'ajoute de l'air comprimé servant à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils.

La vitesse des particules est plus élevée (environ 150m/s).

La température de l'extrémité du fil ou de la tige peut atteindre 0,95 fois la température de la flamme ce qui permet de projeter des céramiques.

Les taux horaires varient de 1 kg/h à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, des diamètres de fil ou debaguette utilisés et des propriétés de dépôts recherchées.

II.5.2 Flamme supersonique :

II.5.2.1 HVOF :

La projection à la flamme supersonique utilise également une torche à flamme mais la géométrie spéciale de la tuyère et l'ajout d'une chambre de combustion (où règne une pression de 0,5 à 0,7MPa), suivie d'une tuyère convergente-divergente, permet à la flamme d'atteindre des vitesses supersoniques.

Le matériau à projeter se présente généralement sous forme de poudre.

Il est injecté à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où il est fondu et accéléré dans la tuyère à une vitesse de 300 – 600 m/s.

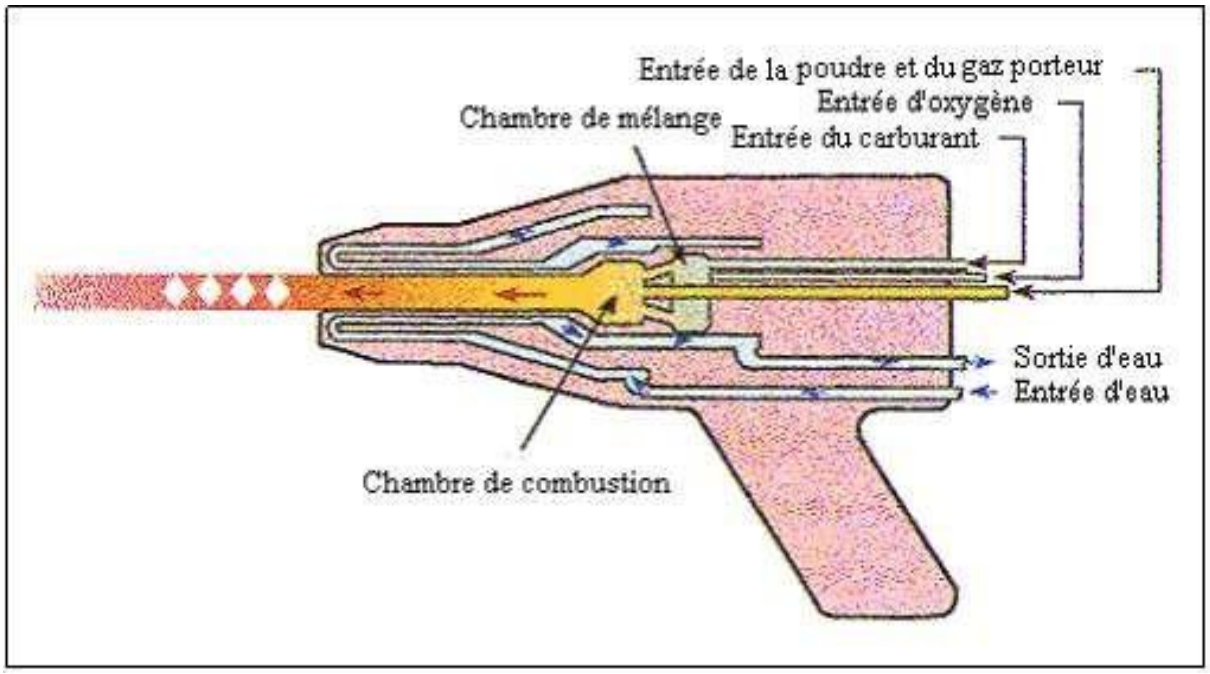


Figure II.5: Principe de fonctionnement d'un pistolet HVOF **[4].**

Les pressions importantes atteintes dans le pistolet n'autorisent pas l'utilisation de l'acétylène comme gaz combustible (risque d'explosion).

Pendant leur temps de séjour très court (quelques dixièmes de millisecondes) dans la flamme, les particules sont généralement chauffées à l'état pâteux, l'énergie cinétique (vitesse>300m/s) acquise permettant cependant la réalisation de dépôts caractérisés par une faible porosité (<2%), une bonne adhérence (70- 100MPa) et une faible rugosité de surface.

Les principales applications de ce procédé sont la projection de cermets (WC-Co, Cr_3C_7-Co ou NiCr), de métaux, d'alliages et d'alliages autos fusibles.

II.5.2.2 Canon a détonation :

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport sous forme de poudre, dans un tube fermé à une extrémité, en même temps que les gaz de combustion (généralement oxygène et acétylène).

Ce mélange détone grâce à une étincelle, les gaz brûlés sont balayés par de l'azote et les gaz explosifs frais réinjectés à la fréquence de 6 à 60 allumages par seconde.

La poudre est chauffée et éjectée à très grande vitesse (950m/s) par l'onde de choc qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa.

Le régime de projection est discontinu.

Les particules impactent dans un état plastique donc avec une oxydation très faible (moins de 0,1 % en poids).

La densification du dépôt est excellente compte tenu de la vitesse d'impact.

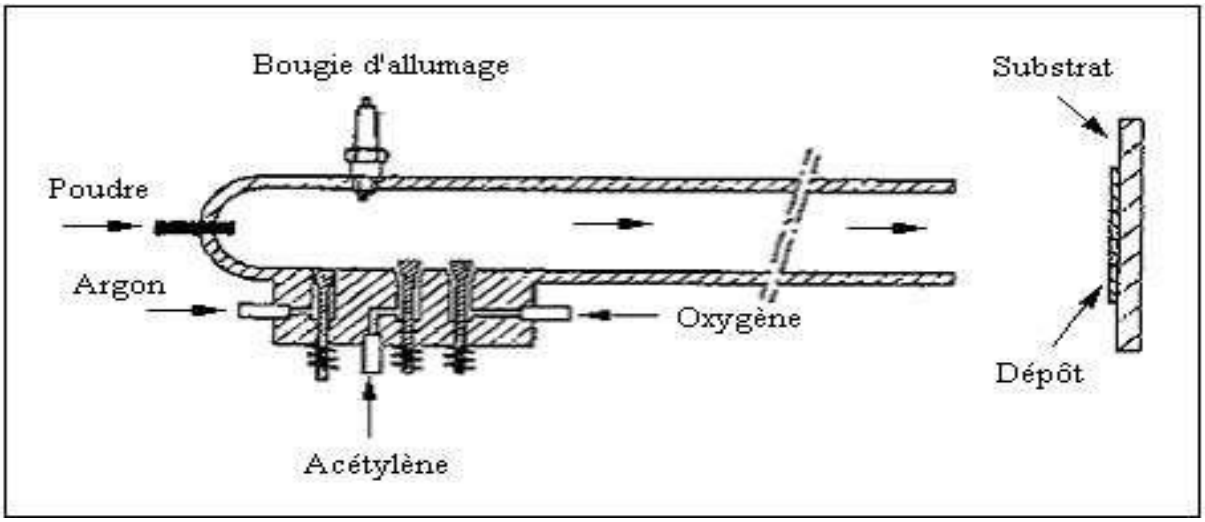


Figure II.6: Principe de fonctionnement d'un canon à détonation **[4].**

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts très denses (porosité inférieure à 1%), avec une adhérence élevée (souvent supérieure à 80 MPa) et une rugosité faible (Ra=±3µm).

Les taux de dépôt sont compris entre 2 et 5 kg/h.

Il est, cependant, peu répandu du fait de la complexité et du prix du matériel.

Les revêtements par canon à détonation sont réservés aux pièces techniques nécessitant une qualité de dépôt optimale.

Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de chrome ou de tungstène avec un liant métallique (Ni ou Co), l'alumine et l'oxyde de chrome.

Une des principales applications de cette technique est la protection de rouleaux d'imprimerie par le cermet WC-Co et le revêtement de têtes de foreuses **[4].**

II.5.3 Projection à flamme-fil :

La projection flamme fil, plus connue sous le nom de métallisation ou shoopage a été inventée en 1910 par la suisse Schoop qui a développé le premier pistolet de projection thermique de fils métalliques.

L'appareil consistait en un brûleur dans lequel un carburant, acétylène ou hydrogène, était mélangé avec de l'oxygène pour créer une flamme en sortie de tuyère de brûleur.

Un jet d'air comprimé entourant la flamme atomisait et propulsait le métal fondu.

La continuité du procédé dépendait de l'approvisionnement du fil dans la flamme avec une vitesse contrôlée de façon à le fondre et le projeter avec un flux continu (figure II.7).

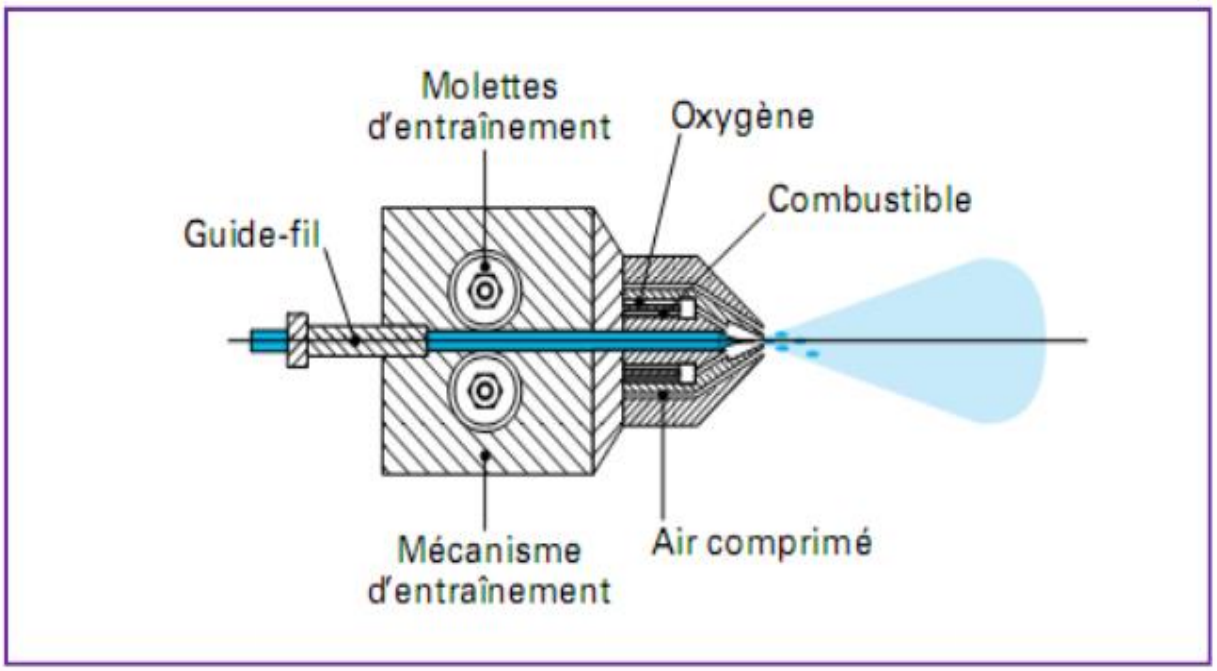


Figure II.7: Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil **[4]**.

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

Une partie chalumeau dans laquelle le matériau d'apport est fondu et pulvérisé.

Une partie entraînement de fil.

La partie chalumeau comprend un mélangeur de gaz, une buse à gaz, une buse à air.

Elle est alimentée par les mêmes gaz que ceux utilisés en projection poudre (oxygène + gaz combustible), auxquels s'ajoute l'air comprimé servant à la pulvérisation du matériau d'apport fondu.

Des buses à gaz différentes permettent l'utilisation de gaz tels qu'acétylène, propane ou tétrine par exemple, alors que différentes buses à air modifient l'aspect et les caractéristiques du dépôt. De même, des rallonges, à jet droit ou à jet dévié, autorisent les dépôts dans des alésages ou dans des zones difficilement accessibles (Figure II.7).

La partie entraînement de fil peut être animée soit par une turbine à air, soit par un moteur électrique. Le système d'entraînement par moteur électrique permet une régularité parfaite de l'avance du fil, en particulier grâce à un couple moteur constant, quelles que soient les variations

de traction du fil en amont du pistolet.

L'avantage du système d'avance par turbine est le poids et le coût inférieurs de l'appareil.



Figure II.8 : Pistolet de métallisation **[4]**.

Ses avantages sont qu'il est d'un investissement faible, il est facile d'utilisation en permettant l'obtention de rendements de projection élevés, c'est un système portable qui peut être utilisé en chantier.

Ses désavantages sont qu'il est limité à la projection de matériaux existant sous forme de fil et le procédé ne permet pas l'obtention de revêtements à haute densité, avec un taux d'oxyde faible et une grande adhérence **[4].**

II.5.4 Projection à l'arc :

II.5.4.1Projection par plasma :

C'est la méthode la plus commune de revêtement par projection thermique, et est appliquée comme projection plasma air - Air Plasma Spraying (APS) - ou comme projection sous atmosphère contrôlée.

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

Un mélange de gaz et de flux élevé le long de l'électrode est ionisé par l'arc, et forme le plasma.

Ce jet de plasma est projeté hors de la buse, où la poudre du matériau de revêtement est injectée dans le jet de plasma.

La chaleur et la vélocité du jet de plasma fait fondre rapidement et fait accélérer les particules pour les conduire sur le substrat et former un revêtement.

Les revêtements par jet de plasma ont une structure plus dense que les revêtements projetés à la flamme.

Les particules peuvent atteindre une vitesse de 300 m/s, et à des températures extrêmement élevées, de 13000K à 30000K.

La projection de plasma comporte l'avantage de pouvoir être projetée sur les matériaux avec des points de fusion élevés tels que la céramique ou les métaux réfractaires.

Il s'agit d'une méthode de projection polyvalente pour des revêtements de haute qualité et utilisés pour un vaste choix d'applications, y compris les revêtements sur les surfaces de revêtements pour barrière **[3].**

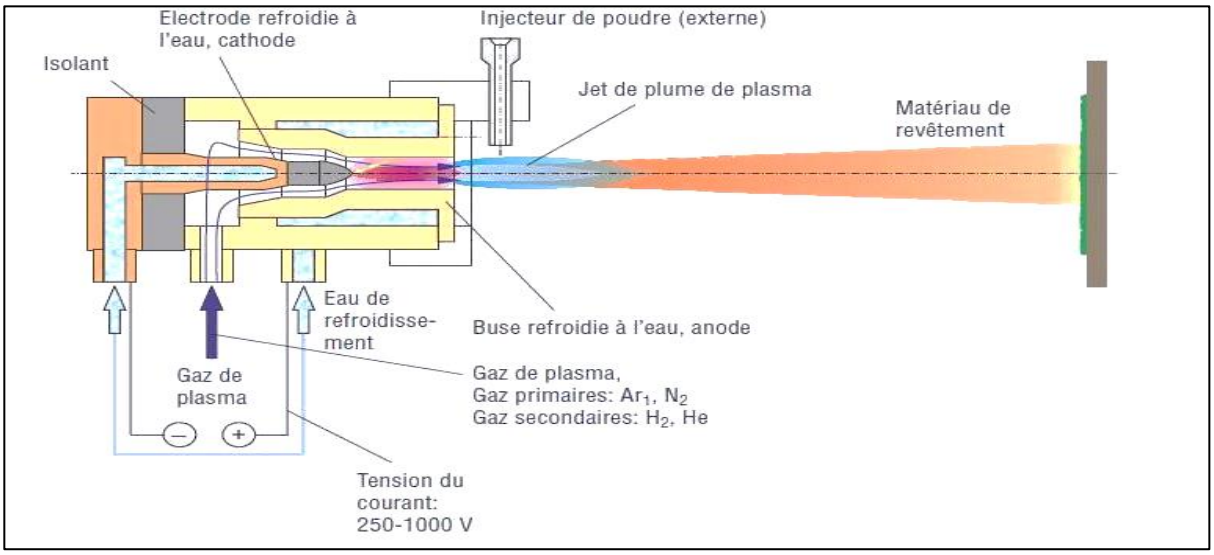


Figure II.9 : Principe de la projection plasma. **[3]**



Figure II.10 : Pistolet plasma à pression atmosphérique **[6].**

II.5.4.2 Projection à l'arc électrique :

Un arc électrique entre deux fils dégageant une énergie thermique importante (environ 6000°C variant selon le matériau utilisé et l'intensité choisie) fait fondre le métal des fils, un jet d'air comprimé pulvérise alors le métal fondu sur le substrat.

Les dépôts ont une épaisseur de 0,2 à 3 mm avec une porosité de 5 à 10%.

Son développement est axé sur les deux caractéristiques à améliorer que sont ; la taille des particules (qui jusque-là possédaient une structure grossière) et l'oxydation des dépôts due au transport des particules par de l'air, remplacé par un gaz neutre.

Les matériaux projetés doivent être conducteurs.

Les plus fréquemment utilisés sont le zinc, l'aluminium, le cuivre, le molybdène et les aciers.

Le développement des fils fourrés avec des alliages tels que NiCrAl ou NiMoAl, des fils chargés en carbure de chrome ou des composites permet de nouveaux types de dépôts. **[3]**



Figure II.11 : Arc électrique entre deux fils consommables **[6].**

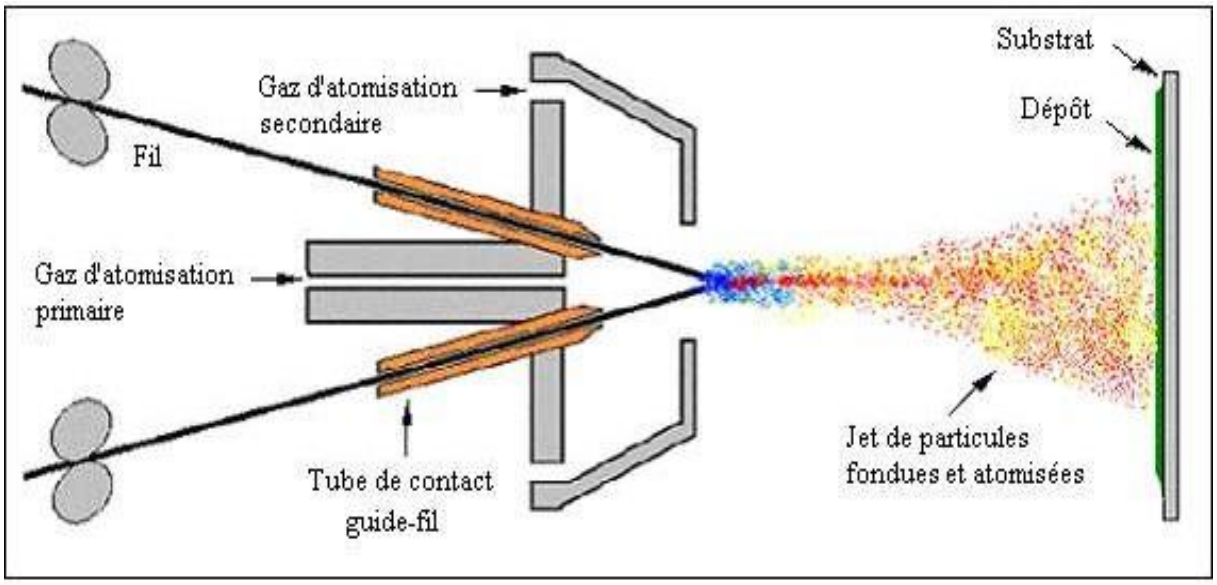


Figure II.12 : Principe d'un dispositif de projection à l'arc électrique **[5].**

II.5.4.3 Principe de la projection Arc-fil :

Dans le procédé Arc-fil, le matériau d'apport est introduit sous forme de fil, ce matériau est fondu à l'aide d'un arc électrique qui se crée aux extrémités des fils et propulsé vers la surface à traiter à l'aide d'un flux de gaz de vitesse élevée.

Ses limites résident dans la nature des matériaux déposés. Néanmoins, l'utilisation du matériau sous forme de fil constitue un des principaux avantages du procédé.

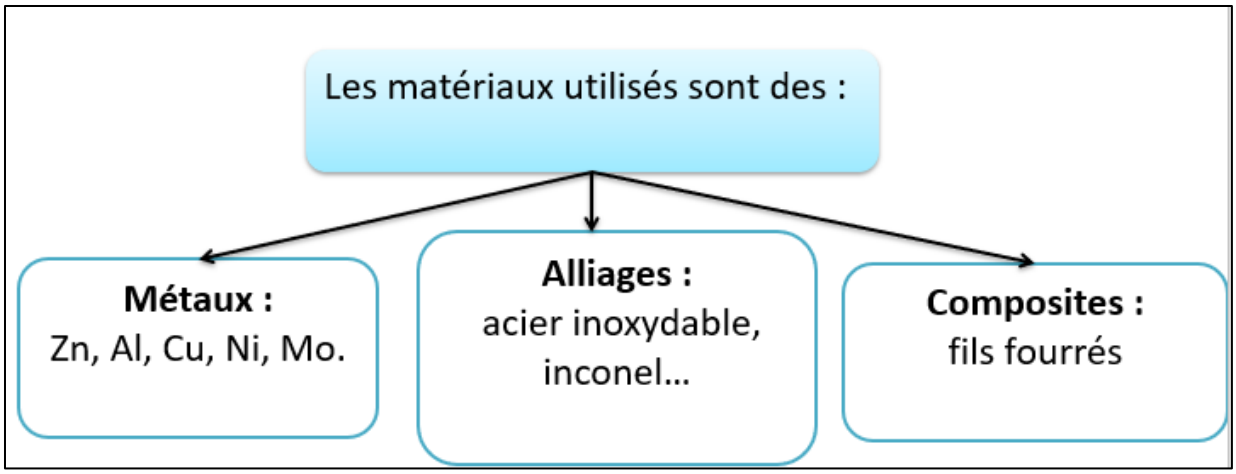


Figure II.13 : Matériaux utilisés dans la projection thermique **[5]**.

II.5.6 Fils fourrés :

Il existe deux types de fils pour la projection thermique par arc-fil :

- Pour les métaux purs ou certains alliages ductiles, on utilise des fils « pleins », uniquement constitués du matériau à déposer,
- Pour des alliages plus complexes ou des composites, on peut utiliser des fils « fourrés » constitués d'une enveloppe métallique ductile électriquement conductrice à l'intérieur de laquelle est introduite une poudre.

Ce type de fil est utilisé depuis 1980 pour la réalisation de dépôts présentant une dureté élevée et une bonne résistance à l'usure.

De tels dépôts peuvent être obtenus à partir d'aciers à forte teneur en carbone et d'alliages métalliques.

Cependant, en raison de leur mauvaise plasticité, la fabrication de fils avec ces matériaux est généralement difficile et la technique du fil fourré s'avère nécessaire pour réaliser ce type de dépôt par arc-fil.

En raison des limitations physiques des fils fourrés, il est pratiquement impossible de produire des dépôts par arc-fil contenant plus de 50 % en volume de particules céramique.

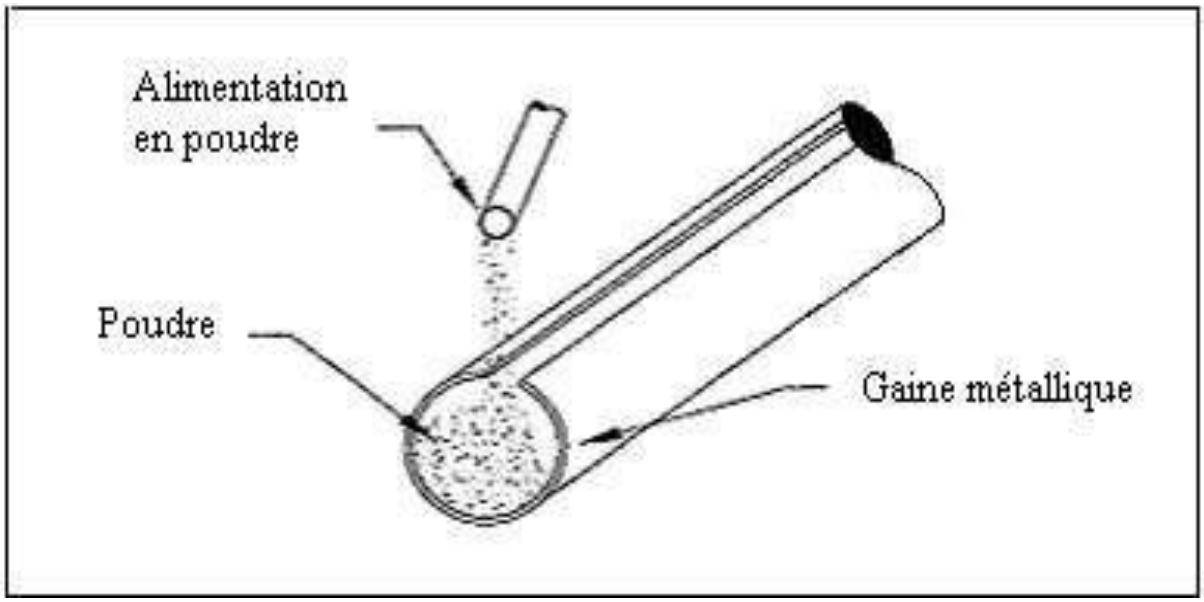


Figure II.14 : Principe du remplissage d'un fil fourré **[5]**.

Il existe plusieurs types de fils fourrés qui différent par leur mode de fabrication, On trouve ainsi des fils fourrés étirés et des fils fourrés plissés ou sertis.

Actuellement, les fils fourrés sont élaborés essentiellement par formage au train de galets, la fabrication par étirage étant limitée car trop onéreuse.

Le procédé de fabrication au train de galets consiste à garnir depoudre métallique, grâce à des trémies, un feuillard métallique mis en forme par des galets puis à calibrer le fil obtenu à travers des filières jusqu'à obtenir le diamètre nominal.

La fabrication du fil peut être complétée par un étuvage et un traitement de bleuissage au four. Lefil est ensuite conditionné en bobines.

La structure des dépôts obtenus à partir de fils fourrés dépend de la composition du fil, de son mode de fabrication et des conditions de projection.

On distingue, en général, trois types de morphologie de dépôt.

Le premier correspond à un dépôt dans lequel les particules de poudre, peu ou pas fondues, sont dispersées dans une matrice constituée du matériau de la gaine.

Ce type de dépôt(8a) présente une adhérence et une cohésion faibles en raison du manque d'accrochage entre les particules de la poudre originale et le reste du matériau.

De plus, le dépôt peut présenter des caractéristiques très hétérogènes ce qui conduit, généralement, à un mauvais comportement à l'usage.

Le deuxième type de dépôt (8b) est constitué d'un empilement de lamelles provenant de la poudre et du matériau de la gaine.

Par rapport au premier type de dépôt, les particules dela poudre arrivent sur le substrat à l'état fondu et elles s'étalent lors de l'impact pour former des lamelles.

Enfin, le troisième type de dépôt (8c) est un mélange homogène du matériau de la gaine et de la poudre, grâce à une parfaite fusion de cette dernière dans l'arc électrique.

Ce dépôt présente les meilleures propriétés en fonctionnement.

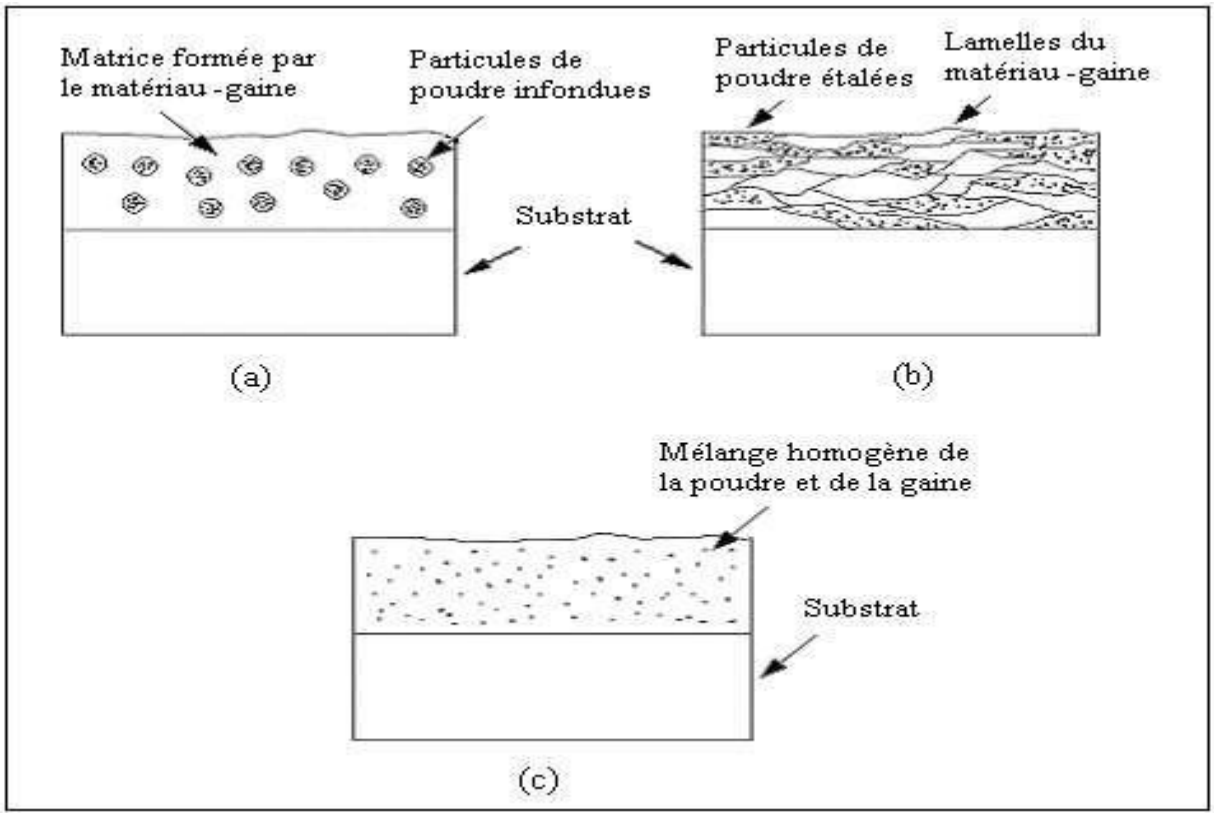


Figure II.15 : Morphologies-type de dépôts obtenus avec des fils fourrés de Ni-TiB_2 **[5].**

II.6 Formation et structure des dépôts :

Les dépôts formés par projection thermique sont obtenus par empilements successifsde gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux.

La structure ainsi formée est du type lamellaire. Afin de réaliser un bon accrochage mécanique, la surface des pièces à revêtir est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface.

L'adhésion est assurée par un ancrage mécanique du matériau qui pénètre dans les microcavités et irrégularités de surface du substrat avant la solidification.

Les dépôts sont généralement stratifiés, s'ils ne sont pas traités a posteriori.

Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification.

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

Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules infondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur).

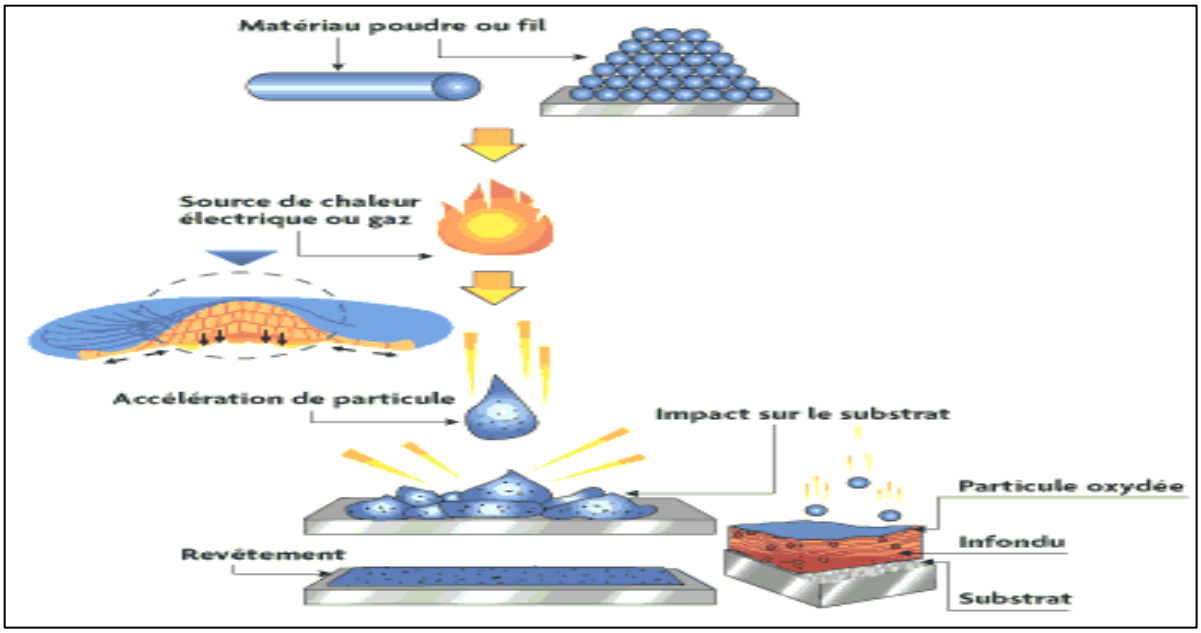


Figure II.16 : Dépôt par projection thermique à la flamme **[5]**.

II.7 Préparation de surface :

Les substrats avant projection sont généralement directement issus de l'étape de découpe ou d'usinage, leur état de surface est pollué par les résidus des traitements mécaniques et par les molécules de l'atmosphère adsorbées.

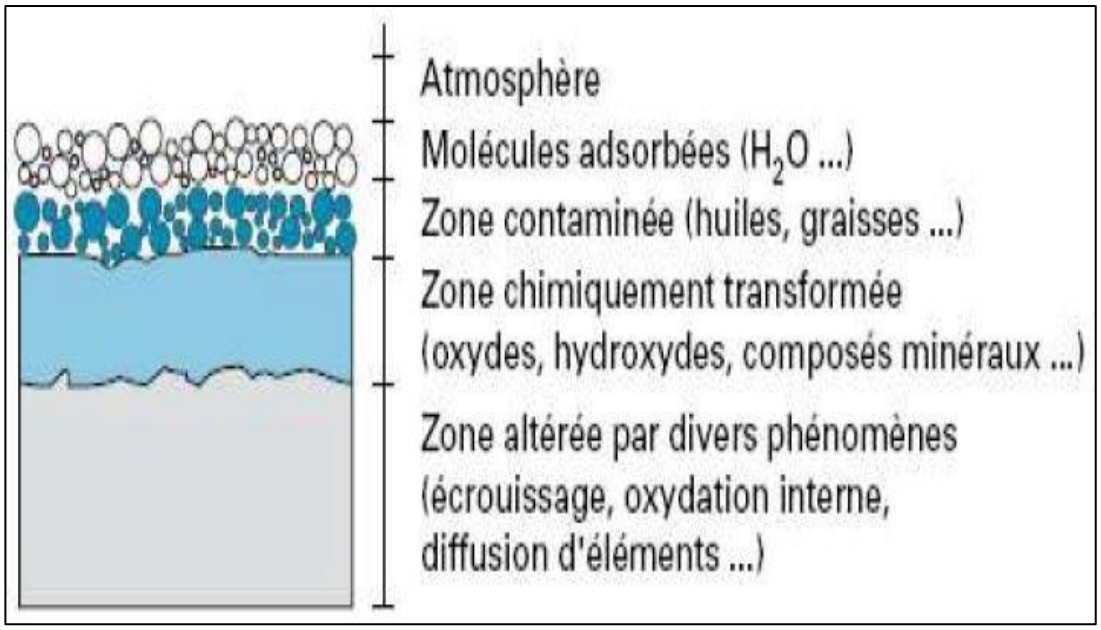


Figure II.17 : Représentation schématique des contaminants d'une surface métallique **[5]**.

La bonne projection exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir.

Si quelques fois on peut obtenir, avec des particules liquides et très chaudes, des liaisons ponctuelles par fusion entre le projectile et le subjectile, cet accrochage reste toujours très insuffisant.

En effet, que ce soit pendant les opérations d'usinage sur des pièces rechargées, ouau cours des sollicitations sur des pièces protégées contre la corrosion, les efforts mécaniques induits aux revêtements engendreront son décollement.

Il est donc utile et nécessaire de préparer la surface pour obtenir.

II.7.1 La propreté :

La propreté est le constat visuel de la disparition plus ou moins importante desimpuretés de toutes natures, pouvant souiller la surface d'un produit.

Elle permet aussi de mettre à jour les modifications physiques éventuelles de la structure (défauts ou autres).

Cette propreté sera obtenue, suivant le type de polluant de la surface, soit par un dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le casd'opération de protection anticorrosion.

II.7.2 La rugosité :

Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire, mais pas suffisante.

Il faut créer un accrochage mécanique entre le produit et le support.

Celui-ci s'obtient par la Réalisation d'une rugosité sur toute la surface par un bombardement

intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage.

II.7.3 Le préchauffage :

Un léger préchauffage de la pièce à traiter, est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence.

Il devient indispensable pour les revêtements à partir de poudre et surtout pour les matières plastiques qui ne sont pas conductrices de chaleur.

Le préchauffage peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines piècesporeuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile, que le nettoyage n'a pas atteinte.

II.8 Caractéristiques des différentes techniques de la projection thermique :

Tableau II.1 : résume et compare les principales caractéristiques des techniques deprojection thermique.

Caractéristique	Projection flamme	Arc électrique	Plasma	HVOF	Canon à détonation
Température de flamme(C)	3000	6000	12000	3000	3000
Vitesse des particules (m /s)	40 a150	250	200	700	950
Taux horaire de dépôt (Kg/h)	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement moyen (%)	50 à 70	80	70	70	70
Taux de porosité (%)	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0.5 à 2	0.5 à 2
Force d'adhérences (MPa)	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Epaisseur dépose (mm)	1 à 1.5	0.2 à 3	0.05 à 1.5	0.05 à 1	0.05 à 1

II.9. Conclusion

La projection thermique est une technique utilisée pour appliquer de la peinture et des matières premières sur des surfaces à haute pression et à haute température.

La projection thermique est rapide et efficace pour appliquer de la peinture sur des surfaces complexes et grandes, et elle est largement utilisée dans de nombreuses industries.

La projection thermique peut être utilisée pour appliquer de la peinture sur des surfaces métalliques, en bois, en plastique, en verre et en béton, ainsi que pour appliquer des isolants thermiques et acoustiques sur des surfaces.

La projection thermique est également une technique utile pour réparer les équipements et les pièces endommagés, où elle peut être utilisée pour réparer des vis, des boulons, des joints et d'autres surfaces métalliques. Malgré les avantages de la projection thermique, elle nécessite un équipement spécial et une formation pour éviter les risques potentiels d'une utilisation incorrecte, tels que des brûlures et d'autres blessures.

Il est donc important de suivre les mesures de sécurité nécessaires et de suivre les instructions appropriées lors de l'utilisation de la projection thermique.

En général, la projection thermique est une technique importante et efficace pour appliquer de la peinture et des isolants sur des surfaces rapidement et efficacement, mais elle doit être utilisée avec prudence et formation pour éviter les risques potentiels.

Chapitre III

PARTIE EXPEREMENTALE

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie expérimentale de notre travail.

Nous détaillons les différentes étapes de leur réalisation, comme la découpe des échantillons et la préparation de leurs surfaces, ainsi que la technique de projection thermique pour l'application du revêtement.

Nous présentons également les différentes méthodes et techniques expérimentales que nous avons utilisées dans cette étude.

III.2 Préparation des surfaces avant métallisation

III.2.1 Préparation de la surface

Avant l'élaboration d'un revêtement, on est tenu à se pencher sur l'état desurface des substrats qui est un paramètre important ayant un impact significatif sur l'étalement des particules projetées.

Des procédés de préparation de surface sont alorsindispensables pour garantir une bonne adhérence entre le substrat et le dépôt.

Des techniques de nettoyage et de modifications de surfaces, telles que le dégraissage chimique ou le sablage, sont généralement employées afin de générer un état de surface favorable à une bonne qualité inter faciale dépôt/substrat.

Ces procédés permettent d'obtenir de bonnes valeurs d'adhérence d'une part, d'autre part ilsprésentent des inconvénients et peuvent notamment engendrer une fragilisation du matériau traité, soit par attaque chimique (dégraissage), soit par détérioration mécanique (sablage).

Il peut arriver également que les préparations de surface engendrent des défauts d'interface à partir desquelles des fissures peuvent apparaitreet aboutir au décollement du dépôt.

La nature de cette préparation de surfaces dépend de l'objectif à atteindre.

Il existe à cet effet plusieurs traitements de préparation mécaniques, chimiques ou électrolytiques permettant d'y parvenir. **[3]**

III.2.2 Présentation du sablage

Il s'agit d'un traitement de surface par impact.

Cette technique industrielle consiste à projeter à grande vitesse un abrasif sur un matériau en utilisant notamment un pistolet et des buses.

L'équipement nécessaire utilise l'air comprimé : les cabines de sablage se connectent donc à des compresseurs. **[7]**

III.2.3 Le sablage

Le sablage consiste à décaper une surface en projetant, à grande vitesse et sous haute pression, un abrasif àtravers une buse (figure III.1).

Le sablage permet de décaperparfaitement, rénover, désoxyder et préparer les surfaces pour des revêtements ultérieurs.

S'il y a une étape que l'on peut qualifier de très importante dans le processus deprojection thermique, c'est bien la préparation du substrat. Tout comme tous lesautres procédés de déposition ou de revêtements de surface comme le soudage,l'électro-plating, l'émaillage ou la peinture, une préparation non satisfaisante peutêtre pénalisante pour l'adhésion du revêtement sur son substrat.

A titre d'exemple dans le cas d'un substrat en aluminium ou l'un de ses alliagesqui ont la particularité d'être recouverts d'une couche infime d'oxyde (Al203) trèsstable, cette dernière doit être détruite pour favoriser un bon accrochage du revêtement sur son substrat.

Deux voies sont possibles, un traitement mécanique (sablage par exemple) ou un traitement physico-chimique, le revêtement devant être réalisédans la continuité. **[3]**

III.2.4 Cabine de grenaillage

La cabine de sablage (étanche) se connecte à un compresseur.

L'utilisation de cette machine rend possible le travail en intérieur et la récupération du sable (les abrasifs recyclables). **[7]**



Figure III.1 : Cabine de grenaillage utilisé au cours de notre étude **[6]**.



Figure III.2 : Photographie de compresseur utilisé au cours de notre étude **[6]**.

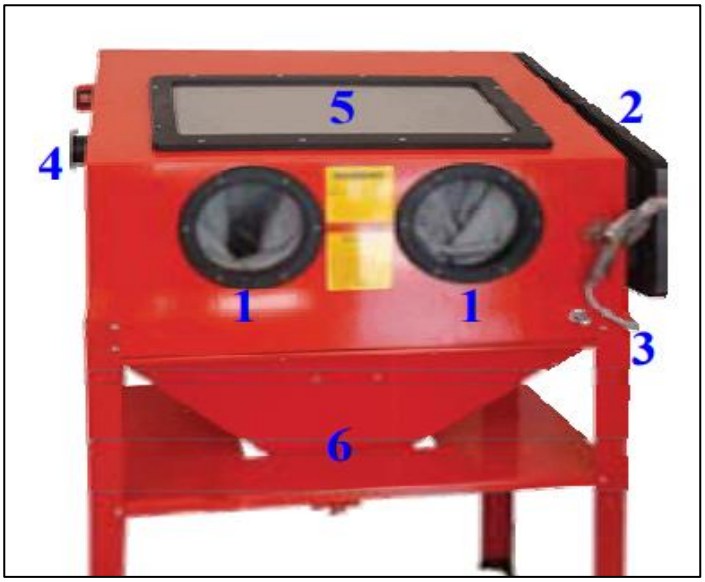


Figure III.3 : Composants de la cabine de sablage **[7]**.

1. Ouverture pour les mains avec des gants étanches.
2. Trappe d'accès pour passer les pièces.
3. Pistolet de sablage (avec buse) + connexion au compresseur.
4. Bride d'aspiration.

Il faut utiliser un aspirateur spécial avec une cuve métallique pour récupérer la poussière.

5. Hublot.
6. Cône récupérateur avec trappe de vidange.

Les abrasifs sont plus lourds que la poussière, on peut donc les récupérer (quand ils sont recyclables). **[7]**

A. La propreté

La propreté est le constat visuel de la disparition plus ou moins importante des impuretés de toutes natures, pouvant souiller la surface d'un produit.

Elle permet aussi de mettre à jour les modifications physiques éventuelles de la structure (défauts ou autres).

La métallisation exige, que la surface du support devant recevoir un futur revêtement, soit Particulièrement propre, exempte de traces de calamine, de rouille, d'huile, ou de graisse, afin de ne pas nuire l'adhérence du métal d'apport.

Cette propreté sera obtenue, suivant le 43 type de polluant de la surface, soit par un dégraissage soigné après usinage dans le cas d'opération de rechargement, soit par un sablage dans le cas d'opération de protection anti corrosion. **[7]**

B. La rugosité

Pour obtenir une bonne adhérence, la propreté est nécessaire mais pas suffisante.

Il faut créer un accrochage mécanique entre le produit et le support. Celui-ci s'obtient par la réalisation d'une rugosité sur toute la surface.

La rugosité est le résultat de la modification micro géométrique d'une surface, provoquée par le bombardement intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage.

Dans les deux cas, le résultat a pour effet :

- d'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le futur revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue de la surface.

- de créer un maximum d'aspérités, où le matériau déposé viendra s'ancrer.

La rugosité est complémentaire de la propreté. **[8]**



Figure III.4 : Appareil de mesure de la rugosité de surface **[6].**

C. Le préchauffage

Comme nous l'avons vu précédemment, suivant la différence de température entre le métal d'apport et celle du support, on obtiendra un accrochage plus ou moins important.

Raison pour laquelle, un léger préchauffage de la pièce à traiter est toujours conseillé afin d'augmenter le pouvoir d'adhérence.

Le préchauffage peut aussi être employé pour la dessiccation de certaines pièces poreuses, imprégnées en profondeur d'eau ou de graisse ou d'huile, que le nettoyage n'a pas atteinte.

Il permettra de faire sortir les liquides absorbés, afin que la métallisation adhère efficacement. **[8]**

III.2.5 Les modes de préparation

Il existe deux grandes applications dans le domaine de la métallisation :

- Celui dit du revêtement anti corrosion,
- Celui dit du rechargement mécanique.

Suivant le traitement à revêtement, la préparation de surface va différer pour être, soit :

- Un sablage dans l'anticorrosion.
- Un usinage dans le rechargement. **[8]**

III.3 Projection par arc électrique

La projection à l'arc est le premier procédé ayant utilisé l'énergie d'une décharge électrique.

Il consiste en un arc électrique créé entre deux fils consommables et un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat.

L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, et un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible).

Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant [Figure III.5].

L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre.

La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K.

Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat.

Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à10% et une adhérence de 20 à 40 MPA.

La technique est simple et peu coûteuse et permet de déposer la matière avec un débit important (de 5 à 30 kg/h).

L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt.

Des modifications du pistolet et l'emploi d'un second jet de gaz ont permis de concentrer le flux de matière atomisée et de diminuer la porosité des couches.

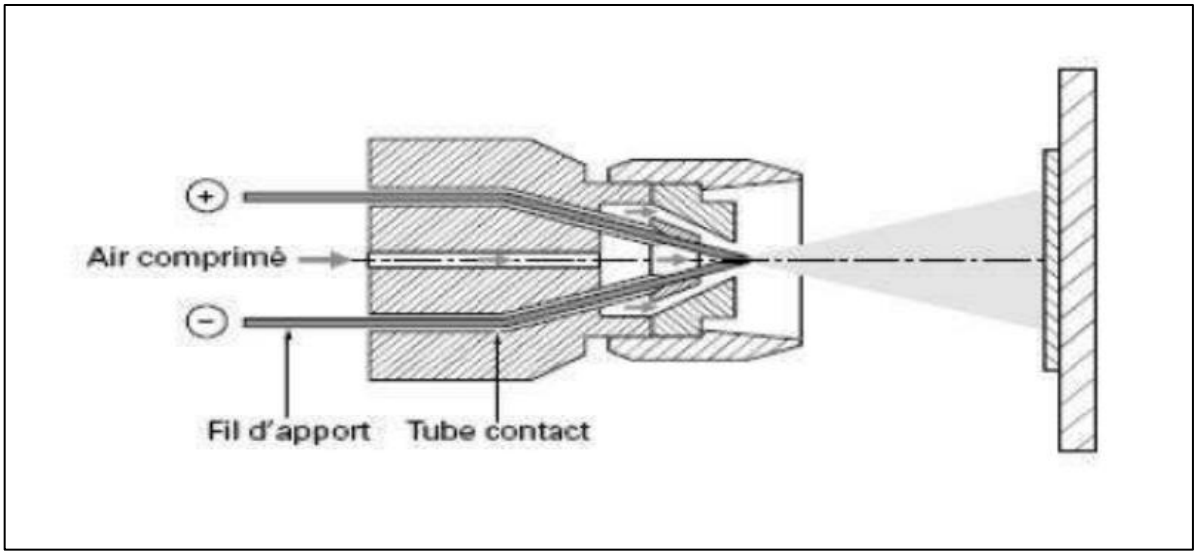


Figure III.5 : Schéma de principe de la projection à l'arc **[4].**

Les matériaux projetés sont des métaux conducteurs électriques (aluminium, cuivre, zinc, molybdène), des aciers mais aussi des alliages NiCrAl, NiMoAl.

L'une des limites importantes du procédé est la nature des matériaux (tréfilabilité et conductibilité).

La gamme des matériaux projetés peut être élargie en utilisant la technologie des fils fourrés qui permet de déposer des carbures (CrC, WC, TiC) et des oxydes ainsi que d'élaborer des couches composites.

III.3.1 Avantages et inconvénients de la projection arc-fil

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

- Un procédé économique : la puissance électrique est de l'ordre de 5 à 10 kW et le gaz utilisé comme gaz d'atomisation est généralement de l'air comprimé ;
- Un taux de dépôt élevé : 5- 40 kg/h ;
- Un rendement énergétique important : 60 à 70 % de la puissance électrique fournie est

utilisée pour fondre les fils ;

- Avec un fil plein le matériau projeté est complètement fondu ;
- Il n'est généralement pas nécessaire de refroidir le substrat ($T_{substrat}$ =100-200°C).

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

- Un jet de particules divergeant qui se traduit par une tache d'impact sur le substrat relativement large (25 à 50mm de diamètre à 100mm de la sortie torche) ;
- Des dépôts présentant une porosité (de l'ordre 10%) et une teneur en oxyde (jusqu'à 25%) relativement élevées par rapport aux dépôts obtenus avec les autres techniques de projection thermique ;
- Une perte des composants les plus volatils du fait de la température de l'extrémité des fils très au-delà de la température de fusion. **[4]**

III.4 Le polissage

Après l'enrobage, les échantillons ont subi un polissage mécanique comportant trois stades:

III.4.1 Le polissage grossier

Cette opération s'effectue manuellement avec des disques tournants en carbures de silicium (papiers abrasifs de 280, 400 et 1200), à l'eau courant comme un lubrifiant. La figure III.5 montre la polisseuse utilisée au niveau de laboratoire de SDM.



Figure III.6 : Polisseuse utilisé au cours de notre étude **[9]**.

III.4.2 Le polissage de finition

Un polissage de finition très fin avec une poudre d'alumine Al_2O_3 ayant une granulométrie de 0.3µm, en suspension sur un tissu en soie.

La figure III.6 représente la polisseuse de finition utilisée.



Figure III.7: Papiers abrasifs (280, 400 et 1200) utilisé au cours de notre étude **[9].**



Figure III.8: Polisseuse de finition utilisé au cours de notre étude **[9].**

III.4.3 Analyse micrographique

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon.

L'observation micrographique des échantillons est effectuée a l'aide d'un microscope optiquede type NEOPHOT 32.

A. Microscope optique

Un microscope métallographique de type NEOPHOT 32 à été utilisé pour l'observation de nos revêtements, avec un grandissement qui varie de 100 à 1000.

Ce microscope est munid'une caméra numérique permettant le transfert des images vers un PC.

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

La figure III.8 représente le Microscope optique utilisée.



Figure III.9 : Photographie de microscope optique utilisé au cours de notre étude **[9].**

III.5 La corrosion :

Evans puis Wagner et Traud sont les premiers à avoir défini la corrosion en présence d'une phase liquide, comme un processus d'électrochimique.

La corrosion d'un matériau est la dégradation de celui-ci ou de ses propriétés mécanique sous l'effet de l'environnement immédiat qui peut être le sol, l'atmosphère, l'eau ou d'autres fluides.

Compte tenu du nombre important de paramètres intervenant dans le processus électrochimique, la corrosion est un phénomène très complexe.

La corrosion peut être vue sous sa forme globale comme une réaction spontanée d'échange d'électrons à l'interface métal/environnement.

C'est un phénomène naturel qui tend à faire retourner les métaux à leur état d'oxyde par une attaque plus ou moins rapide du milieu corrosif.

Nous nous intéresserons essentiellement dans ce chapitre à la corrosion aqueuse (corrosion électrochimique) car c'est l'un des phénomènes les plus importants qui correspond en outre au processus de corrosion de l'acier X52.

Son existence est conditionnée par la présence simultanée en surface du métal de zones cathodiques et anodiques.

Ces zones peuvent subir des réactions d'oxydation et de réduction lorsqu'elles sont en contact avec une solution électrolytique conductrice d'ions.

Cette forme de corrosion est due à la formation de micro-piles à l'intérieur du métal lui-même.

Il existe deux types de réaction électrochimique (réaction d'oxydo-réduction) :

- Réaction chimique directe : métal plongé dans une solution.
- Pile électrochimique : apparition d'un courant entre deux électrodes lorsqu'on les réunit. **[10]**

a) La protection par revêtement métallique ou organique

Il s'agit de la protection passive.

En effet elle est constituée par le revêtement extérieur dont le rôle est de créer un effet de barrière électrique entre le métal des canalisations et le milieu environnant.

Ce revêtement ne constitue cependant pas une protection absolue et définitive en raison des imperfections ou blessures susceptibles de se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage.

C'est pourquoi on maîtrise ces risques potentiels par l'installation d'une protection active complémentaire.

b) Le Décapage :

Avant d'effectuer toute procédure de revêtement il est important d'effectuer une préparation de surface du métal à protéger de façon à ce que le revêtement soit adhérent.

Dans le domaine du transport des hydrocarbures par canalisation, en général les tronçons de conduite utilisée sont recouverts de corps gras destinés à éviter toute forme de corrosion durant leurs stockages.

Le décapage est donc un moyen permettant de débarrasser le métal de cette couche. Ainsi on peut réaliser un décapage par voie mécanique (on utilise les procédés suivant :- Le sablage et le brossage) ou chimique (on utilise lors de cette opération des inhibiteurs de décapage (certains aldéhydes et alcools) qui empêche par adsorption la pénétration de l'hydrogène dans le métal.

III.6 Essai de dureté

La dureté est une propriété intrinsèque dépendant essentiellement de la nature, la composition chimique et la structure du matériau.

Elle consiste à définir la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un poinçon, par exemple une bille en acier trempé (dureté Brinell) ou une pyramide en diamant (dureté Vickers). S'il y résiste bien, il est dit dur, sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.

Elle est désignée principalement par la lettre H, du mot Hardness en anglais.

III.6.1 Objectifs de l'essai

- Mettre en évidence l'essai de dureté,
- Savoir exploiter et utiliser le duromètre afin de mesurer les duretés des différents matériaux,
- Caractériser un matériau à partir de l'essai de dureté.

III.6.2 Définition du principe de l'essai

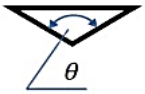
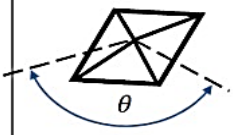
Il s'agit d'un ensemble d'essais les plus couramment pratiqués. Le principe est toujours identique,il consiste à produire une empreinte sur une surface d'un échantillon par opposition à un pénétrateur indéformable de formes différentes (tableau 1) soumis à un effort F, les conditions de charge et de vitesse d'application étant contrôlées.

La profondeur ou dimension de l'empreinte (indentation) résultante est mesurée et rapportée à un nombre de dureté. Plus le matériau est mou, plus l'empreinte est grande et profonde et plus le nombre d'indexation de la dureté est petit.

Les trois techniques les plus répandues sont ; la mesure selon Brinell, selon Vickers et selon Rockwell. Ces essais se distinguent essentiellement par la forme géométrique du pénétrateur (Brinell : une sphère ; Vickers : une pyramide de base quadratique, Rockwell B, Rockwell, ect.) (Tableau 1). L'ensemble de ces essais ont l'avantage d'être plus simples à réaliser et de donner des résultats reproductibles.

Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles, ils sont très utilisés en contrôle qualité pour comparer ou estimer la résistance ou la rigidité des matériaux **[11]**

Tableau III.1 : Différentes méthodes d'essai de dureté. **[11]**

Pénétrateur	Brinell	Rockwell		Vickers
Nature	Acier trempé ou carbure de tungstène	Diamant	Acier trempé	diamant
Forme	sphère	cône	Sphère	Pyramide à base carrée
Dimensions	 D=10mm ; 5mm ; 2,5 mm ;1mm.	 $\theta = 120°$	 D=1,587 mm D=3,175 mm	 $\theta = 136°$

III.6.3 Machines d'essai et éprouvettes :

Les duromètres disponibles au laboratoire de l'unité de fonderie sont du type représenté dans la Figure III.9. Les éprouvettes peuvent être fabriquées à partir de différents métaux et alliages, et elles peuvent prendre différentes formes telles que carrées ou cylindriques avec des rayons variés (10, 15, 20, 25, 30 mm). Leur hauteur doit être d'au moins 15 mm afin de pouvoir les tenir avec les doigts.

Avant de pouvoir les utiliser sur le duromètre, les surfaces des échantillons doivent être polies et nettoyées **[11]**.



Figure III.10: Machine universelle d'essai de dureté Brinell utilisée au cours de notre étude. **[12]**

Chapitre IV

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1 Introduction :

L'objectif principal de notre étude est d'obtenir un dépôt d'acier inoxydable dense présentant à la fois une résistance élevée à la fatigue thermique pour protéger le substrat et de bonnes propriétés mécaniques.

Pour cela, il est crucial que le dépôt soit peu poreux et contienne une faible quantité d'oxydes, car ces derniers sont généralement néfastes pour l'adhérence du dépôt sur la pièce à protéger.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la caractérisation de nos dépôts obtenus par projection thermique.

Nous avons choisi de mettre l'accent de corrosion ainsi que sur leur micrographie, notamment dans l'interface entre le substrat et le dépôt.

IV.2 Matériaux de l'étude :

IV.2.1 Le matériau de revêtement :

Dans cet ouvrage, il existe un type de fil d'un diamètre de 1,6 mm : le fil d'acier inoxydable, et ce fil SM8297 est gravé de l'intérieur et contient des composants que nous citerons dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Composition chimique en pourcentage massique du fil fourre SM8297.

Fe	Wc	Cr	TiC	Ni	B	Si
Bal	26	13	6	6	2	1

IV.2.2 Le matériau de base (le substrat) :

Le substrat est en acier 42CrMo4, sa composition chimique est donnée dans le tableau IV.2, il correspond à l'acier hypoeutectoïde composé d'une grande quantité de perlite.

Un acier hypoeutectoïde est un acier dont la teneur en carbone est inférieure à 0.8%.

Il est constitué de ferrite (α) et de perlite ($\alpha + Fe_3C$).

La perlite se présente sous forme de lamelles aux joints de grains de la ferrite.

De faibles additions de chrome et de molybdène sont ajoutées à l'acier, elles réduisent le pourcentage de la ferrite et augmentent la teneur en perlite.

L'affinité du carbone au chrome et au molybdène favorise la formation de la cémentite.

Cet acier est un acier faiblement allié et aucun des éléments d'additionajoutés ne dépasse 5% en masse, la désignation normalisée de ce type d'acier est lasuivante : 42CrMo4

Tableau IV.2 : Composition chimique (% en poids) du métal de base (42CD4).

C	Cr	Mo	Si	P	S	Mn
0,42	0,90	0,4	0,4	0,035	0,035	0,15

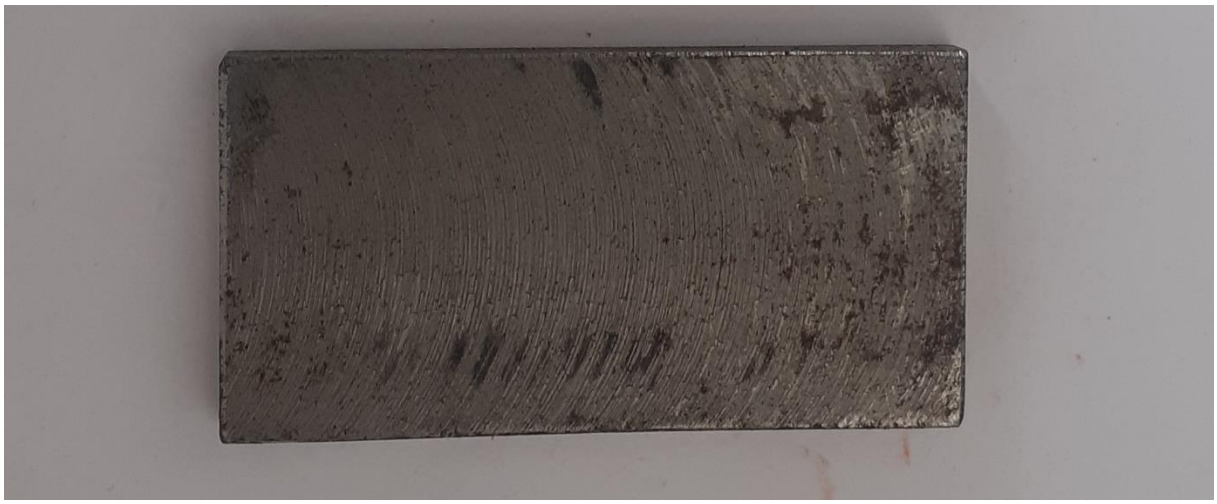


Figure IV.1 : Matériau de base (substrat) des dimensions (50×25×4) utilisé.

L'acier 42CrMo4 a été revêtu de molybdène par projection thermique à l'arc électrique.

Avant la projection, le substrat est dégraissé et sablé avec du carbure de silicium pour améliorer la morphologie de surface, ce qui augmenterait l'adhésion mécanique du revêtement.

De fil fourré de SM8297 ont été déposés sur de l'acier 42CrMo4 (d'une épaisseur de 4mm) en appliquant des conditions industrielles de projection à l'arc électrique dans les tableaux suivants :

Série–A (4 Couches)

Tableau IV.3 : Conditions de projection thermique à l'arc électrique de Série–A.

Paramètre	Valeurs
Tension (V)	29.3
Le courant (A)	148.7
Pression gaz, air (Bar)	4.8
Distance de projection (mm)	130
Vitesse superficielle(mm/s)	200
La rugosité Ra moyenne (µm)	14.76

Série – B (3 Couches)

Tableau IV.4 : Conditions de projection thermique à l'arc électrique de Série–B.

Paramètre	Valeurs
Tension (V)	29.8
Le courant (A)	157.7
Pression gaz, air (Bar)	5.1
Distance de projection (mm)	130
Vitesse superficielle(mm/s)	200
La rugosité Ra moyenne (µm)	14.76

Série – C (2 Couches)

Tableau IV.5 : Conditions de projection thermique à l'arc électrique de Série–C.

Paramètre	Valeurs
Tension (V)	29.7
Le courant (A)	159.4
Pression gaz, air (Bar)	4.8
Distance de projection (mm)	130
Vitesse superficielle(mm/s)	200
La rugosité Ra moyenne (µm)	14.76

Le nombre d'échantillons utilisé dans le travail expérimental est 14.

Les dimensions d'échantillons est : 5 échantillons de (50×25×4mm) et 9 échantillons de (3×25×4mm)

Pour obtenir des résultats significatifs, il est important d'utiliser un nombre suffisant d'échantillons pour minimiser les erreurs aléatoires. Le nombre d'échantillons nécessaires peut varier en fonction de la complexité de l'expérience, des objectifs de l'étude, de la variabilité du système et de la précision souhaitée.

IV.3 Techniques d'analyses

Tout à fait, Avant de procéder à toute analyse structurale, observation morphologique ou essai mécanique, il est important de préparer les échantillons métallographiques correctement. La préparation métallographique implique plusieurs étapes, notamment la découpe de l'échantillon à la taille et à la forme souhaitée, la préparation de la surface, le polissage pour éliminer les rayures et les défauts de surface, l'attaque chimique pour révéler les microstructures et la microscopie pour l'observation et l'analyse.

La qualité de la préparation métallographique peut avoir une incidence importante sur les résultats des analyses et des essais. Une préparation incorrecte peut entraîner des artefacts, des dommages à la structure de l'échantillon et des résultats incorrects. Par conséquent, il est

important de suivre les protocoles de préparation métallographique établis et de vérifier régulièrement la qualité de la préparation à l'aide de techniques de contrôle qualité appropriées.



Figure IV.2 : Balance électronique utilisée.



Figure IV.3 : Palmer utilisé au cours de notre étude.

IV.3.1 Préparation métallographique

Pour obtenir une surface polie prête pour toute caractérisation, il faut suivre les étapes suivantes :

1. Tronçonnage,
2. Enrobage,
3. Pré polissage avec du papier abrasif à base de carbure de silicium de différentes granulométries allant du Nº240 à Nº1200,
4. Polissage de finition qui se réalise avec une pate diamantée sur un drap en velours.

- **Tronçonnage**

Le tronçonnage est une étape de la préparation métallographique qui consiste à découper l'échantillon à la taille et à la forme souhaitées en utilisant une scie de tronçonnage. Cette étape est essentielle pour préparer l'échantillon pour les étapes suivantes de la préparation métallographique, telles que le meulage et le polissage. Le tronçonnage peut être effectué à l'aide d'une scie à ruban, d'une scie circulaire ou d'une scie diamantée, en fonction de la taille et de la forme de l'échantillon et des exigences de l'analyse à effectuer. Le choix de l'outil de tronçonnage dépend également de la dureté et de la nature du matériau de l'échantillon.



Figure IV.4 : Tronçonnage des échantillons à l'aide d'une scie mécanique.

- **Enrobage**

L'enrobage est une étape de la préparation métallographique qui consiste à incorporer l'échantillon dans une résine ou un polymère durci pour faciliter le meulage et le polissage.

Cette étape permet de protéger l'échantillon contre les dommages et les déformations lors de la manipulation, ainsi que de maintenir l'intégrité de la surface à analyser.

L'enrobage est souvent nécessaire pour les échantillons fragiles ou pour ceux qui ont des formes et des tailles difficiles à manipuler. Les matériaux couramment utilisés pour l'enrobage incluent les résines époxy, les acryliques et les polyesters.

L'enrobage peut être réalisé en utilisant un moule ou une capsule, dans lesquels l'échantillon est placé avant d'être rempli de la résine. Une fois la résine durcie, l'échantillon est ensuite découpé à la taille souhaitée pour l'analyse.

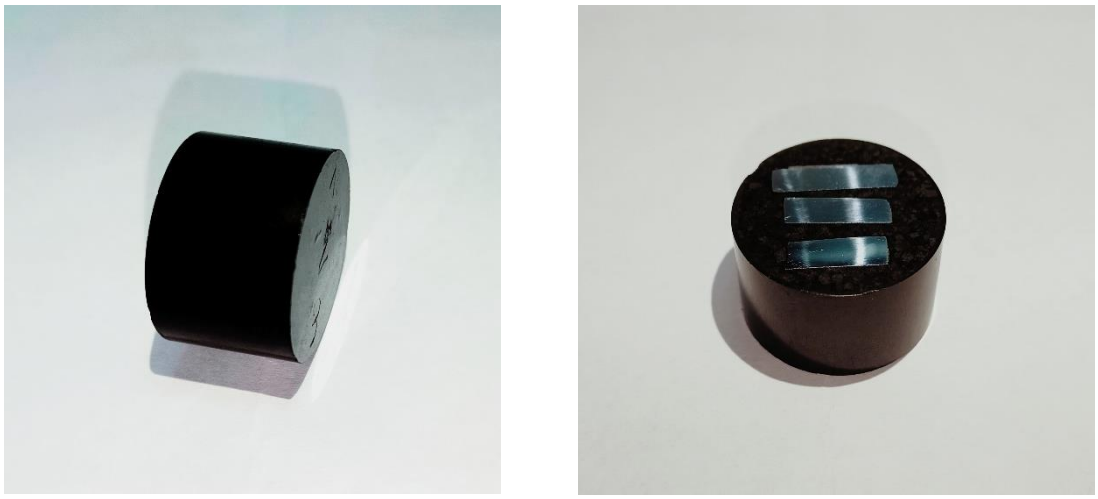


Figure IV.5 : Echantillons enrobés.

- **Le pré-polissage:**

Le pré-polissage est une étape dans le processus de polissage qui implique l'utilisation d'un abrasif plus grossier pour enlever les rayures, les marques et les imperfections plus importantes sur une surface avant de passer à des abrasifs plus fins pour obtenir un polissage plus fini.

Cette étape est particulièrement importante pour les métaux où il est nécessaire de retirer une couche de matériau pour obtenir une surface lisse et brillante. Les abrasifs utilisés pour le pré-polissage sont généralement plus grossiers que ceux utilisés pour le polissage final. Cette étape est essentielle pour obtenir un résultat de polissage final de haute qualité



Figure IV.6: Pré-polissage de l'échantillon.

- **Le polissage de finition :**

Le polissage de finition est la dernière étape du processus de polissage qui consiste à utiliser des abrasifs très fins pour obtenir une surface lisse et brillante sur l'échantillon. Cette étape vise à éliminer les rayures et les marques laissées par les abrasifs plus grossiers utilisés lors du pré-polissage et à rendre la surface de l'échantillon aussi uniforme que possible.

Le polissage de finition peut être réalisé manuellement ou à l'aide d'une machine de polissage, en utilisant des abrasifs de plus en plus fins jusqu'à ce que le résultat souhaité soit atteint. Les abrasifs utilisés pour le polissage de finition sont généralement très fins, comme la pâte à polir, l'oxyde de cérium.



Figure IV.7: Polissage de finition de l'échantillon.

IV.4 Observations en microscopie optique des multi matériaux :

L'observation au microscope de multi matériau 42CrMo4/SM8297 nous a permis de voir l'évolution de l'interface dépôt /substrat suivant le nombre de cycles.

Nous ne reportons que les micrographies des Figures IV.10 et IV.11 et IV.12 révèlent une structure lamellaire des dépôts élaborés par projection thermique.

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

La figure IV.8 représentent des échantillons qui contiennent chacun **04 Couches.**

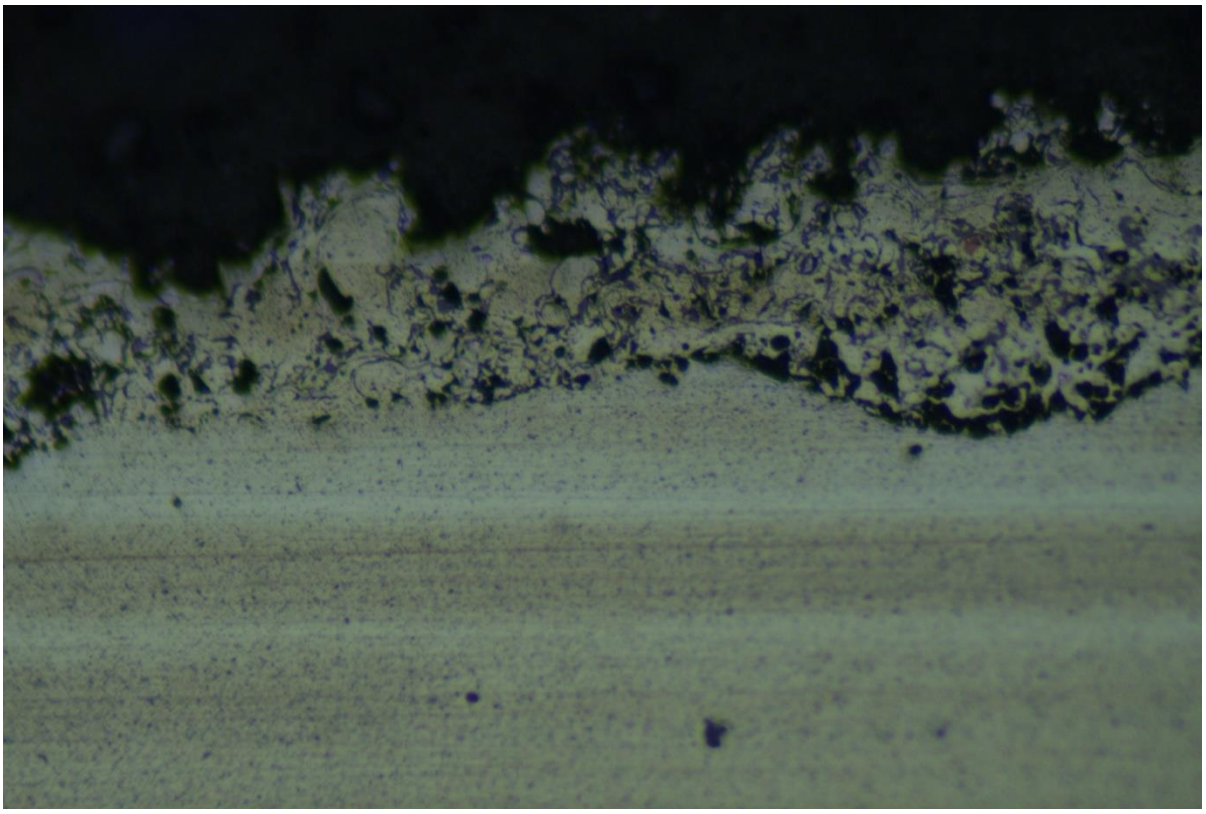


Figure IV.8: Micrographie du multi matériau 42CrMo4/SM8297 (Echantillon de 04 Couches).

Les deux figures IV.9 représentent des échantillons qui contiennent chacun **03Couches.**

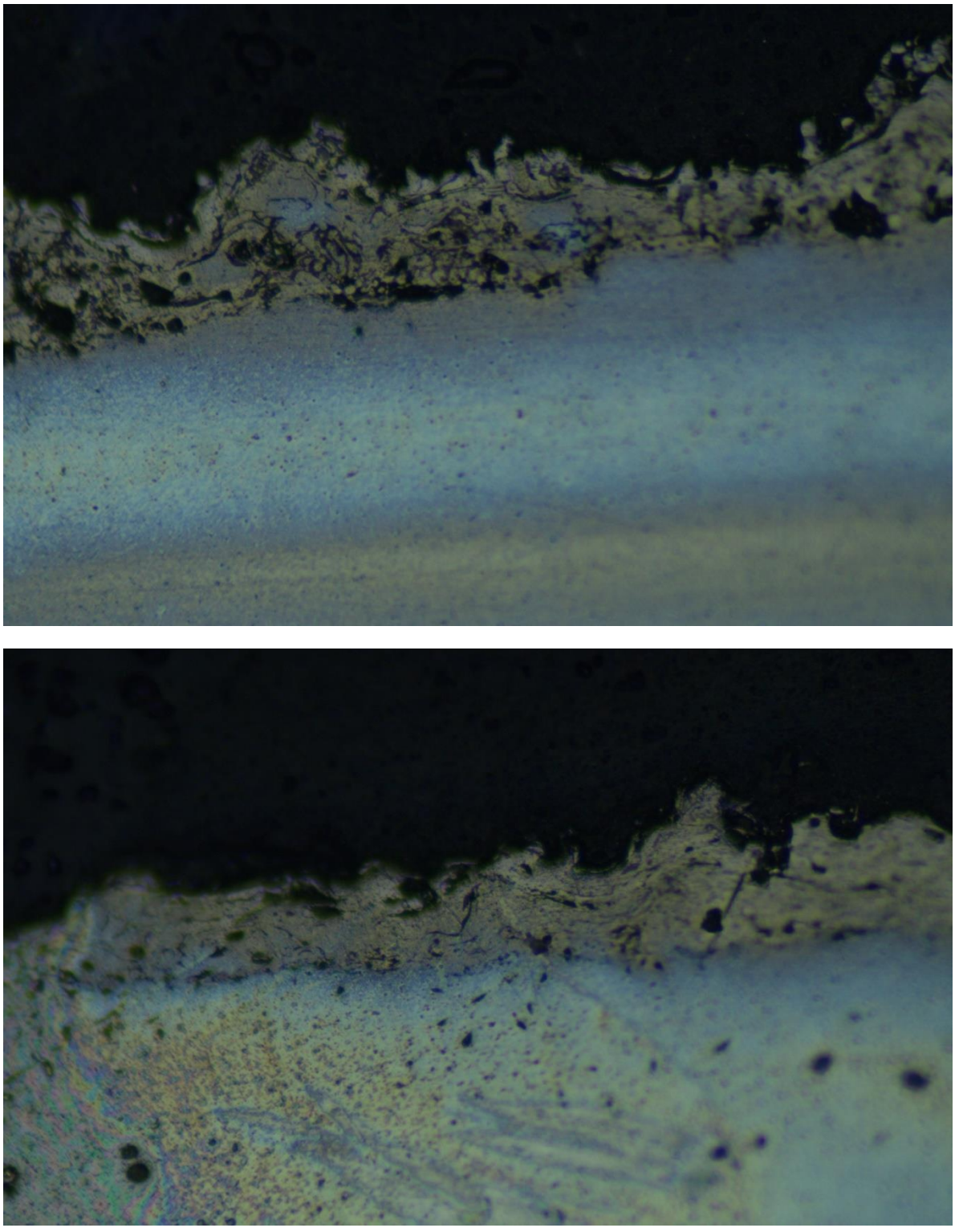


Figure IV.9: Micrographie du multi matériau 42CrMo4/SM8297 (Echantillon de 03 Couches).

Les deux figures IV.10 représentent des échantillons qui contiennent chacun **02 Couches.**

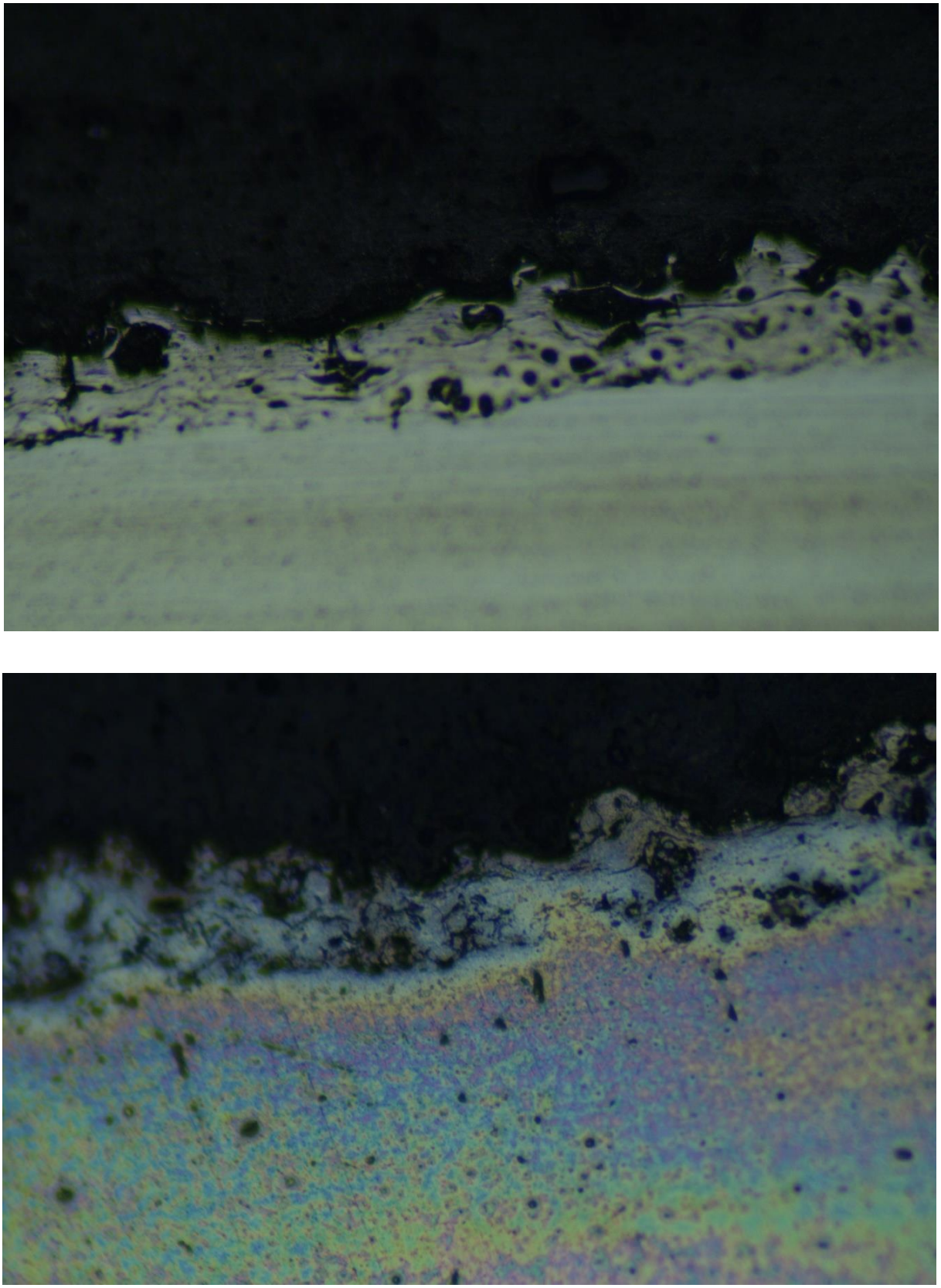


Figure IV.10: Micrographie du multi matériau 42CrMo4/SM8297 (Echantillon de 02 Couches).

IV.5. Interprétations des figures précédemment

Il est intéressant de noter que d'après les figures (IV.8 ; IV.9 ; IV.10), Nous avons observé une bonne adhérence entre le métal d'apport SM8297 et le substrat 42CrMo4. Une bonne adhérence est essentielle pour assurer l'intégrité du revêtement et pour garantir une performance optimale. Cela signifie que le revêtement a été correctement lié au substrat, ce qui est encourageant.

Cependant, nous avons également remarqué la présence de beaucoup de porosité. La porosité est la formation de petites cavités ou de trous dans le matériau. Elle peut être problématique car elle peut affaiblir le revêtement en créant des points de faiblesse où la corrosion peut se développer plus facilement. La porosité peut également réduire les propriétés mécaniques du revêtement, notamment sa résistance et sa dureté.

Il serait intéressant d'analyser la cause de cette porosité. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à sa formation, tels que la préparation de la surface, les paramètres de projection thermique, la composition des matériaux utilisés, etc. Il est important d'identifier la source de la porosité afin de prendre les mesures nécessaires pour la réduire ou l'éliminer.

Il peut être utile d'effectuer une caractérisation plus approfondie des échantillons, par exemple à l'aide de techniques d'imagerie avancées telles que la microscopie électronique à balayage (MEB) ou la tomographie. Cela pourrait fournir une meilleure compréhension de la structure du revêtement et de la nature de la porosité observée.

En résumé, bien que nous ayons constaté une bonne adhérence entre le métal d'apport SM8297 et le substrat 42CrMo4, la présence de porosité est un aspect préoccupant qui mérite une attention particulière. Une analyse plus approfondie et une optimisation des paramètres de projection thermique pourraient être nécessaires pour améliorer la qualité du revêtement et réduire la porosité.

IV.6 Test de corrosion :

Un test de corrosion à l'acide chlorhydrique (HCl) est un type de test de corrosion utilisé pour évaluer la résistance des matériaux à la corrosion causée par l'exposition à des solutions d'acide chlorhydrique.

Ce test est couramment utilisé pour évaluer la résistance de l'acier inoxydable et des revêtements.

Le test de corrosion à l'acide chlorhydrique peut être effectué de différentes manières, mais la méthode courante est le test de corrosion cellulaire.

Dans ce test, l'échantillon est placé dans une solution d'acide chlorhydrique avec une certaine concentration, et nous avons pris 6 ml d'acide chlorhydrique avec une concentration de 33% et mélangé 6 ml avec 100 ml d'eau.

Puis les morceaux sont maintenus à l'intérieur de la solution à une température de 25°C pendant une durée de 24 heures.

La quantité de corrosion qui se produit dans l'échantillon est mesurée à intervalles réguliers.

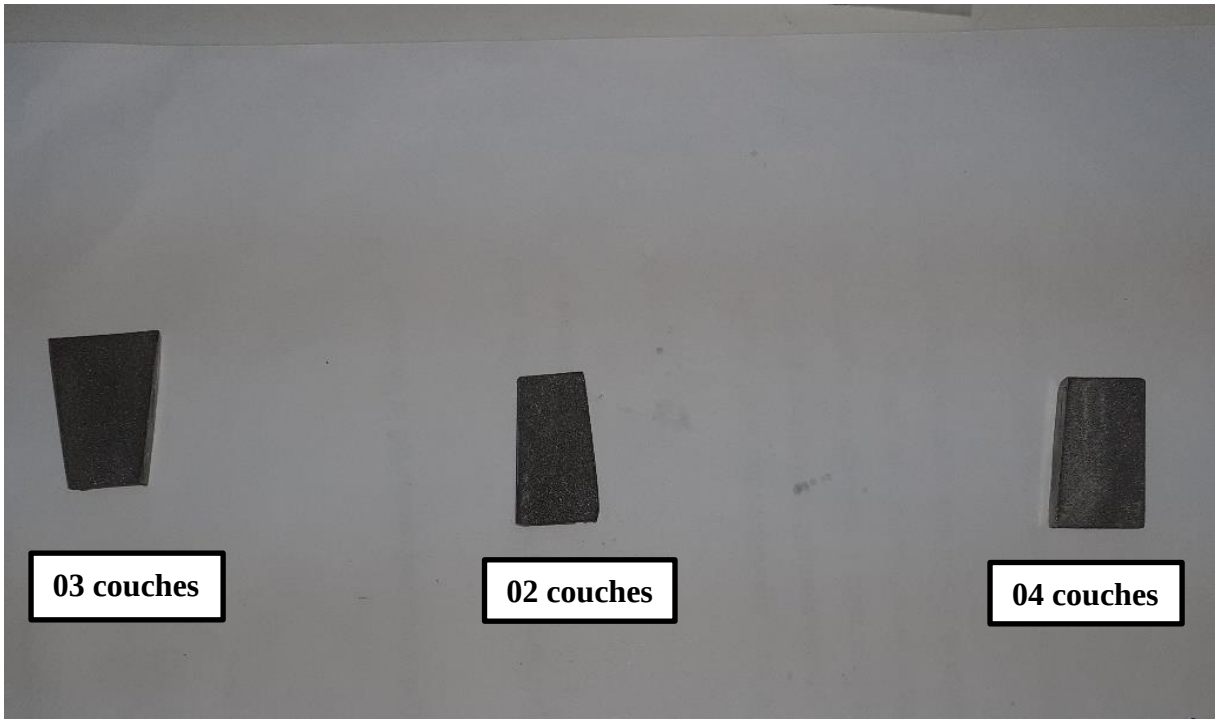


Figure IV.11 : Echantillon revêtu avant qu'il ne soit placé dans la solution HCl.

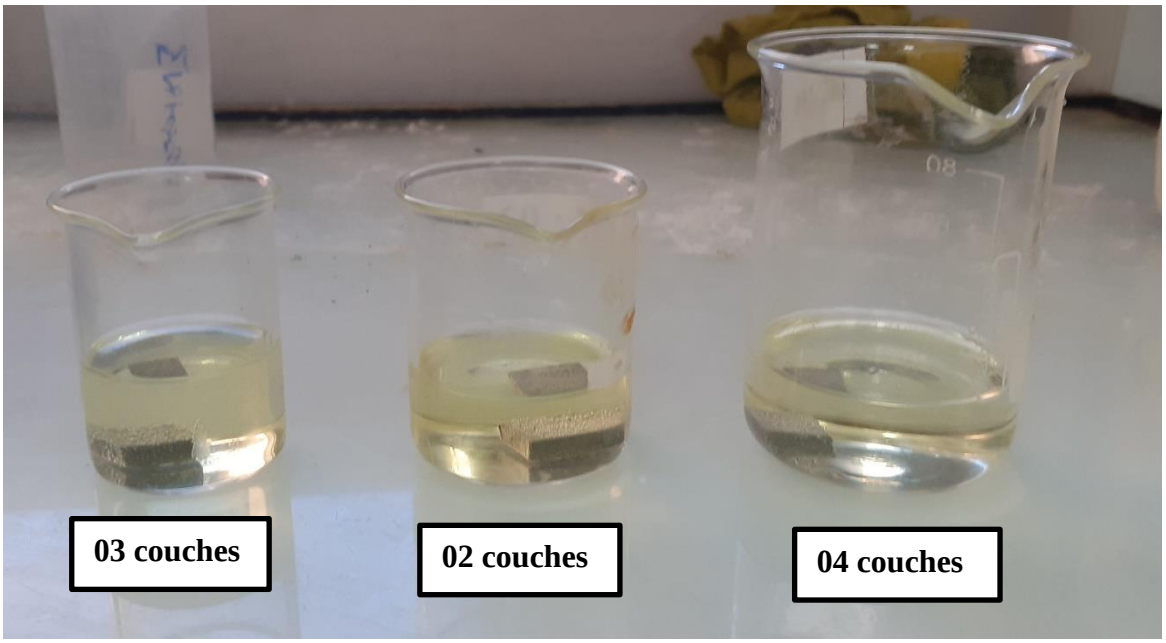


Figure IV.12 : Les échantillons à l'intérieur de la solution HCl

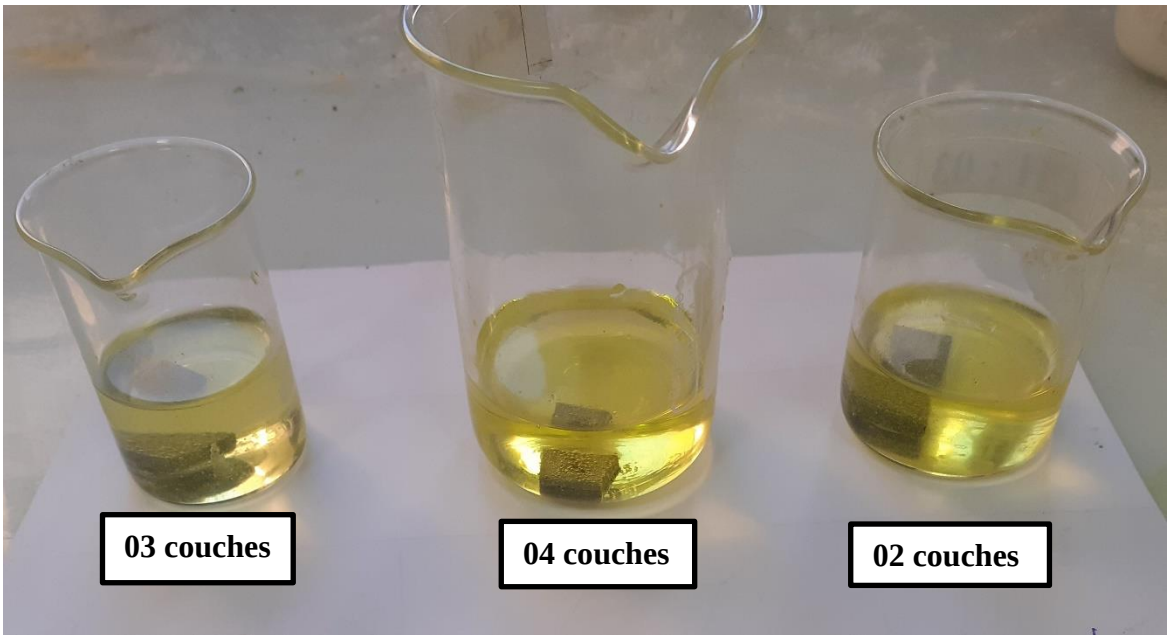


Figure IV.13 : Changement de couleur de la solution HCl après 24 heures.

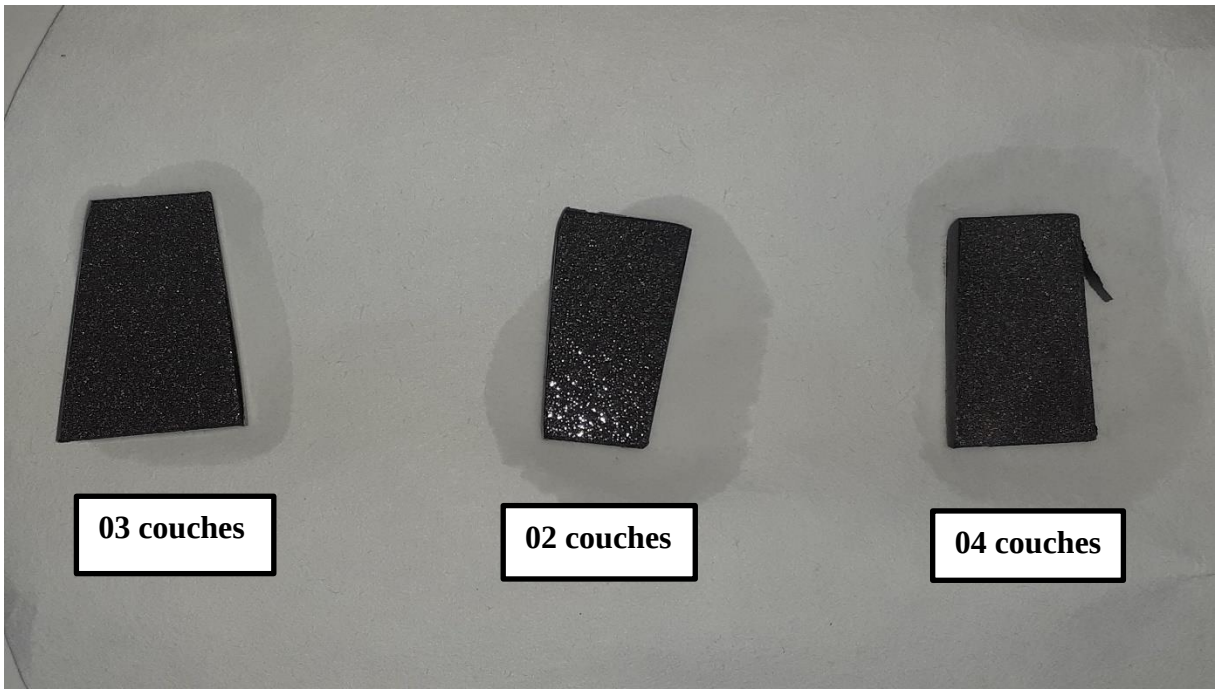


Figure IV.14 : Les échantillons prélevés après leur immersion de 24 heures dans une solution HCl.

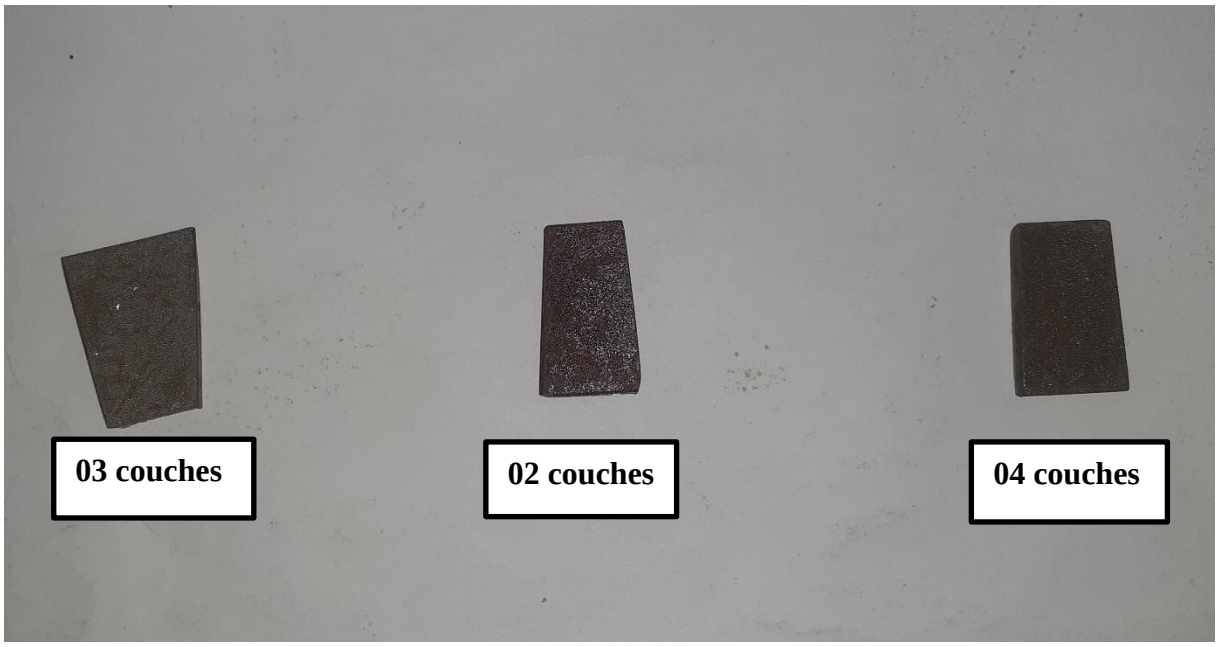


Figure IV.15 : Changement de couleur de l'échantillon après 24 heures à l'air.

IV.6.1 Interprétation du résultat

Il est intéressant de noter les résultats que nous avons observés lors du test de corrosion en utilisant une solution acide HCl sur les échantillons à deux, trois et quatre couches de revêtement.

D'après nos observations sur les figures (IV.11 à IV.15), nous avons constaté que l'échantillon contenant deux couches de revêtement se corrode davantage que l'échantillon à trois couches, et que l'échantillon à trois couches se corrode davantage que l'échantillon à quatre couches.

Ces résultats indiquent une tendance inverse à celle attendue. Normalement, on s'attendrait à ce que plus le nombre de couches de revêtement est élevé, meilleure est la protection contre la corrosion. Cependant, dans votre cas, il semble y avoir une diminution de la résistance à la corrosion à mesure que le nombre de couches de revêtement augmente.

Plusieurs facteurs pourraient expliquer cette observation. Voici quelques possibilités :

1. Préparation de surface inadéquate : Une préparation de surface insuffisante peut entraîner une mauvaise adhérence entre les couches de revêtement, ce qui peut compromettre la protection contre la corrosion.
2. Porosité accrue : Lorsque plusieurs couches de revêtement sont appliquées, il y a une probabilité plus élevée de formation de porosité entre les couches. La porosité peut fournir des voies de pénétration pour les agents corrosifs, entraînant une corrosion accrue.
3. Interactions entre les couches : Les interactions chimiques ou électrochimiques entre les différentes couches de revêtement pourraient affecter la résistance à la corrosion de manière inattendue.

IV.7 Essai de dureté Rockwell (HRC)

L’essai consiste à mesurer en deux étapes la profondeur rémanente de l’empreinte laissée par un pénétrateur, bille d’acier ou cône de diamant, dans le matériau à tester en appliquant deux charges d’intensité F0 et F1 en trois étapes (F0, F0 + F1 + F0).

La dureté, dans ce cas, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d’une longueur d’enfoncement d’un pénétrateur.

Une précharge (F0) permet de faire une empreinte initiale en vue d’éliminer les incertitudes propres aux défauts de surface.



Figure III.16 : Eprouvette dans l'appareil d'essai de dureté.



Figure IV.17 : Lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur.

IV.6.1 Expression des résultats

Les résultats sont exprimés en KgF

Tableau IV.6 : Résultats de la dureté rockwell en fonction de nombre de couches.

L'échantillon	Sans couche	Deux couche	Trois couche	Quatre couche
Dureté Rockwell (HRC) (KgF)	21	23	38	46

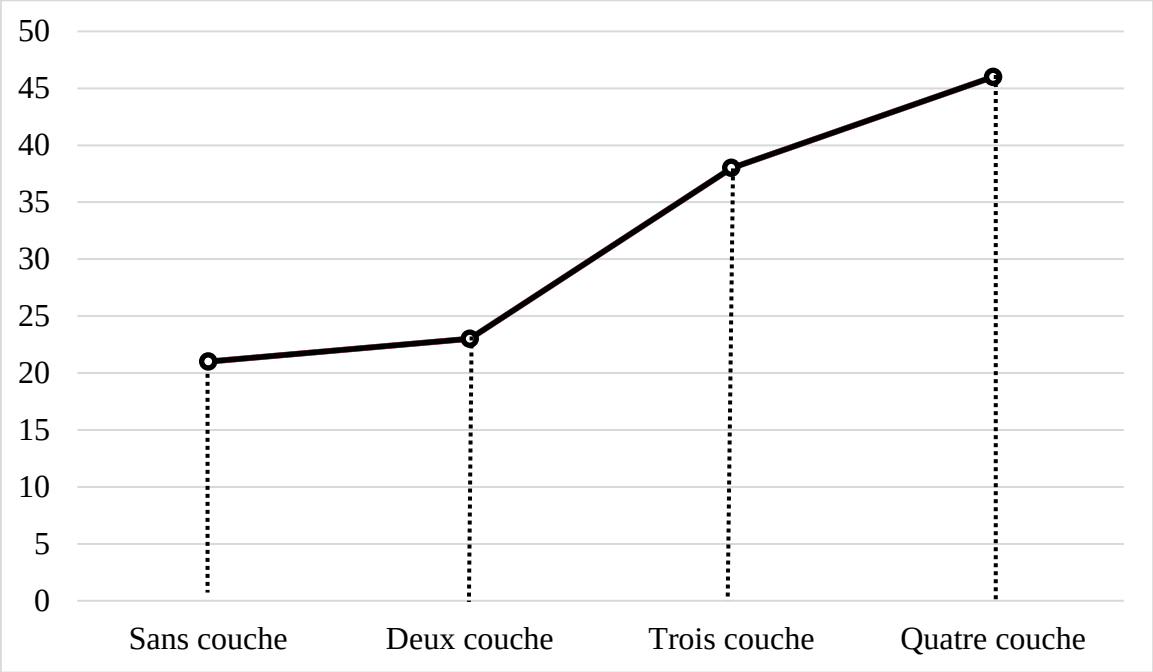


Figure IV.18 : La dureté Rockwell en fonction de nombre de couches.

IV.6.2 Interprétation :

Les résultats de l'essai de dureté que nous avons effectué sur les échantillons à différentes couches de revêtement sont présentés dans le tableau IV.5 et la figure IV.18. Les valeurs de dureté Rockwell sont exprimées en KgF et les échantillons sont comparés à un échantillon sans revêtement.

Voici les résultats que vous avez obtenus :

- Échantillon sans couche : Dureté Rockwell de 21 KgF (HRC).

- Échantillon à deux couches : Dureté Rockwell de 23 KgF (HRC).
- Échantillon à trois couches : Dureté Rockwell de 38 KgF (HRC).
- Échantillon à quatre couches : Dureté Rockwell de 46 KgF (HRC).

D'après ces résultats, il est clair que l'ajout de couches de revêtement augmente considérablement la dureté des échantillons. Plus précisément, vous observez une augmentation progressive de la dureté à mesure que le nombre de couches de revêtement augmente.

Cela est généralement cohérent avec les attentes, car le revêtement peut apporter une augmentation de la dureté superficielle du matériau de base. Les couches de revêtement peuvent être plus dures que le matériau de base lui-même, ce qui contribue à une augmentation de la dureté totale de l'échantillon.

En résumé, les résultats de l'essai de dureté indiquent une augmentation de la dureté Rockwell à mesure que le nombre de couches de revêtement augmente. Cela démontre l'effet positif du revêtement sur la dureté de l'échantillon.

Conclusion général

Conclusion générale

À la lumière des résultats obtenus dans notre partie expérimentale, voici une conclusion générale que nous pouvons tirer :

L'objectif de notre étude était d'évaluer les performances d'un revêtement par projection thermique d'acier inoxydable SM8297 sur un acier faiblement allié 42CrMo4. Nous avons examiné la qualité du revêtement en termes d'adhérence, de présence de porosité, de résistance à la corrosion et de dureté. Voici les conclusions générales que nous pouvons citer :

1. Adhérence : Les micrographies ont montré une bonne adhérence entre le métal d'apport SM8297 et le substrat 42CrMo4. Cela indique que le processus de projection thermique a réussi à assurer une liaison solide entre les deux matériaux.

2. Porosité : Les images ont révélé la présence de porosité dans les revêtements. La porosité peut potentiellement affecter la performance du revêtement en créant des sites de faiblesse pour la corrosion et en réduisant les propriétés mécaniques. Une attention particulière doit être accordée pour réduire la porosité et améliorer la qualité du revêtement.

3. Résistance à la corrosion : Les échantillons à deux couches, trois couches et quatre couches ont été soumis à un test de corrosion en utilisant une solution acide HCl. Contre-intuitivement, nous avons observé que l'échantillon à deux couches se corrode davantage que l'échantillon à trois couches, et que l'échantillon à trois couches se corrode davantage que l'échantillon à quatre couches. Ces résultats nécessitent une analyse plus approfondie pour comprendre les facteurs sous-jacents responsables de cette tendance inverse à la normale.

4. Dureté : L'essai de dureté a montré une augmentation progressive de la dureté Rockwell à mesure que le nombre de couches de revêtement augmente. Les échantillons à trois et quatre couches ont affiché une dureté supérieure à celle de l'échantillon sans revêtement, indiquant un effet bénéfique du revêtement sur la dureté de la surface.

En conclusion, notre étude a démontré une bonne adhérence du revêtement de projection thermique entre l'acier inoxydable SM8297 et l'acier faiblement allié 42CrMo4. Cependant, la présence de porosité dans les revêtements et les résultats contradictoires observés en termes de

résistance à la corrosion nécessitent une analyse plus approfondie et des améliorations potentielles du processus de projection thermique. Malgré cela, les couches de revêtement ont contribué à une augmentation de la dureté de la surface. Ces résultats fournissent des informations importantes pour l'optimisation des paramètres de projection thermique et la recherche de solutions visant à améliorer la qualité et la performance du revêtement dans des applications réelles.

LA LISTE DES RÉFÉRENCES

[1] Dr Y. Mebdoua & Dr Lahmar, Responsable de la plateforme PTh, CDTA

[2] Les coures de Mr S.Benimam, Université de Médéa, 2023 2.

[3] Mémoire de Doctorat en sciences (Rechargement des pièces usées par molybdène. Influence et optimisation des paramètres de rechargement par molybdène), A. Benmokhtar, Décembre 20203.

[4] Mémoire d'Ingénieur (comportement en cycles thermiques de l'interface des multimateriaux 25CrMo4/75E/55E et 30NiCr11/75E/55 realises par projection thermique.), N. KECHOUD, juin 2010

[5] Mémoire de Doctorat (CONTRIBUTION A L'ETUDE DU PROCEDE ARC-FIL POUR LA REALISATION DE DEPÔTS METALLIQUES DURS RESISTANTS A L'USURE ABRASIVE), S. NOUROUZI, novembre 2004

[6] Centre de développement des technologies avancées, Baba hassen, alger

[7]https://www.otelo.fr/waroot/OTFR/fr_FR/attachments/Ficheconseil/2872_sablage.pdf

[8] Mémoire de MASTER en sciences (Revue sur les procédés de revêtement par projection thermique), R. BACHIR /Z. ZAKARIYA, Juin 2020.

[9] Labo matériaux de université Yahia farés de Médéa.

[10] S.BENSAADA, COURS DE CORROSION, Université Mohamed Khider de Biskra, 2016

[11] Dr. G. BELHI, Polycopie de Résistance des matériaux, Université de Biskra, 2017.

[12] Laboratoire d'essai mécanique de l'unité fonderie de l'entreprise POVAL SPA à Berrouaghia.