



---

Département de Génie Mécanique  
**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme de :

**MASTER**

En Génie Mécanique

**Option : Génie Des Matériaux**

Présenté par :

**ROBEI BACHIR & ZOUBIRI ZAKARIYA**

**Thème :**

---

---

**Revue sur les procédés de revêtement par projection  
thermique**

---

---

Devant le jury composé de :

<b>NOM et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Saib Cherif	MCB	Président
Menasri Noureddine	MCA	Encadreur
Amroune Salah	MCA	Examineur

*Session : Juin 2020*

*Année Universitaire: 2019/2020*

## **Remerciements**

---

**T**out d'abord, nous remercions **ALLAH**, le tout puissant, pour m'avoir donné la santé, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de notre chemin, durant toutes nos années de vie.

Nous adressons nos chaleureux remerciement et nos profondes gratitude à monsieur **Menasri Noureddine**, enseignant à l'université de **M'silla** et le directeur de notre mémoire, d'avoir proposé et encadré ce sujet, et pour les efforts qu'il est déployé, et corriger avec une grande gentillesse durant toute cette période. Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements l'ensemble de membres jury qui ont acceptés d'évaluer et examiner notre travail. Pour leur encouragement, leur soutien moral et patience qu'ils m'ont manifestés durant nos études, nos vifs remerciements vont également à tous les membres de nos familles. Nous adressons un amical et collectif salut à tout nos collègues et amis.

Enfin, une pensée plein de reconnaissance à toutes personnes ayant collaboré à la réalisation de notre travail, de prés ou de loin

## *Dédicace*

*L'être que m'est le plus cher au monde, A celle qui m' tout donnée*

*Pour que je sois ce que je suis: Ma mère Celui qui fait tout son possible*

*Pour me Voir réussir dans ma vie : mon père*

*A mes très chers frères et ma chère sœur*

*A tous mes proches amis sans exceptionnel*

*A tous ceux qui me connaissent et qui*

*Ne me Connaissent pas de près et de loin*

*Zakarya*

*Dédicace*

*L'être que m' est le plus cher au monde, A celle qui m' tout donnée*

*Pour que je sois ce que je suis: Ma mère Celui qui fait tout son  
possible*

*Pour me Voir réussir dans ma vie : mon père*

*A mes très chers frères et ma chère sœur*

*A tous mes proches amis sans exceptionnel*

*Bachir*

---

## **La liste des figures**

---

### **Chapitre I**

<b>Figure-I.1:</b> (A) schéma général de diagramme procédés de revêtement par projection thermique ou (B) revêtement par projection thermique .....	12
<b>Figure-I.2 :</b> classification de processus de revêtement par projection thermique .....	13
<b>Figure-I.3 :</b> schéma du diagramme de processus d'arc plasma .....	13
<b>Figure-I.4:</b> comparaisons de transferts ou non transferts de processus d'arc plasma .....	15
<b>Figure-I.5:</b> schéma de diagramme de l'arc électrique procédé de pulvérisation .....	15
<b>Figure-I.6:</b> schéma de diagramme de(A) câble flamme où (B) produit flamme Prusse .....	17
<b>Figure-I.7:</b> schéma diagramme de Haute vélocité Oxyde pleine pression de pulvérisation (HVOF).....	17
<b>Figure-I.8:</b> Chalumeau classique à fil (à gauche) et à poudre (à droite) .....	20
<b>Figure-I.9:</b> Schéma de Principe du procédé HVOF .....	20
<b>Figure-I.10:</b> Schéma de principe d'un pistolet à arc électrique .....	22
<b>Figure-I.11:</b> Schéma de principe d'un pistolet plasma .....	23
<b>Figure-I.12:</b> Température d'utilisation et vitesse des particules des procédés de projection thermique .....	25
<b>Figure-I.13:</b> Buse de projection thermique a- à poudre. b- à fil .....	29
<b>Figure-I.14:</b> Schéma de principe de la projection thermique à la flamme (poudre ou fil) .....	29
<b>Figure-I.15:</b> Pistolet à poudre .....	31
<b>Figure-I.16:</b> Poste de métallisation à la flamme en fil (MEI).....	34

### **Chapitre II**

<b>Figure- II.1 :</b> pistolet de projection flamme-fil .....	42
<b>Figure- II.2:</b> les substrats avant le sablage .....	44
<b>Figure- II.3 :</b> les substrats durant le sablage .....	44

<b>Figure- II.4:</b> les substrats après le sablage .....	<b>44</b>
<b>Figure- II.5:</b> L'échantillon subi un polissage. ....	<b>45</b>
<b>Figure- II.6</b> Les étapes pratiques du procédé de projection flamme-fil .....	<b>47</b>
<b>Figure- II. 7</b> Echantillon de prélèvement de la micro-dureté des éléments enrobé .....	<b>50</b>
<b>Figure- II.8</b> Micro-dureté .....	<b>51</b>
<b>Figure- II.9</b> Microscope optique en transmission et réflexion OLYMPUS BH2 .....	<b>52</b>
<b>Figure- II.10 :</b> a) Microscopie Electronique à Balayage .....	<b>53</b>
<b>Figure- II.10 :</b> b)Microscope de type Jeol /JSM-6390Principe du MEB[20] .....	<b>53</b>
<b>Figure- II.11:</b> Microstructure de l'échantillon revêtu par le Ni – Al grossissement $\times 200$ .....	<b>54</b>
<b>Figure- II.12:</b> Microstructure de l'échantillon revêtu par le Ni – Al a grossissement $\times 50$ .....	<b>54</b>
<b>Figure- II.13:</b> Microstructure de l'échantillon revêtu par le Mo .....	<b>55</b>
<b>Figure- II.14:</b> Microstructure de l'échantillon revêtu par le Mo grossissement $\times 50$ .....	<b>56</b>
<b>Figure- II.15:</b> Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène a grossissement de $500\mu\text{m}$ .....	<b>57</b>
<b>Figure- II.16:</b> Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène a grossissement de $30\mu\text{m}$ .....	<b>57</b>
<b>Figure- II.17:</b> Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène. (Dépôt de molybdène.) .....	<b>58</b>
<b>Figure- II.18:</b> Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en Ni – Al a grossissement de 1mm. ....	<b>58</b>
<b>Figure- II.19:</b> Microstructure du cœur de l'acier E37 .....	<b>59</b>
<b>Figure- II.20:</b> Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu (Mo 1mm) et évolution de la micro dureté dû substrat. ....	<b>60</b>
<b>Figure- II.21:</b> Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu (Ni –Al 3mm) et évolution de la micro dureté dû substrat. ....	<b>60</b>
<b>Figure- II.22:</b> Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu (Ni –Al 3mm) et évolution de la micro dureté dû substrat. ....	<b>61</b>

## **Chapitre III**

<b>Figure-III.1:</b> Micrographies SEM pour l'échantillon 90/10.....	<b>65</b>
<b>Figure-III.2:</b> EDX analyse microstructurale de l'échantillon 90/10.....	<b>65</b>
<b>Figure-III.3:</b> Analyse microstructurale au cœur de la section pour l'échantillon 80/20 (a) magnitude 50x et (b) magnitude 1000x.....	<b>66</b>
<b>Figure-III.4:</b> Analyse microstructurale de la section transversale de l'échantillon 70/30 (a) magnitude 50x et (b) magnitude 1000x.....	<b>66</b>
<b>Figure-III.5:</b> Valeurs moyennes de la dureté au cœur de la section de la couche de revêtement ...	<b>67</b>
<b>Figure-III.6:</b> La variation des coefficients de frottement .....	<b>68</b>
<b>Figure-III.7:</b> Topographie de la trace d'usure du revêtement 70%Ni Cr B Si + 30% WC Co.....	<b>69</b>
<b>Figure-III.8:</b> Taux d'usure par glissement sur les surfaces des revêtements .....	<b>69</b>

---

## La liste des tableaux

---

### Chapitre I

<b>Tableau I-1</b> comparaison de plusieurs processus de projection thermique commun .....	19
<b>Tableau I-2</b> : Quelques caractéristiques des revêtements / source employée.....	26
<b>Tableau I-3</b> : Autres caractéristiques des revêtements / source employée .....	26

### Chapitre II

<b>Tableau II.A</b> -composition chimique De l'E37 .....	40
<b>Tableau II.1</b> : Paramètres de projection flamme- f il .....	47
<b>Tableau II.2</b> : La Pression d'allumage de revêtement flamme-fil .....	47
<b>Tableau II.3</b> :Le Débit de projection de revêtement flamme-fil (Ni -Al, Mo).....	47
<b>Tableau II.4</b> : La composition de fil Ni-Al .....	47
<b>Tableau II.5</b> : La composition de fil Mo .....	47
<b>Tableau II.6</b> Evolution de la micro-dureté des échantillons revêtus (Ni -Al 3 mm) et Evolution de la micro dureté du substrat .....	49
<b>Tableau II.7</b> Evolution de la micro-dureté des échantillons revêtus (Mo 1 mm) et Evolution de la micro dureté du substrat .....	49
<b>Tableau II.8</b> : Micro dureté des deux échantillons dans différentes zones .....	59

### Chapitre III

<b>Tableau I</b> : Les exemples de codes et les poudres de revêtement avec différentes teneurs en WC-Co .....	63
---	----

## ***Liste des abréviations et symboles***

---

- **MEB** : microscopie électronique à balayage
- **HVOF** : Projection à la flamme supersonique,
- **Plasma** : Projection à la torche à plasma d'arc soufflé.
- **FF** : Projection à la flamme (**fil**),
- **FP** : Projection à la flamme (**Poudre**),
- **Adh** : Adhérence comparative des revêtements au substrat suivant une échelle arbitraire,
- **Coh** : Cohésion comparative des revêtements suivant une échelle arbitraire,
- **Oxy** : Taux comparatif d'oxyde au sein du revêtement métallique,
- **Arc** : Projection à l'arc électrique,
- **MEI** : *M*aintenance des *E*quipements *I*ndustriels de M'silla

---

## **Table des matières**

---

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste d'abréviation et symboles

Introduction général.....11

### **Chapitre I : revue sur les procédés de revêtements par projection thermique**

**I.1.**Introduction: .....16

**I.2.** ENQUÊTE SUR LA LITTÉRATURE: .....16

**I.3.** Spray plasma: .....18

**I.4.** Spray de fil d'arc électrique: .....20

**I.5.** Spray Flamme: .....21

**I.6.** Vaporisateur Oxyde-Fuel à grande vitesse (**HVOF**) : .....22

**I.7.** DISCUSSION.....24

**I.8.** LES PROCEDES PAR COMBUSTION.....24

**I.9.** La projection à la flamme: .....24

**I.10.** La projection par combustion discontinue (détonation) ou continue (**HVOF**): .....25

**I.11.** LES PROCEDES PAR DECHARGE ELECTRIQUE: .....26

**I.11.1.** La projection à l'arc électrique: .....27

**I.11.2.** La projection plasma : .....27

**I.11.3.** Pistolets plasma: .....27

**I.11.4.** La projection plasma atmosphérique (**APS**) : .....29

**I.11.5.** La projection plasma a pression réduite (**laps**) : .....29

I.12.comparaison des différents procédés de projection thermique.....	30
I.13.Les procédés de revêtement utilisés : .....	32
I.13.1. La métallisation par flamme : .....	32
I.13.1.1. Définition : .....	32
I.13.1.2. Principe de la Métallisation: .....	32
I.13.1.3. Métallisation (projection à la flamme fil ou poudre) :.....	33
I.13.1.4. La mécanique d'accrochage:.....	33
I.13.1.5. Métallisation à la flamme par pistolet à poudre:.....	35
I.13.1.5.1. Principe:.....	35
I.13.1.5.2. Fonctionnement:.....	35
I.13.1.5.3. Les dépôts : .....	37
I.13.1.5.4. Les utilisations :.....	38
I.13.1.6. Métallisation à la flamme par pistolet à fil :.....	38
I.13.1.6.1. Principe : .....	38
I.13.1.6.2. Fonctionnement : .....	38
I.13.1.6.3. Le pistolet se compose de deux parties distinctes :.....	38
I.13.1.6.4.Les applications:.....	38
I.13.1.6.5.Les utilisations :.....	38
<b>Chapitre II : Etude et caractérisation des revêtements des aciers faiblement alliés</b>	
II.1Introduction : .....	40
II. Matériau étudié : .....	40
II.2- Métallisation par projection thermique: .....	40
II.2.1- Système de déposition : .....	40
II.3-Préparation des surfaces avant métallisation : .....	41
II.3.1-La préparation des surfaces : .....	41

II.3.1.1-La propreté :	41
II.3.1.2-La rugosité :	42
II.3.1.3-Le préchauffage :	42
II.4-Les modes de préparation :	42
II.4.1-Le sablage :	43
II.5-Préparation des échantillons :	43
II.6- Mode opératoire :	44
II.7- Paramètres de projection influant sur le dépôt [18] :	46
II.8. méthode expérimentales :	48
II. 8 .1 La micro-dureté :	48
II.8.2- Microscopie Optique :	50
II.8.3 - Microscopie Electronique à Balayage (MEB) :	50
II.9 - Résultats et interprétations :	51
II.9.1- Observation métallographique:	51
II.9.1.1- Examen au microscope optique:	51
II.9.1.2- Examen au microscope électronique (MEB):	54
II.9.2- Caractérisation par la Micro dureté Vickers :	57
II.10 - Conclusion :	60

***Chapitre III comportement à l'usure du revêtement par poudre NiCrBSi renforcé par WC\_CO par projection à la flamme sur acier inoxydable martensitique.***

III 1. Introduction :	62
III 2. Procédure expérimentale :	62
III 2.1. Matériaux et procédés :	62
III 2.2. Mesure de la résistance à l'usure :	64

<b>III 3. Résultats et discussion :</b>	<b>64</b>
<b>III 3.1. Caractérisation des revêtements :</b>	<b>64</b>
<b>III 3.2. Essais de dureté :</b>	<b>66</b>
<b>III 3.3. Test d'usure par glissement :</b>	<b>67</b>
<b>III 4. Conclusions :</b>	<b>69</b>
<b>Conclusion générale :</b>	<b>70</b>

## **Introduction général :**

De nombreuses pièces dans des domaines industriels différents (**mécanique, aéronautique, navales ...**) sont exposées à l'usure. Cette usure fait perdre à ces pièces leurs dimensions initiales et par conséquent les mécanismes et les systèmes mécaniques auxquelles elles appartiennent ne fonctionnent plus normalement. Economiquement parler jeter ces pièces usées et les échanger par des pièces neuves revient très chers. Parmi l'ensemble des solutions disponibles à travers les ateliers du monde industriel pour renforcer la tenue de ces pièces à l'usure, des techniques de revêtement occupent une place à part. Cette opération de renforcement est un service qui passe nécessairement par la maîtrise d'un grand nombre de savoir-faire technique et aussi la maîtrise de paramètres métallurgiques complexes et impose des contraintes de réalisation dont la méconnaissance rend les résultats aléatoires. Le procédé de renforcement est une technique utilisée à l'heure actuelle pour différentes applications :

- ☒ ***Reconstruction aux dimensions voulues de zones détériorées par usure.***
- ☒ ***Renforcement de pièces dégradées par corrosion et / ou oxydation.***
- ☒ ***Renforcement de pièces dégradées par fissuration et par fatigue.***
- ☒ ***Renforcement de pièces dégradées par chocs thermiques.***

La plus part des matériaux métalliques peuvent être revêtus: **aciers inox, aciers, aluminium, cuivre**, alliages à base de cobalt et à base de nickel ...

En principe en revêtent ces pièces avec un métal d'apport approprié, les dépôts présenteront des caractéristiques identiques à celles d'origine.

L'opération de revêtement s'effectue généralement par fusion du métal d'apport ce qui provoque l'échauffement du métal de base, opération qui induira des changements de la microstructure et des propriétés mécaniques. Pour cela on va utiliser les techniques de caractérisation suivantes

- ☒ **La microscopie optique.**
- ☒ **Le MEB.**
- ☒ **La dureté.**

Dans cette étude nous proposons une revue des processus des revêtements.

# **Chapitre I :**

## ***Revue sur les procédés de revêtements par projection thermique***

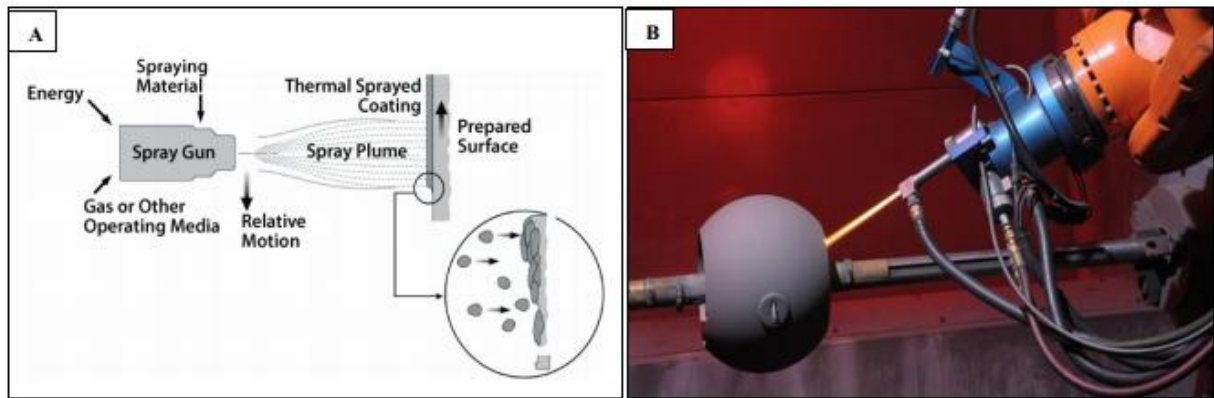
## **I.1.Introduction**

Les procédés de projection thermique sont largement utilisés depuis de nombreuses années dans tous les secteurs de l'industrie de l'ingénierie pour la protection et la récupération des composants. Matériel récent et les développements de processus ont amélioré la qualité et élargi la gamme d'applications potentielles pour revêtements par projection thermique. La projection thermique est une technologie bien établie pour appliquer l'usure et revêtements résistants à la corrosion dans de nombreux secteurs industriels clés, y compris l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie génération, pétrochimie et offshore. Ces dernières années, l'amélioration de l'équipement et de la qualité matérielle ont renforcé la crédibilité technique des procédés de projection thermique, conduisant à une Croissance significative sur de nouveaux marchés, par exemple les revêtements biomédicaux, diélectriques et électroniques. Comme un en conséquence, il existe de nombreuses options ouvertes au fournisseur de revêtement par pulvérisation en termes de projection thermique l'équipement, les matériaux de revêtement et la sélection des gaz, mais ceux-ci dépendent souvent de l'environnement auquel le revêtement est soumis.

## **I.2. ENQUÊTE SUR LA LITTÉRATURE**

Premières expériences dans lesquelles des liquides ont été brisés en fines particules par un courant de haute pression gaz. Les efforts visent davantage à produire des poudres plutôt qu'à construire des revêtements. Particules en fusion empiètent sur la surface du substrat et sur eux-mêmes qui se refroidissent et forment un revêtement [1]. Un revêtement de l'ordre de **20** microns à plusieurs millimètres peut être formé par projection thermique selon les méthodes et la vitesse d'avance. L'ensemble de ce processus est associé à une très faible chaleur transfert sur le substrat et emboîtement mécanique qui va faire office d'adhérence majeure mécanisme, qui en fin de compte nous facilite le revêtement de presque tous les matériaux sur n'importe quel substrat matériau avec méthode de projection thermique [2]. La qualité des revêtements est évaluée par la stabilité de phase, densité du revêtement, force d'adhérence, dureté, ténacité, teneur en oxyde et rugosité de surface. Les revêtements réalisés avec des méthodes de projection thermique ont une large gamme d'applications. Il s'agit notamment de thermiques revêtements barrière, résistants à l'usure et à la corrosion. Ces revêtements trouvent une application dans le pétrole et le gaz secteur, aérospatiale, centrales électriques, textile, traitement des minéraux, industries chimiques et papetières. Le principal Les avantages des revêtements par projection thermique comprennent leur grande variété de matériaux de revêtement et de substrat. [3]

Les revêtements peuvent être décollés et les substrats peuvent être recouverts sans aucun dommage ni dimension modifications apportées aux composants. La nature en ligne droite est le principal inconvénient de ces processus. Les substrats petits, profonds et très complexes sont difficiles à enduire.



**Figure-I.1 :** (A) schéma général de digramme thermal spray coating prouesses ou (B) thermal spray coating

Le jet thermique est un terme générique pour un groupe de processus dans lesquels le métal, la céramique, le cermet et certains matériaux polymères sous forme de poudre, de fil ou de tige sont introduits dans une torche ou un pistolet avec lequel ils sont chauffés à près ou un peu au-dessus de leur point de fusion. Le fondu ou presque fondu résultant des gouttelettes de matière sont accélérées dans un flux gazeux et projetées contre la surface à recouvrir (c'est-à-dire le substrat). Le processus est en tant que tel simple mais nécessite des compétences et un contrôle extrêmes. Lors de l'impact des gouttelettes fondues sur la surface plus froide, les gouttelettes s'écoulent en fines particules lamellaires adhérant à Surface, chevauchement et emboîtement suivis de leur solidification. L'épaisseur totale du revêtement peut varier et dépend du nombre de passes. Il existe trois types de processus (1) **Manuel**, (2) **mécanisé** et (3) **entièrement automatisé** [4] [5] ( **La figure 1** ) a clairement révélé que le principe général (A) et mise en place réelle de la mise en place du revêtement par projection thermique (B). Basée sur la source de chaleur, le processus de revêtement par projection thermique peut être classé comme indiqué dans l'organigramme suivant, ( **fig.2** ) [6].

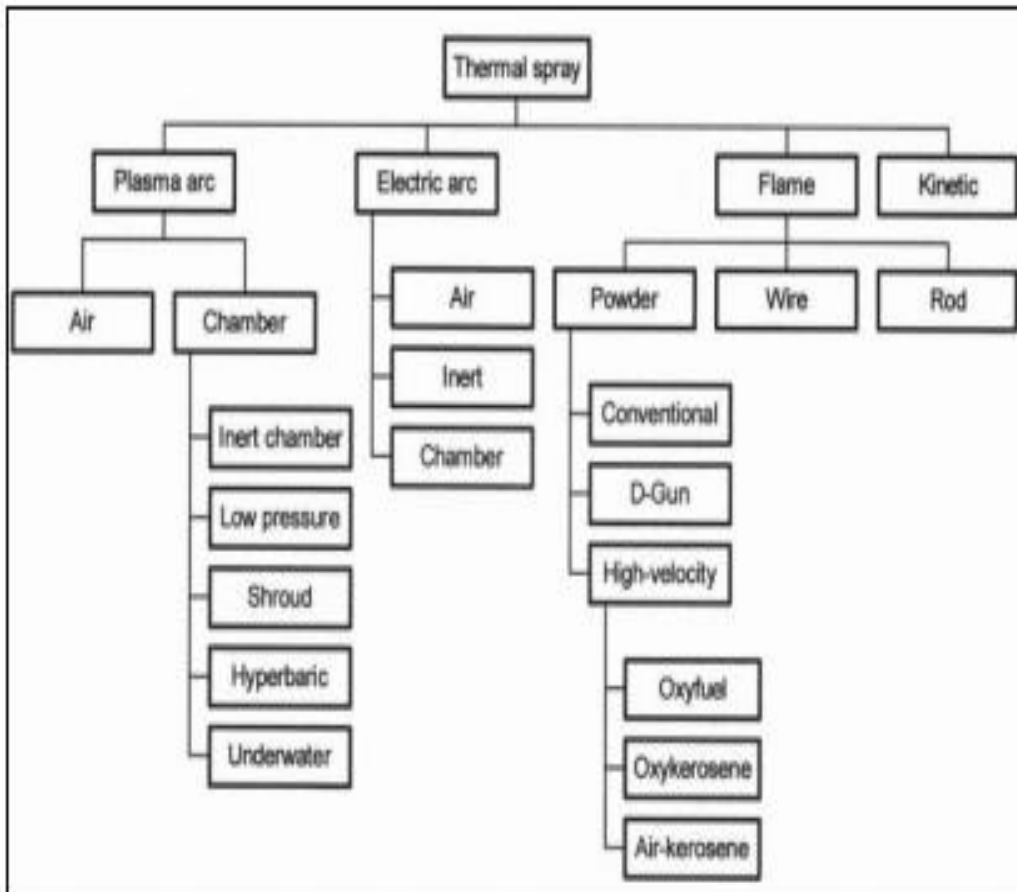


Figure-I.2 : classification de processus de revêtement par projection thermique

### **I.3. Plasma Spray**

La projection à l'arc plasma est l'une des méthodes de projection thermique les plus sophistiquées et les plus polyvalentes. Comme indiqué sur la **fig.3**, le processus de pulvérisation plasma utilise un arc électrique CC pour générer un flux de haute un plasma gazeux ionisé à température, qui agit comme source de chaleur de pulvérisation [8] [9].

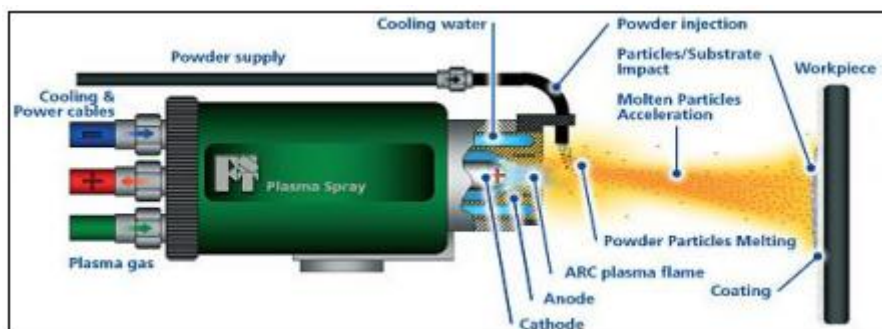
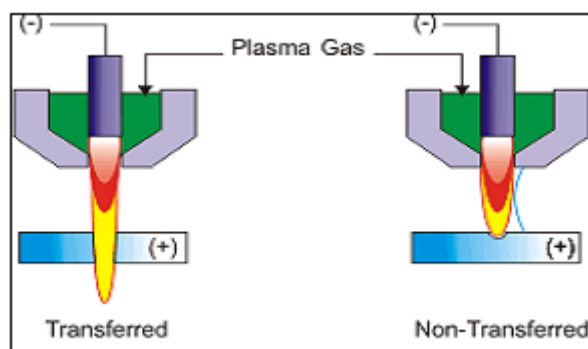


Figure-I.3 : schéma diagramme de plasma arc pousse

Le pistolet à plasma comprend une anode en cuivre et une cathode en tungstène, toutes deux refroidies à l'eau. **UNE** un arc haute fréquence s'enflamme entre eux. Le plasma gazeux (c'est-à-dire **He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>** ou **mélanges**) circule autour de la cathode et à travers l'anode qui a la forme d'une buse rétrécissant et ionisée de telle sorte qu'un panache de plasma de plusieurs centimètres de longueur se développe. La température à l'intérieur du panache peut atteindre jusqu'à **16000 ° K**. Le produit de pulvérisation est injecté sous forme de poudre à l'extérieur de la buse du pistolet dans le panache de plasma, où il est fondu, et projeté par le gaz sur la surface du substrat. Dispositions pour le refroidissement ou la régulation de la vitesse de pulvérisation peut être nécessaire pour maintenir la température du substrat entre **95** et Plage de **205 ° C (200 à 400 ° F)**. La pulvérisation au plasma a l'avantage de pouvoir pulvériser à très haut point de fusion matériaux ponctuels tels que les métaux réfractaires. Mais la principale faiblesse de cette technique est la génération de Phosphate de calcium amorphe et phase de phosphate de calcium bioactif comme Tétra Calcium Phosphate (**TTCP**), Tri-Calcium Phosphate (**TCP**) et produits cristallins métastables tels que **l'oxyde - l'hydrox** apatite qui peut provoquer des instabilités mécaniques et adhésives du revêtement [7] [11]. La projection au plasma devient le principal processus des méthodes de projection thermique et est couramment utilisée appliqué l'hydrox apatite sur les implants dentaires et les prothèses orthopédiques. La poudre est injectée dans la flamme de plasma et accéléré à environ **200 m / s** avant de toucher le substrat. Principalement en raison de les vitesses d'impact qui fournissent l'énergie cinétique répandent la gouttelette fondue et créent des lamelles avec une grande surface. La grande surface de contact avec le substrat associée à la lamellaire donne transfert rapide de chaleur qui peut être suffisant pour former la phase amorphe [8] [10]. Le taux de pulvérisation ou la vitesse de pulvérisation dépend grandement de divers paramètres, à savoir la conception du pistolet, les gaz plasmatiques, la poudre schémas d'injection et propriétés des matériaux, en particulier les caractéristiques des particules telles que la taille, distribution, point de fusion, morphologie et densité apparente [4]. Le plasma conventionnel est également connu sous le nom de jet de plasma atmosphérique ou atmosphérique (**APS**). Dans **APS**, le plasma est généré en surchauffant un gaz inerte - généralement de **l'argon** ou un mélange **argon-hydrogène** par un arc en courant continu. Les canons commerciaux fonctionnent à une gamme de puissance de **20 à 200 KW** [12].

Projection plasma sous vide (**VPS**), également communément appelée projection plasma basse pression (**LPSP**), utilise des torches de pulvérisation au plasma modifiées dans une chambre à des pressions comprises entre **10 et 50 kipa (0,1 à 0,5 au m)**. Les avantages de cette technique au plasma à basse pression comprennent une meilleure liaison et une densité le dépôt, un meilleur contrôle de l'épaisseur du revêtement (**même avec une surface de travail irrégulière**), et efficacité de dépôt plus élevée [11]. A basse pression, le plasma devient plus grand en diamètre et en longueur, et grâce à l'utilisation de buses convergentes / divergentes, a une vitesse de gaz plus élevée. L'absence d'oxygène et la capacité de fonctionner avec des températures de substrat plus élevées produisent des revêtements plus denses et plus adhérents avec des teneurs en oxyde beaucoup plus faibles [9].



**Figure-I.4** : comparaisons de transferts ou non transferts de plasma arc processe

Le processus d'arc plasma transféré (**fig.4**), ajoute à la pulvérisation plasma la capacité de la surface du substrat chauffage et fusion. Un courant d'arc secondaire est établi à travers le plasma et le substrat qui contrôle la fusion de la surface et la profondeur de pénétration. Plusieurs avantages résultent de ce chauffage direct: collage métallurgique, revêtement haute densité, taux de dépôt élevés et épaisseurs élevées par passage.

Dans en outre, moins d'énergie électrique est requise qu'avec les processus d'arc non transférés. Ce processus élimine de nombreux problèmes liés à l'utilisation de poudres avec de larges distributions de tailles de particules ou grandes tailles de particules. Il est utilisé dans les applications à revêtement dur telles que les sièges de soupape, les socs de charrue, les gisements de pétrole composants et machines d'extraction [4].

#### **I.4. Spray de fil d'arc électrique**

Dans le processus de pulvérisation à arc électrique (**fig.5**) alias le processus d'arc de fil), deux électrodes de fil consommable connecté à une source d'alimentation à courant continu (**cc**) à haute intensité sont introduites dans le pistolet et se rencontrent, établissant un arc entre eux qui fait fondre les extrémités des fils. Le processus est économe en énergie parce que toute l'énergie d'entrée est utilisée pour faire fondre le métal. Le métal en fusion est ensuite atomisé et propulsé vers le substrat par un courant d'air. Les taux de pulvérisation sont principalement attribuables au fonctionnement et varient en fonction du point de fusion et de la conductivité. Les températures du substrat peuvent être Très faibles, car aucun jet de gaz chaud n'est dirigé vers le substrat. La projection à l'arc électrique peut également être effectuée à l'aide de gaz inertes ou dans une chambre à atmosphère contrôlée [13].

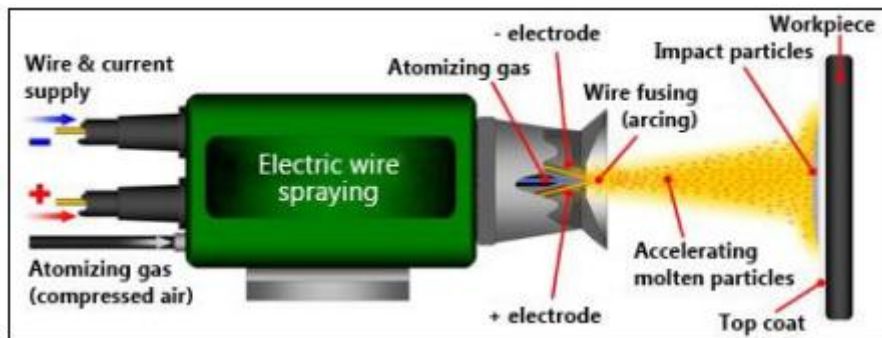


Figure-I.5 : schéma de diagramme de l arc électrique spray pousse

### I.5. Spray Flamme

La pulvérisation à la flamme (**fig.6**), est le plus ancien des procédés de projection thermique, caractérisé par un faible capital investissements, des taux de dépôt et des efficacités élevés, et une relative facilité de fonctionnement et de maintenance des équipements. Le jet de flamme utilise un gaz combustible comme source de chaleur pour faire fondre le revêtement Matériel.

Une grande variété de matériaux peut être déposée sous forme de tige, de fil ou de poudre sous forme de revêtements en utilisant ce procédé, les pistolets à flamme et la grande majorité des composants sont pulvérisés manuellement.

La plupart des pistolets pulvérisateurs à flamme peuvent être adaptés pour utiliser plusieurs combinaisons de gaz afin d'équilibrer les coûts d'exploitation et les propriétés de revêtement. **Acétylène, propane, méthyl - acétylène - propadiène (MAPP)**, et l'hydrogène, ainsi que l'oxygène, sont des gaz de projection de flammes couramment utilisés. Températures de flamme et les caractéristiques dépendent du rapport et de la pression de l'oxygène au gaz combustible. Le jet de flamme 'comprend les processus de flamme de poudre à faible vitesse et de flamme de fil comme indiqué sur la figure et les processus à grande vitesse tels que comme **HVOF (oxyda-fuel à grande vitesse)** et canon à détonation (**D-Gun**) [4] [14].

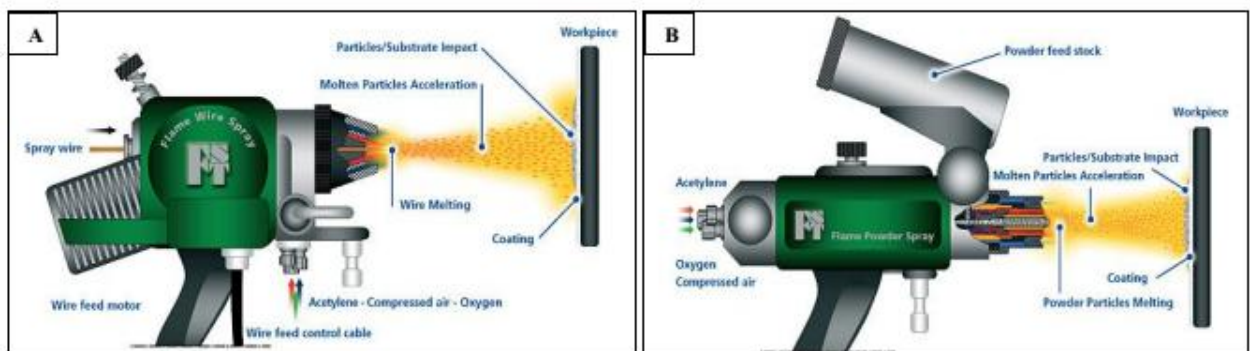
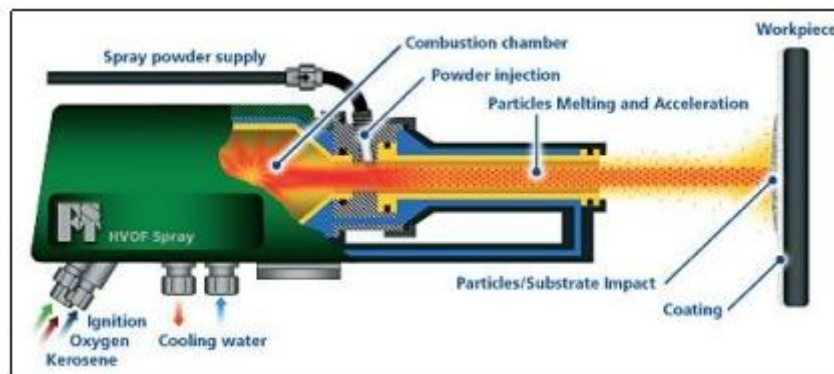


Figure-I.6 : schéma de diagramme de(A) câble flamme où (B) produit flamme Prusse

## I.6. Vaporisateur Oxyde-Fuel à grande vitesse (HVOF)

Le procédé d'oxycoupage à haute vitesse (**HVOF**) est un ajout relativement récent à la famille des procédés de projection thermique (**Figure 7**) [17]. Au début des années **1980**, Browning et Winfield, utilisant un moteur-fusée technologies, a introduit une méthode unique de pulvérisation de poudres métalliques, la technique a été mentionnée comme **Oxyde-Fuel** à grande vitesse (**HVOF**). Le processus utilise une combinaison d'oxygène avec divers combustibles gaz dont l'**hydrogène**, le **propane**, le **propylène**, l'**hydrogène** et même le **kérosène**.



**Figure-I.7** : schéma diagramme de haute vitesse Oxyde full spray pressure(**HVOF**)

Dans le processus **HVOF**, le carburant et l'oxygène sont introduits dans la chambre de combustion avec poudre pulvérisée. La combustion des gaz produit une température et une pression élevées dans la chambre, qui provoque l'écoulement supersonique des gaz à travers la buse. Les particules de poudre fondent ou fondent partiellement dans la chambre de combustion et pendant le vol à travers la buse. La flamme la température varie dans la plage de **2500 ° C** à **3200 ° C**, selon le carburant, le gaz combustible / oxygène la pression du gaz. Dans le processus **HVOF**, les particules fondent complètement ou seulement partiellement,

En fonction de la température de la flamme, du temps de séjour des particules, du point de fusion du matériau et de la température conductivité [7]. Comme il utilise un jet supersonique, le distinguant du jet de flamme conventionnel, la vitesse de l'impact des particules sur le substrat est beaucoup plus élevée, ce qui améliore les caractéristiques du revêtement. Le mécanisme diffère de la projection de flamme par une expansion du jet à la sortie du pistolet. Les avantages de ce processus sont que la température du processus est raisonnable mais la vitesse des particules sur l'impact est très élevée. Les revêtements résultants sont généralement très denses, adhérents et contiennent peu oxydes. Ces procédés sont adaptés à la pulvérisation de revêtements métalliques de haute qualité ainsi que de cermets. La qualité des revêtements les rend très attractifs comme méthode d'application pour une couche de liaison dans un Système **TBC** [15] [16]. Le processus **HVOF**, ayant une énergie cinétique élevée et relativement faible l'énergie thermique, a un effet positif sur les caractéristiques du revêtement et est favorable à la pulvérisation des

matériaux tels que les revêtements de carbure de tungstène [17]. Il existe deux différences distinctes entre le jet de flamme conventionnel et le **HVOF**. **HVOF** utilise combustion confinée et une buse allongée pour chauffer et accélérer le matériau de revêtement en poudre. Les appareils **HVOF** typiques fonctionnent à des vitesses de gaz hypersoniques, c'est-à-dire supérieures à **MACH 5**. L'extrême les vitesses fournissent de l'énergie cinétique qui aide à produire des revêtements très denses et très bien adhérent à l'état pulvérisé [14].

La capacité de produire des revêtements denses avec une faible quantité de dégradation, l'oxydation des métaux matériaux, et les transformations de phase est la principale caractéristique du processus **HVOF**. Cela est dû au temps de séjour court des particules dans une flamme relativement froide. Il est largement utilisé pour produire du cermet et Revêtements métalliques, mais il a également été démontré que le procédé **HVOF** est capable de déposer des revêtements céramiques. Cependant l'inconvénient de cette technique est que le revêtement n'est pas **100%** cristallin [7]. Le tableau suivant montre la comparaison de la source de chaleur, de la température de la flamme, de la porosité de la vitesse du gaz et adhérence du revêtement dans divers procédés de revêtement par projection thermique:

**Tableau-I.1** comparaisons de several Common thermal spray processes

Process	Coating Material form	Heat Source	Flame Temp °C	Gas velocity Mts/Sec	Porosity %	Coating adhesion MPa
Plasma Spray	Powder	Plasma Flame	12000-16000	500-600	2-5	40-70
Wire Arc Spray	Wire	Electric Arc	5000-6000	< 300	5-10	28-41
Wire Flame Spray	Wire	Oxy-Fuel combustion	3000	< 300	5-10	14-21
HVOF	Powder	Oxy-gas Fuel combustion	3200	1200	1-2	> 70

## **I.7. DISCUSSION**

Dans cet article, nous nous sommes concentrés sur l'introduction générale de certains des principaux processus de revêtement comme le jet de fil d'arc électrique, le jet de flamme en bref et expliquent en détail Vaporisateur **Oxyde-Fuel** Vitesse (**HVOF**) et procédé de pulvérisation plasma. On peut dire que parmi ces **HVOF** à plus d'avantages que les autres. Tous les processus sont utilisés en fonction des propriétés requises, coût, adéquation du procédé à un matériau particulier, **etc**. Toutes les méthodes de projection thermique Impliquent la projection de petites particules ramollies sur une surface nettoyée et préparée où elles adhèrent pour former un revêtement continu. L'énergie thermique et cinétique provoque ensemble les particules «**Spalt**» sur la surface et les uns sur les autres, pour

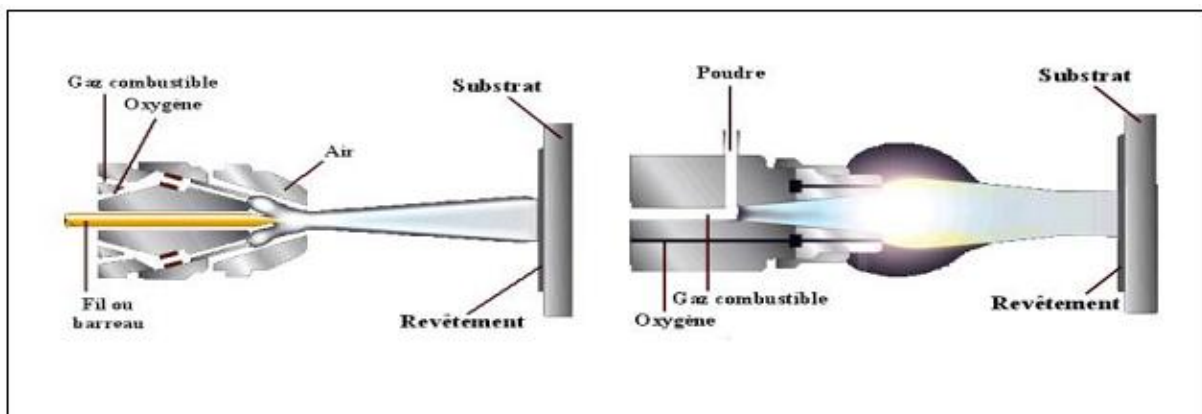
produire un revêtement cohésif de couches successives et les propriétés du revêtement varient en fonction du paramètre du procédé utilisé.

## **I.8. LES PROCEDES PAR COMBUSTION**

Une combustion est une réaction chimique entre un carburant (**combustible**) et un comburant (**oxygène**) dont l'intérêt est d'être exothermique. Une tuyère est un conduit dans lequel on augmente la vitesse en diminuant la pression du fluide circulant. L'association de ce principe chimique et de ce principe physique permet la réalisation d'une torche de projection à la flamme ou de projection à chambre de combustion.

### **I.9. La projection à la flamme**

La projection thermique à la flamme permet de déposer des matériaux soit sous forme de fil soit sous forme de poudre grâce à l'utilisation de chalumeau classique comme ceux présentés sur la Cette technique est l'une des plus utilisées dans le monde du fait de sa simplicité de mise en œuvre et de son faible coût. Ce chalumeau fonctionne sur le principe de la flamme diffusante. Les réactifs utilisés diffusent l'un dans l'autre durant la réaction chimique. Les principales limitations de cette technique sont : la température maximale atteignable, la faible vitesse du jet, la faible vitesse de combustion... Toute fois, on peut améliorer les performances en réalisant la réaction dans un milieu confiné afin d'augmenter la pression d'introduction des gaz En à la **Figure8**.



**Figure-I.8** : Chalumeau classique à fil (à gauche) et à poudre (à droite)

La projection à la flamme peut être appliquée à la plupart des métaux mais elle n'est généralement pas recommandée pour les matériaux non ferreux ayant un point de fusion inférieur à **1100°C**. L'échelle des épaisseurs en principe accessibles est de **1,5 à 6 mm**. Les revêtements obtenus sont essentiellement utilisés pour leur résistance à l'usure abrasive et ils contiennent, dans la plupart des cas, des carbures de tungstène, de **chrome** ou de **bore** dispersés dans une matrice de **fer**, de **cobalt** ou de **nickel** [9].

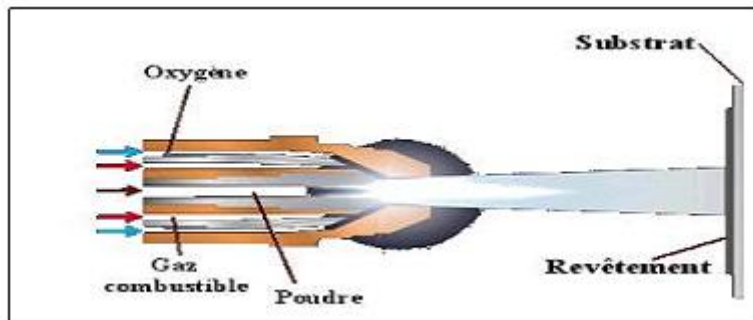
## **I.10. La projection par combustion discontinue (détonation) ou continue (HVOF)**

Le plus ancien procédé de projection discontinue est le canon à détonation, connu sous le nom de **D-** qui date de **1955** et qui a été mis au point par Union Carbide. Ce procédé qui utilise de l'acétylène comme combustible fonctionne sur le principe d'un moteur à explosion dans lequel le piston est remplacé par la poudre à projeter. Le canon est constitué d'un fût dans lequel sont introduits la poudre et le mélange gazeux. En suite, grâce à une étincelle produite par une bougie, on enflamme le mélange ce qui génère une onde de choc (**3000** qui entraîne la poudre à une vitesse de l'ordre de **900**). Chaque tir permet de déposer une épaisseur de quelques micromètres sur une surface équivalente au diamètre du fût à une cadence d'environ **10** Hz. Depuis quelques années, de nouveaux procédés basés sur le même principe sont apparus. Ils présentent quelques différences notables, par rapport au procédé précédent, dans le débit gazeux, la distribution des poudres ou d'autres caractères particuliers. Ils ont en commun, une forte accélération communiquée aux particules de matière ce qui peut engendrer des vitesses de l'ordre de **Mach5**. La projection par combustion continue est quant à elle basée sur le principe d'un moteur de fusée. Bien que ce principe soit connu depuis de nombreuses années, ce n'est qu'en **1983** que Browning développe un système de projection à combustion continue sous pression : le Jet- que l'on nomme plus communément procédé **HVOF (High Vélocité Oxyde Fuel)**.

En fait, les différences qui séparent le **D-**, le **Jet-**, le **Mach-** et le **Faré-** (qui sont les quatre procédés les plus répandus) s'effacent devant le caractère commun qui se retrouve dans les dépôts tous denses, durs, épais et très adhérents. C'est la répartition entre l'énergie cinétique et l'énergie thermique qui constitue la principale différence entre les procédés supersoniques et le procédé plasma.

Le principe de base du procédé **HVOF** est un jet à combustion interne (**rocket**) qui donne des vitesses de gaz supersoniques. La détonation se produit dans un mélange de deux gaz : un comburant, l'oxygène et un carburant dont la nature peut varier (**propane, propylène ou mélange à l'acétylène**).

La vitesse de la flamme ne devient supersonique qu'en sortie de buse (**figure 09**). La poudre introduite dans le gaz d'échappement de la rocket est concentrée pour être conduite à l'intérieur de la buse qui peut atteindre **300** mm de long. Pour mettre en œuvre l'appareil, il est nécessaire d'allumer une flamme pilote qui permet l'allumage de la flamme principale. Les avantages principaux du procédé **HVOF** sur la projection au chalumeau sont : l'augmentation de la température des gaz et l'augmentation d'un facteur supérieur à dix de la vitesse d'éjection [9].



**Figure-1.9** : Schéma de Principe du procédé **HVOF** [9]

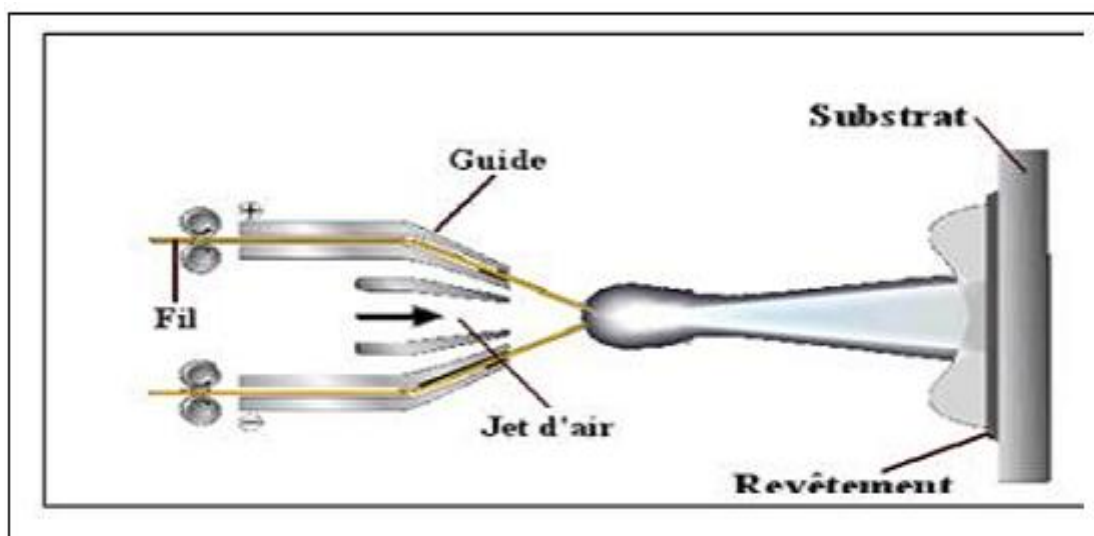
Les procédés hypersoniques ou **HVOF** permettent de projeter des dépôts allant jusqu'à un millimètre d'épaisseur (**voire davantage**). On réalise ainsi ce qu'on peut qualifier de revêtement plaqué (ou encore plaquage à la flamme de l'expression anglaise "**flamme platine**").

## **I.11.LES PROCÉDES PAR DECHARGE ELECTRIQUE**

### **I.11.1.La projection à l'arc électrique**

Le procédé de projection par arc électrique est le plus ancien puisque c'est celui qui a été utilisé par Shop (**1911**). Il permet de faire fondre un fil et de le projeter sur un substrat à l'aide d'un jet d'air comprimé. Ce procédé relativement simple reste néanmoins limité car il est applicable uniquement aux matériaux tréfila blés et électriquement conducteurs.

**La figure 10** présente le principe général de la projection à l'arc électrique ainsi qu'une Micrographie d'un revêtement en acier au chrome obtenu par ce procédé.



**Figure-1.10** : Schéma de principe d'un pistolet à arc électrique

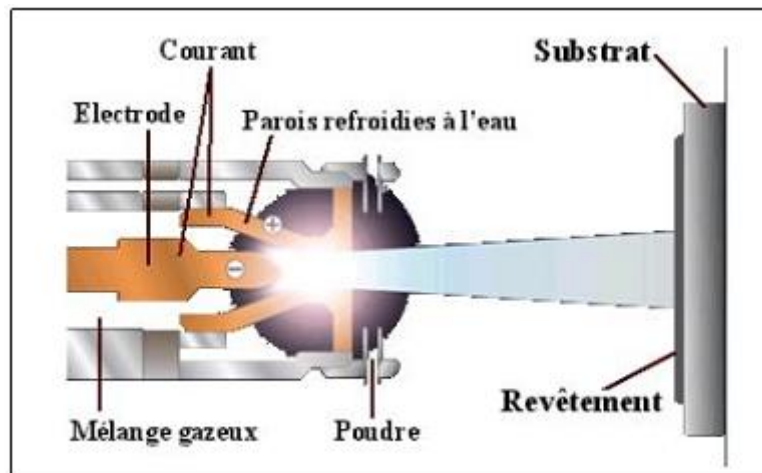
### **I.11.2.La projection plasma**

Dans ce paragraphe, nous allons nous attacher à décrire successivement deux des principaux procédés de Projection thermique par plasma :

- La projection plasma atmosphérique : Procédé **APS (Atome sphérique Plasma Seraing)**. Ce procédé est le plus ancien (**1951**), le plus économique et le plus répandu industriellement. Il permet de projeter des céramiques et des métaux peu oxydables
- La projection plasma sous pression réduite : Procédé **LPPS (Lowe Pressure Plasma Seraing)** ou **VPS (Vacuum plasma Seraing)**. Ce procédé est apparu en **1975**, il permet la projection de matériaux fortement réactifs avec l'oxygène (**Titane, alliage de titane, tantale...**). Les caractéristiques générales des revêtements projetés thermiquement par plasma sont liées à quatre règles (**vitesses et températures**) :
- La température que peut généralement atteindre une torche plasma est de **20000°C**.
- Pour qu'un matériau soit projetable, il faut qu'il y ait un écart de **300°C** entre sa température de fusion et sa température de sublimation.
- Le substrat reste à une température relativement basse; la structure du matériau revêtu n'est donc pas altérée.
- La vitesse des particules projetées sur la cible est de l'ordre de **300m.s-1**(subsonique). Plus on augmente la vitesse, plus on accroît la compacité ainsi que l'adhérence.

### **I.11.3.Pistolets plasma**

**En 1922**, Gardien invente le générateur de plasma d'arc qui consiste à emprisonner un arc électrique dans un milieu confiné permettant ainsi d'amener les gaz à une température nettement supérieure (entre **12000** et **20000 °C**) à celle d'un arc libre (environ **6000°C**). Le plasma est l'état de la matière dans lequel les composés gazeux sont dissociés et les atomes partiellement ou totalement ionisés. Cependant, l'apparition des premières torches plasma d'arc soufflé industrielles ne se fera qu'en **1951**.



**Figure-I.11** : Schéma de principe d'un pistolet plasma [9]

Dans les deux cas de projection précédemment cités, on réalise la projection à l'aide d'un pistolet plasma (**figure 11**) qui utilise la décharge d'un arc électrique capable de conduire des courants très intenses entre deux électrodes sous une faible tension. L'arc se distingue des décharges électriques par les propriétés de sa colonne positive. Le plasma qui constitue celle-ci est très proche de l'équilibre (les **électrons**, **ions** et **atomes** ont la même température) et ses propriétés sont les suivantes : fortes densités d'énergie, **conductivité électrique**, **viscosité élevée**. Les caractéristiques du jet de plasma en sortie de tuyère (**12000 °C** et **6000 °C**) permettent de fondre la quasi-totalité des matériaux même les plus réfractaires.

Le pistolet à plasma est un appareil dans lequel on injecte un gaz à travers un axe étranglé par des parois froides. Il comporte généralement une cathode et une anode refroidies par une circulation d'eau. On distingue deux modes de fonctionnement pour ce type de pistolet :

- **Le pistolet à plasma d'arc interne (ou arc soufflé)**: dans ce type de pistolet, le jet de plasma ne conduit pas le courant à l'extérieur de la tuyère.
- **Le pistolet à plasma d'arc externe (ou transféré)**: dans celui-ci, le jet plasma **EST** entièrement parcouru par le courant, le circuit électrique se refermant sur une anode extérieure (**la pièce à traiter**), la tuyère étant portée à un potentiel intermédiaire.

#### **I.11.4. La projection plasma atmosphérique (APS)**

Ce type de projection a lieu à l'air. Le jet plasma aspire l'atmosphère ambiante : ce phénomène est d'autant plus marqué que l'on s'éloigne de la tuyère. On trouve ainsi, dans le cas des métaux, des taux d'oxydation élevés (>**30%**), et pour certaines céramiques, des changements de composition importants. À l'impact sur le substrat, la présence de gaz entraîne l'inclusion de porosité dans le dépôt. Enfin, la température du substrat doit être limitée pour éviter les phénomènes d'oxydation. De ce fait, les dépôts ont une adhérence moyenne. Le taux de porosité est très variable et dépend des réglages et des matériaux.

Pour certaines applications particulières comme le revêtement d'implants orthopédiques, l'augmentation de la distance de projection permet d'obtenir une porosité pouvant aller jusqu'à environ **20%**. Ce pourcentage voulu est nécessaire pour l'ancrage biologique des prothèses dans les tissus osseux. Habituellement, les valeurs du taux de porosité des dépôts obtenus par **APS** se situent entre **4** et **6%**. Dans les meilleures conditions de projection, on peut atteindre une porosité de **2%**. L'épaisseur minimale du dépôt, suivant la granulométrie de la poudre, est de **50** à **100**  $\mu\text{m}$ . On peut parfois faire des dépôts de plusieurs **mm** [9].

#### **I.11.5. La projection plasma à pression réduite (LPPS)**

Lorsque la couche doit satisfaire à des exigences élevées en matière de densité, de pureté et de résistance à l'oxydation, la projection doit se dérouler en l'absence de gaz réactifs (sous basse pression résidu elle d'argon en général). Une diminution de la pression de l'atmosphère de projection entraîne la disparition des interactions indésirables entre le jet plasma, la matière projetée, le matériau de base et l'atmosphère. Cette diminution entraîne aussi l'augmentation de la longueur et du diamètre du jet, l'élévation de la vitesse des plasmas et l'homogénéisation de l'écoulement.

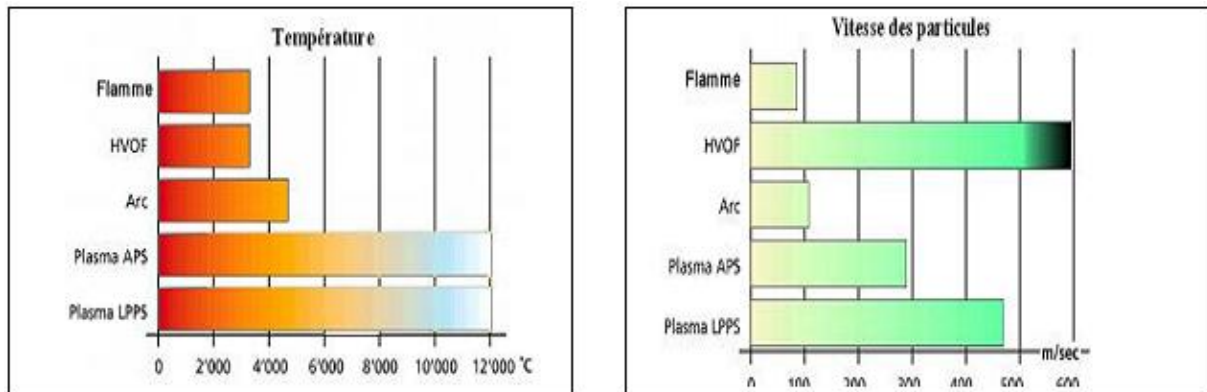
La formation des couches s'effectue à haute énergie étant donné que les particules, durant leur trajet ectopie, ne sont ni refroidies, ni freinées comme cela est le cas en milieu atmosphérique. En général, les installations de projection **LPPS** sont utilisées à des pressions de **5000** à **10000** Pa. Les avantages de ce type de procédé peuvent se résumer de la manière suivante :

- Obtention d'un revêtement très dense et d'une meilleure adhérence sur le substrat,
- Meilleur écrasement des particules à basse pression : d'où une très faible porosité (<1%),
- Refroidissement plus lent des particules : d'où une meilleure cohésion du dépôt,
- Absence de couches d'oxydes : donc augmentation de l'adhérence et de la cohésion du dépôt,
- Possibilité de décapage "insitu" du substrat à haute température : d'où un recuit en continu du dépôt,
- Respect de la composition de la poudre initiale.

Des applications de revêtements des métaux nobles (**titane, tantale, niobium, tungstène**) ont vu le jour mais c'est surtout dans la protection contre la corrosion à chaud d'aubes de turbines à gaz que ce procédé a acquis une grande notoriété [9].

## I.12. COMPARAISON DES DIFFERENTS PROCEDES DE PROJECTION THERMIQUE

La **figure 12** montre les différentes plages d'utilisation des procédés de projection thermiques en ce qui concerne la température et la vitesse des particules [9].



**Figure-1.12:**Température d'utilisation et vitesse des particules des procédés de projection thermique.

Les **tableaux 1.2** et **1.3** décrivent quelques-unes des caractéristiques des revêtements en fonction de la méthode de projection utilisée [7].

Dans le **tableau 1-1** les abréviations suivantes sont utilisées:

- **Débit** : Débit massique de matière pouvant être employé avec la source considérée,
- **Ad.** : Adhérence comparative des revêtements au substrat suivant une échelle arbitraire,
- **Co.** : Cohésion comparative des revêtements suivant une échelle arbitraire,
- **Oxyde.** : Taux comparatif d'oxyde au sein du revêtement métallique,
- **Rend.** : Rendement intrinsèque de projection (fortement dépendant du type de matériau).

**Tableau-I.2** : Quelques caractéristiques des revêtements / source employée

Source	Débit (kg.h-1)	Adh. (1à10 arbitraire)	Coh. (1à6arbitraire)	Oxy. (%)	Rend (%)
Flamme (poudre)	3_7	3	2	6_12	50
Flamme (fil)	5_15	4	3	4_8	70
HVOF	3_6	8	5	0.5_2	70
D_Gun	1_2	8	5	0.1_0.5	90
Arc électrique	5_30	6	4	1_5	80
Plasma(APS)	3_5	6	4	1_5	60
Plasma(LPPS)	3_8	9	6	<0.1	75

Dans le **tableau I.3** les abréviations suivantes sont utilisées:

- **FF** : Projection à la flamme (**fil**),
- **FP** : Projection à la flamme (**Poudre**),
- **HVOF** : Projection à la flamme supersonique,
- **Arc.** : Projection à l'arc électrique,

**Tableau-I.3** : Autres caractéristiques des revêtements / source employée

	Matériaux	FF	FP	HVOF	Arc	plasma
<b>Adhérence (MPa)</b>	Métaux ferreux	14	28	62	41	34
	Métaux non ferreux		21	70	41	34
	Oxydes		14_34			21
	Carbures		34_48	83		55_69
<b>Densité (%) Par rapport au matériau massif</b>	Métaux ferreux		90	98		95
	Métaux non ferreux		90	98		95
	Oxydes		95			95
	Carbures		90	98		95
<b>Epaisseur maximal (mm)</b>	Métaux ferreux	1,25_2,5	1,25_2,5	1,25_2,5	1,25_2,5	1,25_2,5
	Métaux non ferreux	1,25_5	1,25_5	1,25_5		1,25_5
	Oxydes		0,4			1_2
	Carbures		0,4	0.6		1_2
<b>Epaisseur minimal (mm)</b>		0.05	0.05	0.05	0.07	0.05

### **I.13. Les procédés de revêtement utilisés :**

Les différents procédés de la Métallisation utilisés par **M.E.I (Maintenance des équipements industriels)** sont :

☒ **La Métallisation par arc électrique.**

☒ **La Métallisation par flamme.**

#### **I.13.1. La métallisation par flamme :**

##### **I.13.1.1. Définition :**

La métallisation est un terme couramment utilisé pour décrire les revêtements métalliques appliqués par projection thermique. Pour la protection des éléments en acier contre la corrosion, cela désigne la pulvérisation de d'aluminium en fusion sur les surfaces en acier. Dans ce procédé, le métal est amené sous forme de fil ou de poudre vers un pistolet d'application où il est fondu et projeté sur la surface à protéger.

Au contact avec la surface, les dépôts d'aluminium se refroidissent instantanément, ce qui crée une barrière protectrice solide qui isole le substrat en acier de l'environnement.

La métallisation compte sur une liaison mécanique entre le l'aluminium et l'acier pour former le revêtement protecteur. Puisque cette liaison est mécanique, une préparation de la surface adéquate est essentielle pour assurer l'efficacité du revêtement à long terme [11]

La métallisation protège l'acier de deux façons :

☒ **Barrière protectrice** : Le revêtement pulvérisé constitue lui-même une robuste barrière protectrice entre l'environnement et la surface d'acier, et évite le contact avec l'eau, qui causerait l'oxydation [12].

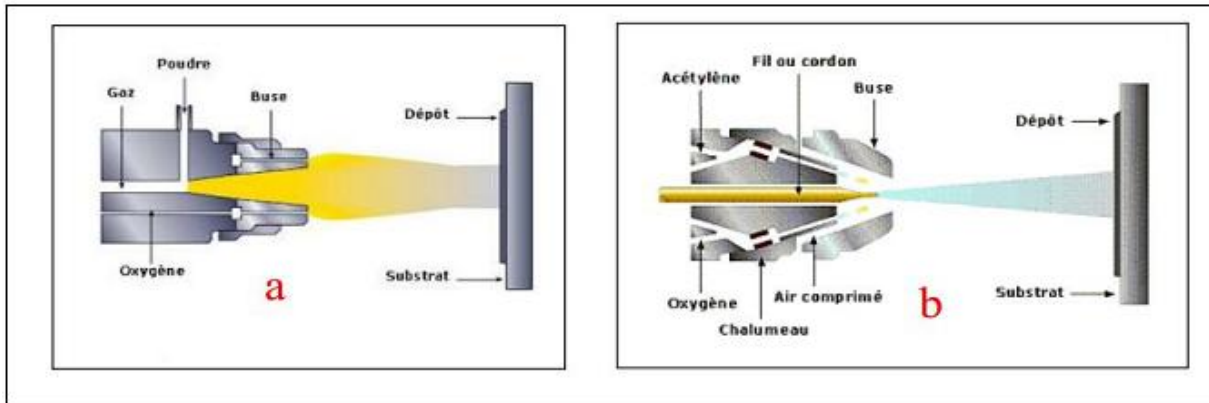
☒ **Protection cathodique** : L'efficacité de la métallisation résulte aussi d'une réaction électrochimique entre l'acier et le **zinc**, qui conduit ces revêtements à base de zinc à se « sacrifier » pour protéger l'acier contre tout dommage. Cette protection sacrificielle est comparable à la protection que procurent les apprêts riches en aluminium [12]

##### **I.13.1.2 Principe de la Métallisation:**

Le principe consiste à projeter à l'aide d'un gaz vecteur un matériau dit d'apport chauffé à haute Température sur un matériau support pour en modifier ses propriétés (**Figure I.1**). En s'agglomérant, les particules forment le revêtement. Les liaisons sont purement mécaniques [12].

### **I.13.1.3 Métallisation (projection à la flamme fil ou poudre)**

Le métal d'apport solide, qui peut se présenter sous forme de fil ou poudre, est fondu au moyen d'une source de chaleur importante, provenant de la flamme d'un chalumeau oxyacétylénique (**Figure 13**).



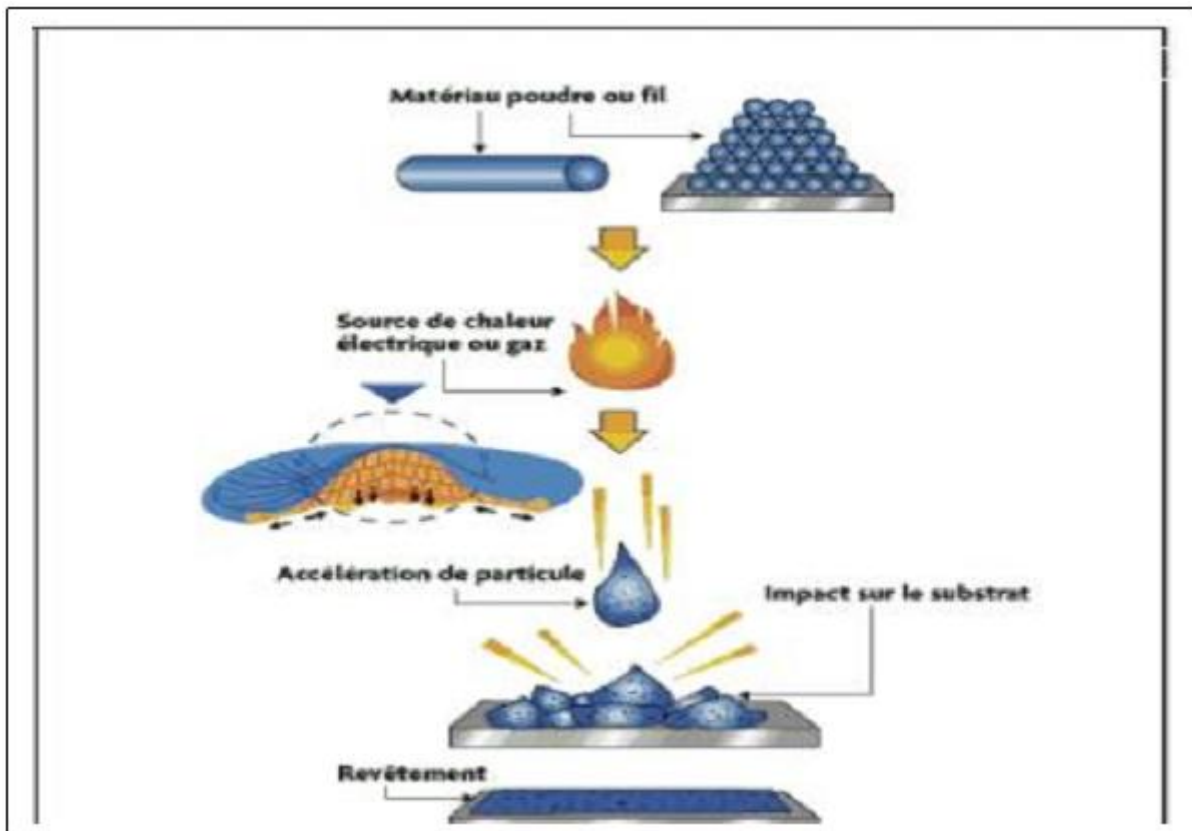
**Figure-I.13:**Buse de projection thermique a- à poudre. b- à fil

### **I.13.1.4 La mécanique d'accrochage**

L'accrochage s'obtient de différentes façons, suivant que le support est tendre ou dur. Dans le premier cas, sous l'effet du choc, les particules pénètrent dans la couche superficielle du support et s'y accrochent, réalisant ainsi une bonne adhérence du revêtement.

Dans le second cas, tout va dépendre de l'état des particules au moment de l'impact qui est fonction de la nature même du métal d'apport et du mode de fusion adopté pour fondre ce métal. En effet avec l'utilisation de la poudre et particulièrement dans le cas d'une fusion adoptée par flamme oxydas, une certaine quantité de celle-ci peut passer au travers de la source de chaleur sans être fondue. Ce n'est pas le cas avec les fils ou les cordons dont le métal constitutif est toujours porté à fusion au départ de la buse de projection (**Figure-14**).

Pour le mode de fusion, les pistolets à flamme **oxyde - gaz** permettent d'obtenir des particules fondues à des températures voisines de la température de fusion du métal d'apport, ce qui permet d'envisager qu'elles atteignent le support dans un état relativement liquide. Le résultat est sensiblement identique pour les pistolets à plasma d'arc alimentés en poudre, du fait d'un passage très court du produit dans la zone de fusion à haute température.



**Figure-I.14:** Schéma de principe de la projection thermique à la flamme (poudre ou fil) [13].

Par contre, pour un système à arc électrique, la température des particules fondues est beaucoup plus élevée (de l'ordre de **2000 °c**), ce qui permet de penser qu'elles arrivent encore à l'état liquide sur la surface du support.

Par conséquent et suivant les paramètres ci-dessus, on peut constater que le support peut recevoir des particules à l'état solide, magmatique (**Pâteux**) ou liquide, dont l'accrochage va différer suivant que :

☒ **Les particules sont solides ou magmatiques :**

Lorsque la température de fusion du métal d'apport est inférieure ou égale à celle du support, les particules en s'écrasant sur la surface vont s'échauffer par la transformation de l'énergie cinétique en chaleur au moment de l'impact. La liaison mécanique avec le support par fusion localisée, sera alors possible si la surface à traiter a été préalablement préparée. Lorsqu' au contraire la température de fusion du projectile est supérieure à celle du support et qu'il y a affinité entre les deux métaux, on obtiendra par diffusion la formation d'un alliage en surface.

### **☒ Les particules sont liquides :**

Dans ce cas, lorsque la température à l'impact est proche de la  $t$  température de fusion du support, on obtiendra une liaison superficielle à condition qu'il ait affinité entre les deux matériaux considérés.

En résumé, on peut dire :

Avec un acier projeté par un pistolet à flamme sur un support également en acier, on obtiendra un accrochage purement mécanique.

Avec ce même acier projeté par arc électrique sur le même support, on obtiendra des zones de liaisons ponctuelles entre les deux matériaux. La température des particules projetées avec un arc électrique étant plus importante qu'avec la flamme ou le plasma d'arc, il en résulte un accroissement de la vitesse d'oxydation avec l'oxygène de l'air pendant le transfert. Le métal ainsi projeté subira des modifications plus importantes. Dans tous les cas, il faut impérativement que les surfaces à traiter soient soigneusement préparées pour recevoir le revêtement afin d'optimiser son accrochage [13].

### **I.13.1.5. Métallisation à la flamme par pistolet à poudre**

#### **I.13.2.5.1. Principe**

Ce procédé est sans conteste le plus simple des procédés de projection thermique. Il utilise l'énergie d'une réaction chimique, son principe consiste à introduire un matériau sous forme de poudre, au centre d'une flamme oxyde-combustible produite par un chalumeau et de le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion [14].

#### **I.13.2.5.2 Fonctionnement**

Le pistolet de projection (**Fig. I.15**) est équipé d'un chalumeau **oxyde -gaz** de forme cylindrique alimenté en périphérie par les gaz de combustion (en général un mélange **oxyde -acétylène** ou **oxyde - propane**)



**Figure-I.15** : Pistolet à poudre [14]

La poudre est distribuée en son centre par gravité, où par un distributeur désolidarisé du pistolet.

- distributeur par gravité : Le réservoir à poudre, placé directement au dessus, ou sur le pistolet. La poudre contenue dans ce récipient tombe par gravité directe au centre du chalumeau, ou est entraînée par dépression dans la canalisation de l'un des deux gaz de combustion. Ce procédé est aussi appelé torche à gaz.

- distributeur par pression : un réservoir fermé, situé à proximité du pistolet, est équipé en partie basse d'un distributeur de poudre alimenté en air comprimé. La poudre est véhiculée jusqu'au pistolet par un tuyau et propulsée sur le substrat par le vecteur d'air comprimé. Le dispositif peut être complété par un vibreur ou une vis d'Archimède afin d'assurer une plus grande régularité de l'écoulement du produit.

- distributeur par dépression : le réservoir est muni d'un dispositif à dépression composé d'une cane d'entrée d'air et d'un suceur relié au dispositif d'aspiration. L'effet **GIFFARD**, produit par un courant d'air comprimé **29** traversant un système convergent divergent, permet d'entraîner la poudre jusqu'au pistolet.

- distributeur par cyclone : le réservoir à poudre est équipé d'un système cyclonique. Le mouvement tourbillonnaire qui met la poudre en suspension, est assuré par un courant d'air, qui permet de véhiculer celle-ci jusqu'au pistolet de projection [14].

Les applications Les températures de la flamme sont de l'ordre de **3000**°c, il en résulte que les températures atteintes par les particules projetées ne dépassent pas les **2000**°c environ (la chaleur de la flamme assure d'une part la fusion de la poudre et d'autre part le chauffage du support).

La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (**30** à **50** m/s). C'est pourquoi elles sont souvent accélérées par un vecteur d'air.

La distance entre la buse et le substrat est comprise entre **100** et **150** mm, pour le pistolet à flamme et **80** à **100** mm pour la torche à gaz. Ceci afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment important pour être fondues dans la flamme. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur à des taux horaires de dépôt de **2** à **3** kg/h, sans échauffement important du substrat (Température inférieure à **250** °c).

### **I.13.2.5.3. Les dépôts**

En raison de la faible vitesse des particules, les dépôts obtenus présentent généralement une faible adhérence (**20** à **40** MPA) et une porosité élevée (**10** à **20** %) par rapport à ceux obtenus avec d'autres techniques de projection.

Les matériaux les plus utilisés restent les alliages auto-fusibles, qui sont réchauffés à **1150 °c** après dépôt. Cette opération supplémentaire permet d'améliorer l'adhérence, d'éliminer en partie les oxydes et de diminuer la porosité.

Les dépôts à base d'acier, d'alliages à bas point de fusion ou de polymères sont également réalisables par le procédé flamme poudre.

D'après la littérature [15], les propriétés d'usage d'un rechargement revêtement/substrat dépendent des caractéristiques intrinsèques des zones qui le constituent et notamment de l'interface couche -substrat.

En effet, ces **30** interfaces sont souvent ressenties comme un point faible dans cette chaîne. Elle conditionne la tenue mécanique du système. Or la fonctionnalité recherchée dans un tel revêtement ne peut être assurée que si, sous une sollicitation mécanique externe, le revêtement reste adhérent au substrat qu'il doit recouvrir et protéger.

L'adhérence dépend de l'ensemble des phénomènes et des mécanismes qui maintiennent liés les composants macroscopiques et régissent la résistance à la rupture d'une interface [16].

La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques [17]:

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

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

#### **I.13.2.5.4. Les utilisations**

Ce type de matériel est assez répandu dans toutes les industries. D'un coût d'investissement peu élevé, il permet de résoudre des problèmes d'abrasion, **de corrosion, d'usure**, d'isolation thermique ou électrique. Il est aussi bien employé pour traiter des pièces neuves que des pièces usées.

#### **I.13.2.6. Métallisation à la flamme par pistolet à fil**

##### **I.13.2.6.1. Principe**

Comme pour le procédé à flamme poudre, son principe consiste à introduire un matériau, sous forme de fil, cordon ou baguette, au centre d'une flamme **oxyde-combustible produite** par un chalumeau et à le projeter sur le substrat. Mais contrairement à ce dernier, la flamme est uniquement utilisée pour fondre le matériau d'apport, dont la projection des

gouttelettes sur le support est assurée par un jet d'air comprimé qui atomise et propulse le matériau fondu [11].

### **I.13.2.6.2. Fonctionnement**

Le pistolet de projection est équipé d'un chalumeau **oxyde -gaz** de forme cylindrique alimenté en périphérie par les gaz de combustion, auxquels s'ajoute un vecteur d'air comprimé servant à l'atomisation de l'extrémité fondue du fil et à la propulsion des gouttelettes fondues sur le substrat.

### **I.13.2.6.3. Le pistolet se compose de deux parties distinctes :**

- la partie chalumeau, qui utilise des gaz de combustion identiques à ceux utilisés en flamme poudre, soit **oxygène + gaz combustible (généralement acétylène ou propane)**.

Elle se compose d'un mélangeur, d'une buse à gaz annulaire et d'une buse à air.

– la partie entraînement du fil, qui peut être animée soit par un système à turbine, soit par un moteur à air comprimé, soit un moteur électrique. Ces différents types d'entraînement, communiquent un mouvement de rotation à deux molettes enserrant le fil et le poussant au travers de la buse à gaz du chalumeau. Suivant le diamètre du fil, le serrage des molettes peut être obtenu par un système à ressort ou par une pression d'air. Dans un tel dispositif, la vitesse d'avance du fil doit pouvoir être réglée en fonction de son diamètre, de sa nature (température de fusion) et de la puissance de chauffe de la flamme. Dans le cas d'entraînement par turbine à air comprimé, il est nécessaire de passer par un réducteur de vitesse, de manière à communiquer aux molettes un mouvement suffisamment lent. La vitesse d'avance peut varier entre **0.5 et 12 m/mn** pour les pistolets portatifs. Cependant, les types d'entraînement cités ci-dessus s'avèrent insuffisants pour effectuer des dépôts importants, ou lorsqu'on est tenu à des réglages précis de défilement lent, pour l'utilisation de cordons ou baguettes en matériaux réfractaires par exemple. Pour réaliser des rechargements massifs, généralement effectués avec des gros fils rigides qui nécessitent de gros efforts d'entraînement, on utilise des moteurs électriques capables de tirer des fils jusqu'à **5mm** de diamètre. Ces moteurs sont généralement dissociés du pistolet et reliés à ce dernier par un flexible [14] en à la **Figure16**.



*Figure-I.16* :Poste de métallisation à la flamme en fil (MEI)

#### **I.13.2.6.4. Les applications**

Après une projection d'alliages auto fusibles, il est possible de refondre le dépôt afin de le lier métallurgiquement à son support [14].

#### **I.13.2.6.5. Les utilisations**

Ce type de matériel est assez répandu dans toutes les industries. Il permet de résoudre des problèmes d'abrasion; de corrosion; d'usure; d'isolation thermique ou électrique. Il est aussi bien employé pour traiter des pièces neuves que des pièces usées. C'est le procédé le plus utilisé en anticorrosion pour la projection de **zinc**, de **zinc aluminium** ou **aluminium**.

***Chapitre II***

***Etude Et***

***caractérisation des***

***Revêtements des***

***aciers faiblement***

***alliés***

## **II-1 Introduction :**

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des résultats de revêtement d'un acier ordinaire E37. Il s'agit de la métallisation à la flamme a fil appliquée à l'acier ordinaire E37 par le dépôt d'une couche de molybdène, et Ni -Al afin d'améliorer ses propriétés d'usure et de résistance à la corrosion. Nous présentons une étude détaillée de l'effet des différents paramètres à savoir, la préparation de la pièce, le préchauffage et la composition du molybdène et Ni –Al sur la microstructure et sur les propriétés mécaniques (dureté) des deux échantillons à revêt:

- Premier cas: échantillon revêt par un dépôt de molybdène à 1mm.
- Deuxième cas: échantillon revêt par un dépôt de Ni –Al à 3mm.

### **II.1- Matériau étudié :**

L'acier utilisé dans cette étude est un acier faiblement allié : il s'agit de l'acier E37, sa composition chimique est donnée par le tableau III.A suivant [18]:

	C	MN	SI	P	S	NI	SR	CU	MO
E37	0.07	0.58	0.01	0.016	0.007	0.045	0.025	0.019	0.01
	V	TI	AL	NB	W	SN	B	FE	CEQ
E37	0.07	0.003	0.047	0.053	0.005	0.002		95.21	0.0168

**Tableau II.1** -composition chimique De l'acier E37

## **II.2- Métallisation par projection thermique:**

### **II.2.1- Système de déposition :**

Nous avons utilisé le revêtement par projection thermique (**flamme-fil**) réalisé à l'atelier de plasma au niveau de la Société de Maintenance des Equipements Industriels (**MEI**) de M'silla. La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés dans lesquels un matériau d'apport (fil) porté par un pistolet est fondu grâce à une source de chaleur (**figure III.1**), puis il est projeté à l'aide d'un gaz vecteur sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie. La matière déposée peut être 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.



*Figure-II.1* : pistolet de projection flamme-fil.

### **II.3-Préparation des surfaces avant métallisation :**

#### **II.3.1-La préparation des surfaces :**

La métallisation pour qu'elle soit efficace, elle exige une préparation rigoureuse des surfaces à revêtir. Si quelque fois on peut obtenir, avec des particules liquides 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, ou au 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:

- une propreté qui est un état chimique.
- une rugosité qui est un état physique.
- un préchauffage éventuel.

#### **II.3.1.1-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

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 [19].

### **II.3.1.2-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. 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 [13] :

- 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 [19].

### **II.3.1.3- 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 [19].

### **II.4-Les modes de préparation :**

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

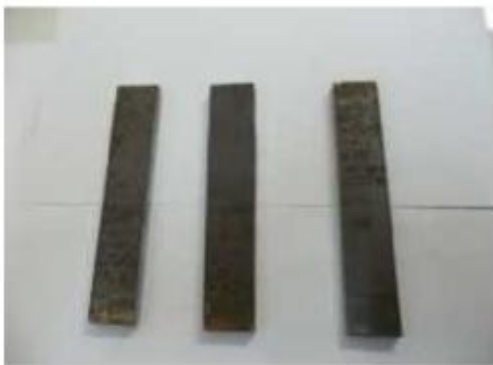
- celui dit du revêtement anti corrosion
- celui dit du rechargement mécanique.

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

- un sablage dans l'anticorrosion.
- un usinage dans le rechargement.

### **II.4.1-Le sablage :**

Le sablage est le terme impropre donné au traitement par impact, plus généralement appelé grenailage par les professionnels. C'est un procédé de traitement d'une surface par des projectiles petits et nombreux, destinés à induire des modifications physiques, chimiques ou mécaniques au substrat. La technique employée consiste à utiliser, soit un vecteur gazeux (généralement l'air comprimé), soit une centrifuge (**turbine**) pour projeter à grande vitesse des grains (projectiles) qui viennent percuter de façon répétée la surface des pièces (substrats). Le grenailage met en œuvre des projectiles extrêmement variés, différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres qui influencent le résultat.



**Figure-II.2 :** les substrats avant le sablage      **Figure-II.3 :** les substrats durant le sablage



**Figure-II.4:** les substrats après le sablage

### **II.5-Préparation des échantillons :**

Après l'enrobage, les échantillons pour l'examen micrographique subissent une étape de pré-polissage manuel progressif sur des papiers abrasifs de grains de plus en plus fins (P320, P500, P1200, P2000, P2500 ; P3000). En fin l'échantillon subit ensuite un polissage de finition à l'aide de papiers abrasifs (P5000) (**Figure II.5**), le polissage s'effectue sur une polisseuse située

au sein du laboratoire de métallurgie au niveau de l'université de Msila. Enfin les échantillons sont séchés à l'air chaud.



**Figure-II.5 :** L'échantillon subi un polissage.

Les observations microscope (optique et électronique) ont été réalisées après une attaque chimique au nital **3%** de composition:

\***3** ml d'acide nitrique **HNO<sub>3</sub>**.

\***97** ml d'éthanol **C<sub>2</sub> H<sub>5</sub> OH**.

### **II.6- Mode opératoire :**

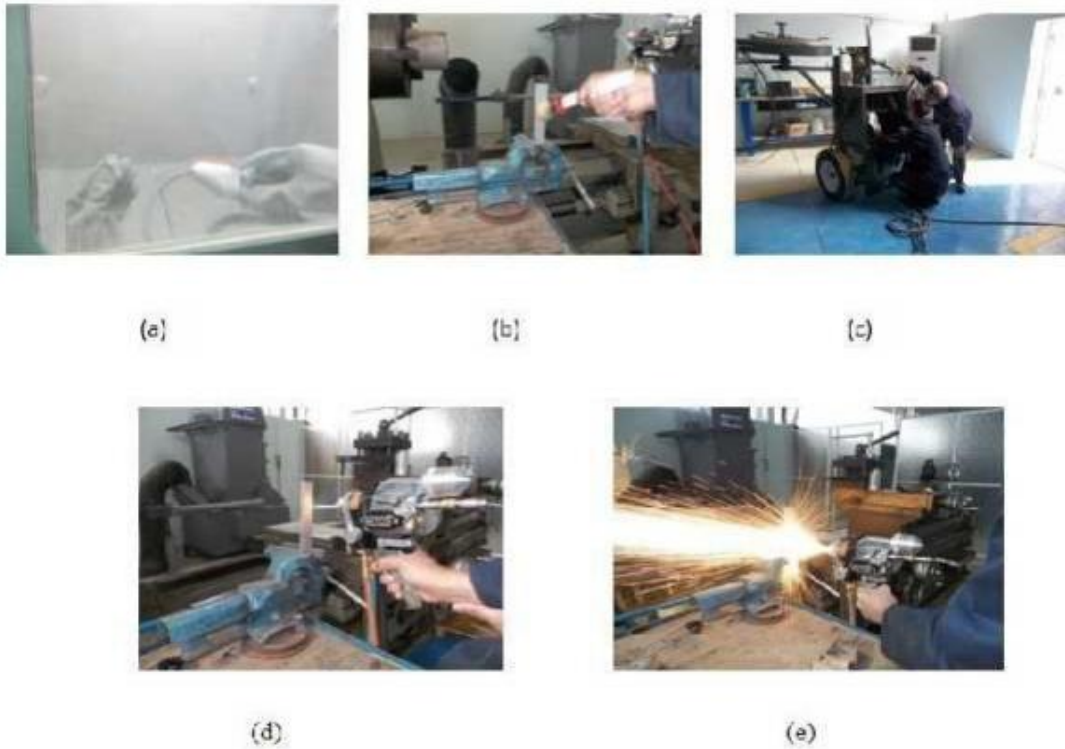
L'opération de revêtement pour nos échantillons (**E37**) et pour cela nous avons suivi les procédures suivantes : fixation d'échantillon,

**2)** allumage du gaz combustible,

**3)** échauffement de substrats,

**4)** insertion du fil de métallisation à travers le pistolet,

**5)** activation du serrage de fil à action rapide qui avance le fil jusque dans la flamme. Pour l'arrêter, il suffit d'appuyer sur la commande de serrage du fil.



- (a) Sablage
- (b) Nettoyage au trichloréthylène
- (c) Ajustage des paramètres de projection
- (d) Préchauffage avec le pistolet de projection
- (e) Projection à fil

**Figure-II.6** Les étapes pratiques du procédé de projection flamme-fil

**N.B :** il à noter que les couches de revêtements par projection flamme -fil réalisées sont deux types :

- Nickel-aluminium d'épaisseur 3 mm,
- Molybdène d'épaisseur 1 mm

### **II.7- Paramètres de projection influant sur le dépôt[19] :**

☒ **Débit des gaz :** Un excès d'oxygène (flamme oxydante) augmente l'oxydation du dépôt, donc sa Dureté est réduite sa résistance mécanique. Le dépôt devient fragile et difficile à usiner. Un excès du taux d'acétylène (flamme carburante) entraîne un charbonnage du revêtement. Dans les deux cas, on note l'usure prématurée des buses.

- ☒ **Pressions des gaz :** Une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal donc toutes les consommations (Dissipation d'énergie).
- ☒ **Diamètre du fil ou du cordon:** Un diamètre de fil ou de cordon plus grand augmente le Grain du dépôt et les pertes.
- ☒ **Vitesse du fil ou du cordon:** Trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur du grain, Trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.
- ☒ **Pression de l'air :**(air comprimé vecteur de la projection). Son accroissement diminue la grosseur du grain mais augmente l'oxydation du dépôt.
- ☒ **Distance de projection:** Trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence et surchauffe du dépôt trop grande, elle augmente le refroidissement des grains et entraîne une mauvaise adhérence.
- ☒ **Angle de projection:** En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.
- ☒ **Vitesse de balayage:** Trop rapide, elle augmente les pertes de métal et donne des épaisseurs de dépôt trop minces trop lente, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulières et élève la température du support.
- ☒ **Vitesse de rotation:** Trop rapide, elle entraîne un rebondissement des particules et une pollution du dépôt trop lente, elle entraîne une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.
- ☒ **Refroidissement:** trop rapide, il génère le délaminage des couches trop lent, il entraîne une surchauffe et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt

Les tableaux suivants considèrent les Paramètres de projection.

**Tableau II.2:** Paramètres de projection flamme-fil

Le matériau à projeté	Nickel-Aluminium	Molybdène
Le diamètre de fil est	3,2 mm	3,2 mm
La température de la flamme	3000 °C	3000 °C
La vitesse des particules	150 m/s	150 m/s.
La distance entre le chalumeau et le Substrat	100 et 200 mm	100 et 200 mm

☐ Pression d'allumage :

**Tableau II.3:** La Pression d'allumage de revêtement flamme-fil

	oxygéné	Acétylènes	(Air comprimé)
Pression d'alumag(Psi)	2.1	1	4.8

N.B : 1 PSI (unité américaine) =  $7 \times 10^{-2}$  bars

☐ Débit de projection :

**Tableau II.4:**Le Débit de projection de revêtement flamme-fil (Ni -Al, Mo).

	Oxygéné	Acétylène	Air comprimé
Débite de projection Ni /AL (L/min)	44	39	52
Débite de projection MO /AL (L/min)	35	15	55

**Tableau II.5:** La composition de fil Ni-Al.

symbole	élément	Masse atomique	Atome	Pour cent amasse
NI	Nickel	58.693	1	68.507
AL	Aluminium	26.981	1	31.492

**Tableau II.6:** La composition de fil Mo.

symbole	élément	Masse atomique	Atome	Pour cent amasse
Mo	Molybdène	95.96	1	100

## **II.8. méthode expérimentales :**

### **II 8.1 La micro-dureté :**

Les échantillons ont été prélevés à partir d'une tôle revêt, en vue de la mesure de l'évolution de la micro dureté. Les échantillons sont enrobés et polis (**voir Figure II.7**). Les mesures de la micro-dureté ont été réalisées à l'aide d'un pénétrateur de mode Vickers (**Voir Figure II.8**). La charge appliquée est de  $P=200$  g et le temps de 15s. Les points de mesures de chaque zone de la section du profil longitudinal de l'élément sont distants de 0.1 mm pour l'échantillon revêtu de 1 mm de molybdène. Les points de mesures de chaque zone de la

section du profil longitudinal de l'élément sont distants de 0.1mm pour les échantillons revêtus 3 mm de Nikel-aluminium



Figure-II.7 Echantillon de prélèvement de la micro-dureté des éléments enrobé.

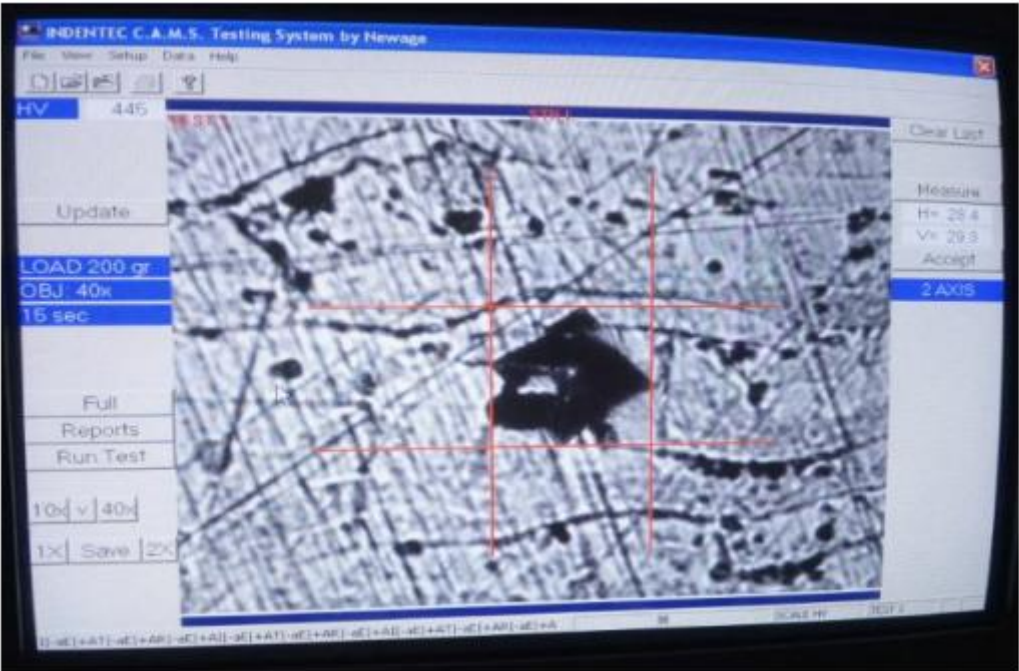


Figure-II.8 Micro-dureté

**Tableau II.6** Evolution de la micro-dureté des échantillons revêtus (Ni -Al 3 mm) et Evolution de la micro dureté du substrat

	Zone de revêtement de (NI_AL) 3mm					substrat				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Ponte de mesure										
Dureté HVNi_AL3mm	369	455	473	388	307	200	195	143	143	145

**Tableau II.7** Evolution de la micro-dureté des échantillons revêtus (Mo 1 mm) et Evolution de la micro dureté du substrat.

	Zone de revêtement de MO (1mm)					substrat				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Ponte de mesure										
Dureté HV(MO_AL1mm)	455	751	771	805	435	195	141	141	145	150

### **II.8.2- Microscopie Optique :**

Les échantillons sont observés à l'aide d'un microscope optique de type transmission et réflexion OLYMPUS BH2. (Fig.III.9), muni de 2 objectifs ( $\times 50$ ,  $\times 200$ )



**Figure-II.9** Microscope optique en transmission et réflexion OLYMPUS BH2

### **II.8.3- Microscopie Electronique à Balayage (MEB) :**

En microscopie électronique à balayage (MEB) on travaille en vide ordinaire de l'ordre de  $1.3.10^{-3}$  Pa avec toutes sortes d'échantillons sans préparation particulière. Le dépôt d'un film conducteur d'or ou de carbone est parfois nécessaire si l'on veut observer des échantillons isolants [20]. Un faisceau d'électrons est produit au sommet de l'appareil à l'aide d'un canon à électron (**Fig. II.9**). Ce canon est placé dans une colonne maintenue sous vide et les électrons sont obtenus en chauffant un filament. Le faisceau d'électrons primaires ainsi formé suit un chemin vertical dans la colonne du microscope. Il est ensuite focalisé sur l'échantillon grâce à des lentilles électromagnétiques et des bobines défléctrices. Lorsque le faisceau entre en interaction avec l'échantillon, les électrons secondaires sont recueillis par les détecteurs placés à cet effet et le signal obtenu est ensuite analysé et transformé en signal visuel. Dans tous les cas le grandissement va de 10 à 100000 au maximum. La microscopie électronique à balayage est actuellement la méthode la plus utilisée pour observer la morphologie et les microstructures des échantillons rechargés (en coupe transverse) et pour mesurer l'épaisseur de dépôt. Ces observations apportent également des compléments d'information sur le mode de croissance des couches et les précipités qui peuvent se former. Nous avons effectué des observations au MEB sur un microscope de type Joël /JSM-6390 (**Fig. II.10:b**)



**Figure II.10:** a) Microscopie Electronique à Balayage

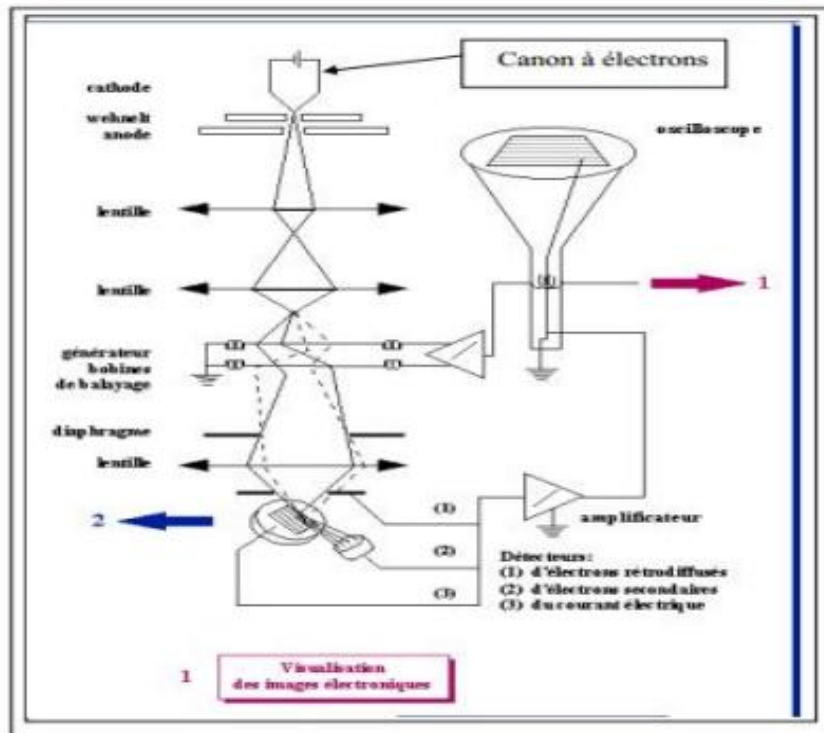


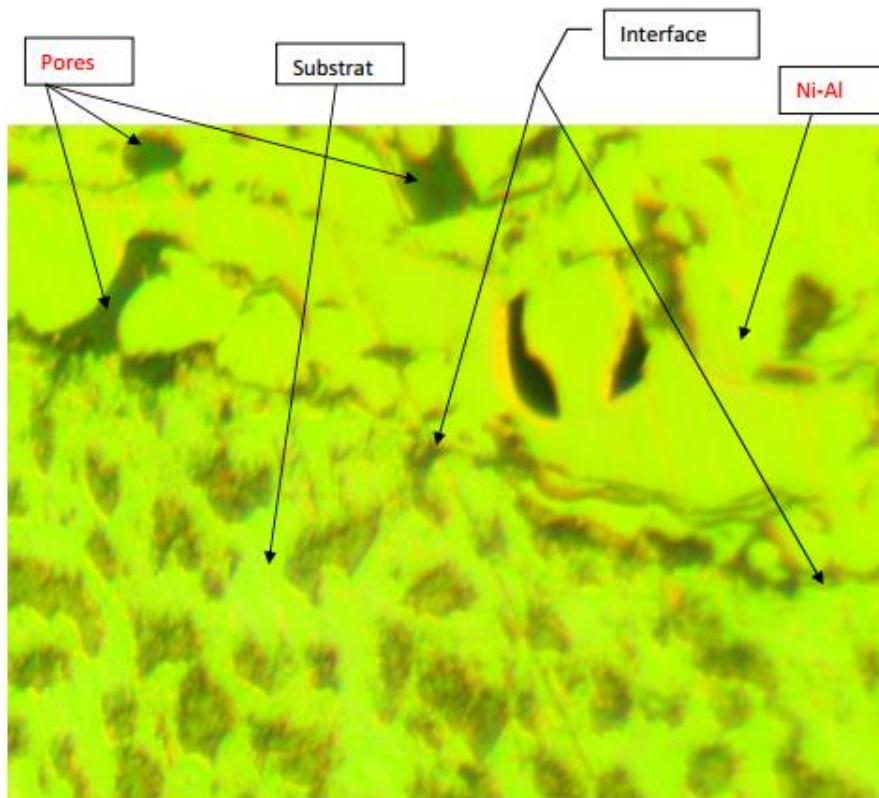
Figure-II.10: b)Microscope de type Jeol /JSM-6390Principe du MEB[21]

## II.9- Résultats et interprétations :

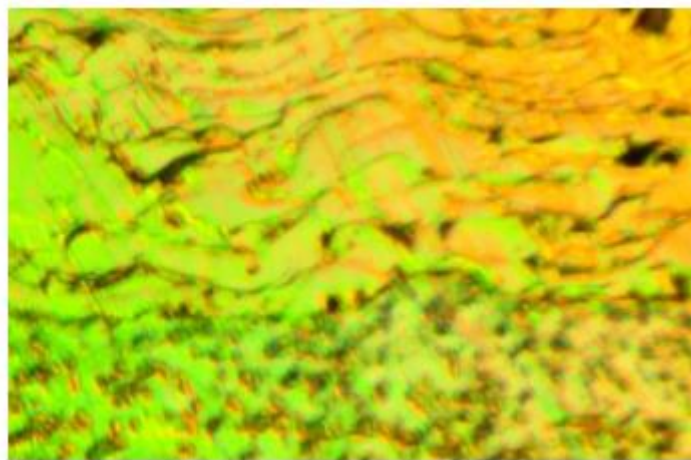
### *II.9.1- Observation métallographique:*

#### *II.9.1.1- Examen au microscope optique:*

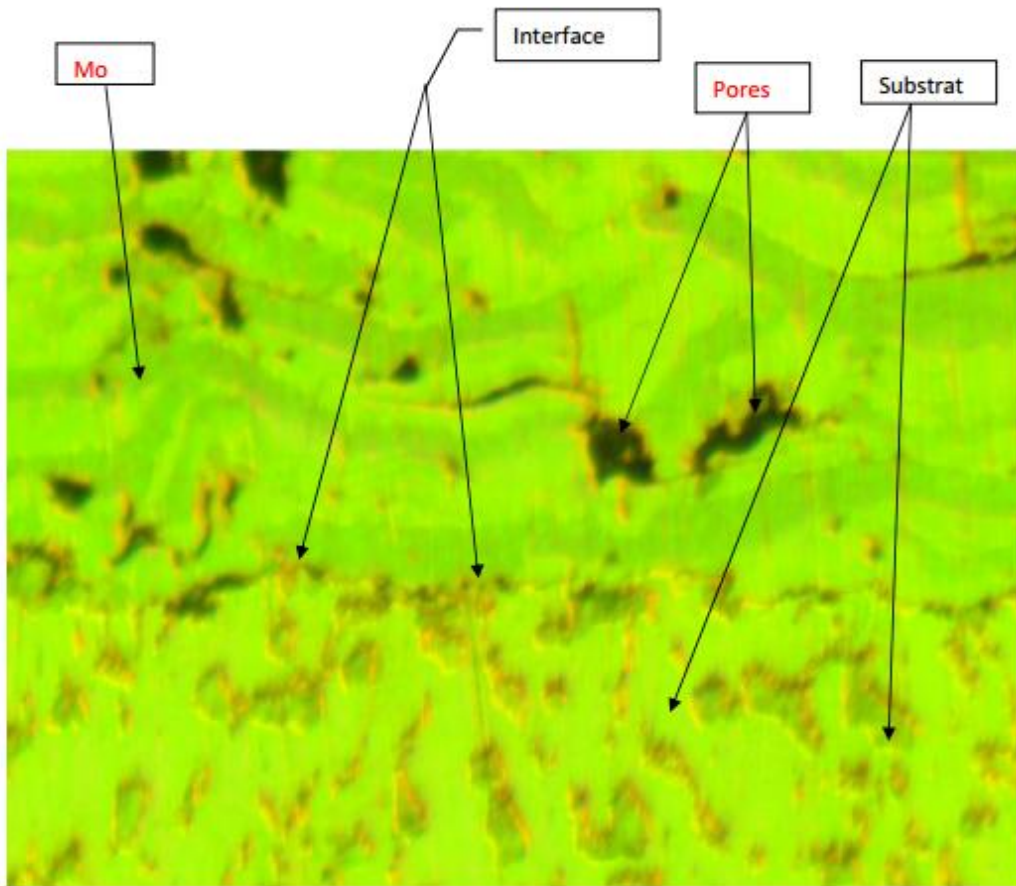
Après la métallisation, on a remarqué pour les deux types d'échantillons qu'il y a une différence microstructurale entre le cœur et l'interface de l'échantillon. Pour ce qui est du dépôt, les propriétés dépendent de sa microstructure qui est fortement conditionnée par les paramètres des particules à l'impact et par ceux du substrat. La vitesse des particules est de l'ordre de 200 m/s, sous l'effet de ces grandes vitesses, les particules viennent s'écraser sur le support (pièce à traiter) ; et durant le trajet, les particules se refroidissent légèrement et présentent un état pâteux au moment de l'impact. Le dépôt se présente sous la forme d'un amas apparemment compact et présente également des porosités relativement petites qui ne doivent pas dépasser le taux de porosité admissible variant de 10 à 20%. La liaison mécanique des particules avec le support par fusion localisée est partiellement réalisée: mauvaise préparation préalable de la pièce à traiter à savoir le réchauffement, la propreté et la rugosité. Concernant l'étude par microscopie optique de la couche de molybdène et Ni - Al déposé, on constate que cette technique a révélé des taches noires réparties sur toute la surface déposée (**Figure II.11**). Ces taches seront mises en évidence par une observation au **MEB**. Elle montre bien que le processus de dépôt n'est pas parfait. Ceci est peut être du aux conditions de métallisation qui s'effectuent d'une manière industrielle, contrairement à un dépôt effectué dans un laboratoire de recherche.



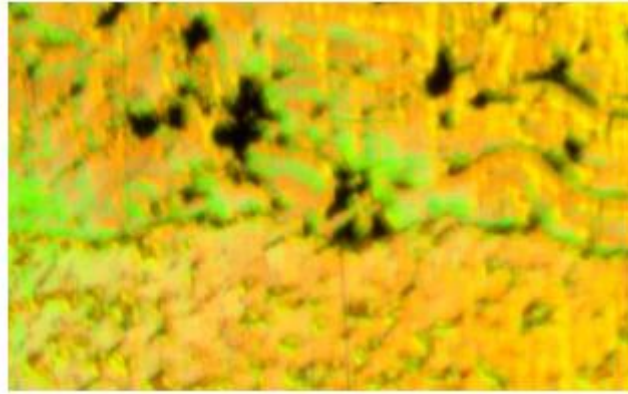
**Figure II.11:** Microstructure de l'échantillon revêtu par le Ni – Al grossissement  $\times 200$



**Figure-II.12:** Microstructure de l'échantillon revêtu par le Ni – Al a grossissement  $\times 50$



**Figure-II.13:** Microstructure de l'échantillon revêtu par le Mo

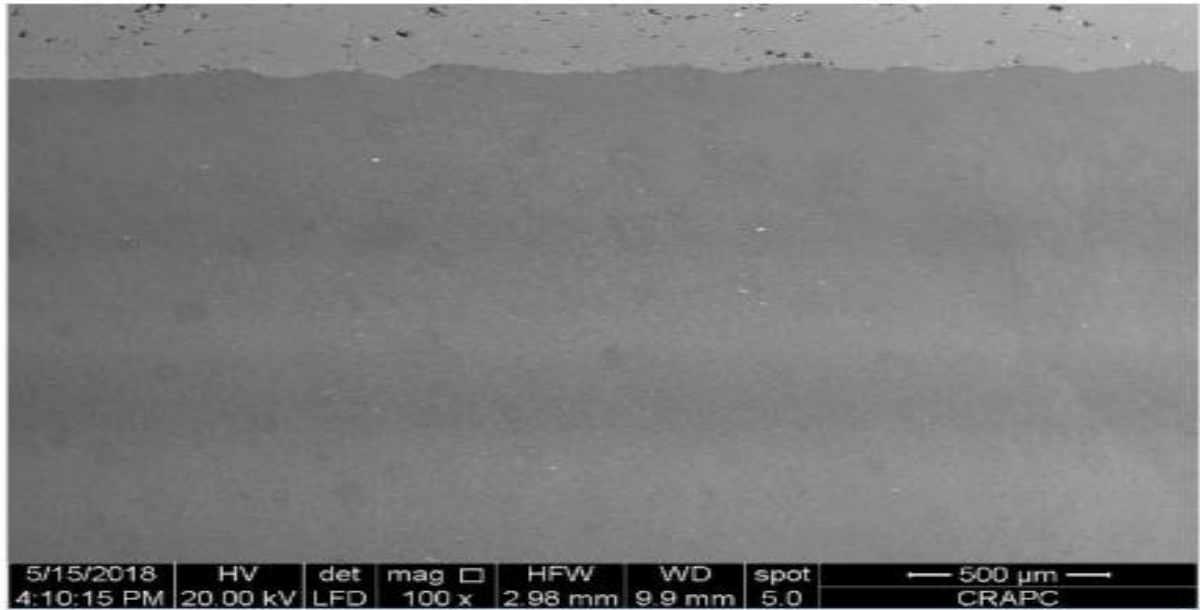


**Figure-II.14:** Microstructure de l'échantillon revêtu par le Mo grossissement  $\times 50$

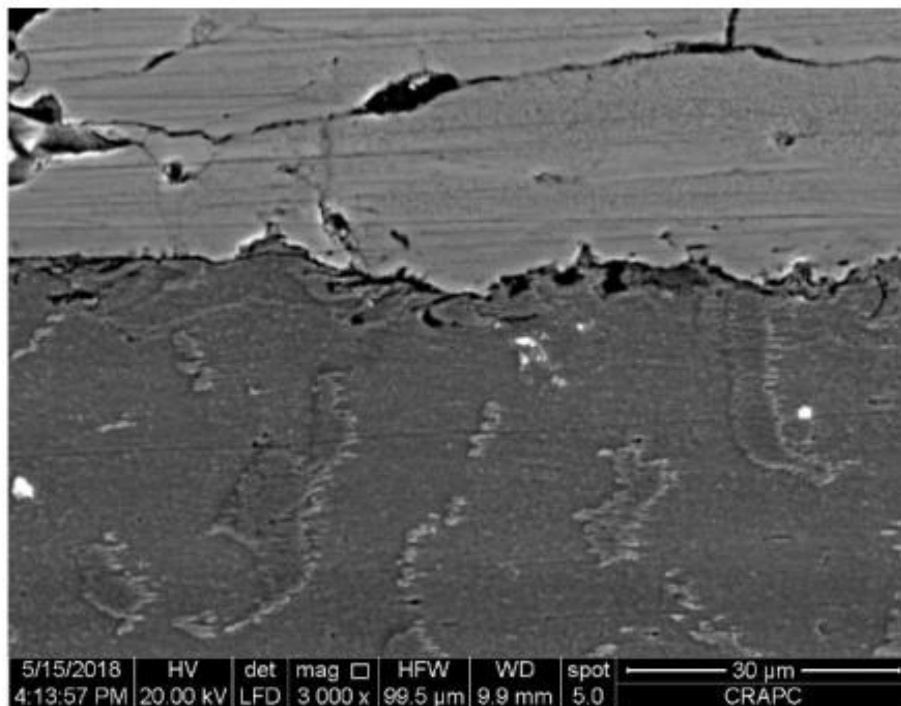
### **II.9.1.2-Examen au microscope électronique (MEB):**

Afin de mieux comprendre les variations microstructurales, ces mêmes échantillons ont été caractérisés par la microscopie électronique à balayage (MEB). Le dépôt formé par le molybdène et le Ni - Al présente des taches. Ces taches noires mises en évidence par la microscopie optique se sont avérées que ce sont des pores lorsqu'on a utilisé le MEB. La répartition de ces pores est bien illustrée dans **les figures II.15 et II.19**, où leurs tailles sont de plus en plus grandes à proximité de l'interface. De plus, ces deux micrographies montrent que l'accrochage du molybdène et Ni - Al sur l'acier n'est pas parfait, car on constate un vide entre les deux matériaux. Les dépôts projetés présentent:

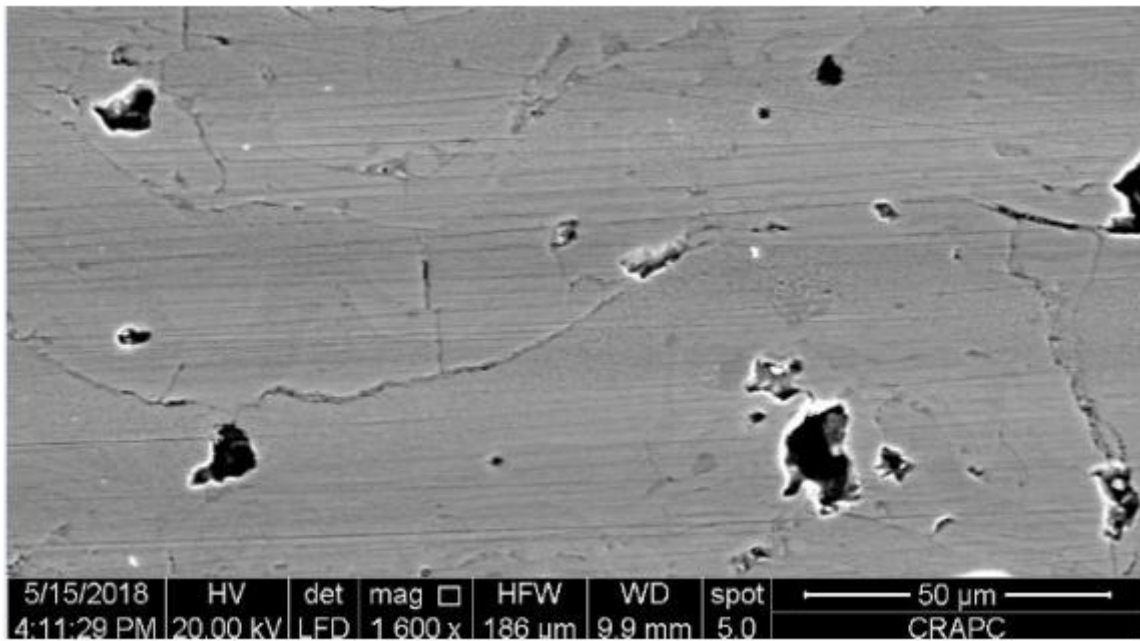
Une mauvaise adhérence et une cohésion partiellement enregistrée entre les particules d'une part, et un mauvais accrochage des particules avec le substrat d'autre part. Des publications prétendent que ces défauts sont dus à un mauvais écrasement des particules lors de l'impact (paramètres de projection non respectés) et à une mauvaise préparation de la surface à revêtir [21]. Ces pores sont dus à un remplissage partiel et à des gaz enfermés. La dimension des particules et leur vitesse ont une influence importante en ce qui concerne la densité des dépôts. Ces observations sont confirmées par celles obtenues par microscopie optique. L'observation microscopique au MEB du cœur de l'acier E37 (**Figure II.21 et 18**) confirme le résultat d'observation par microscopie optique.



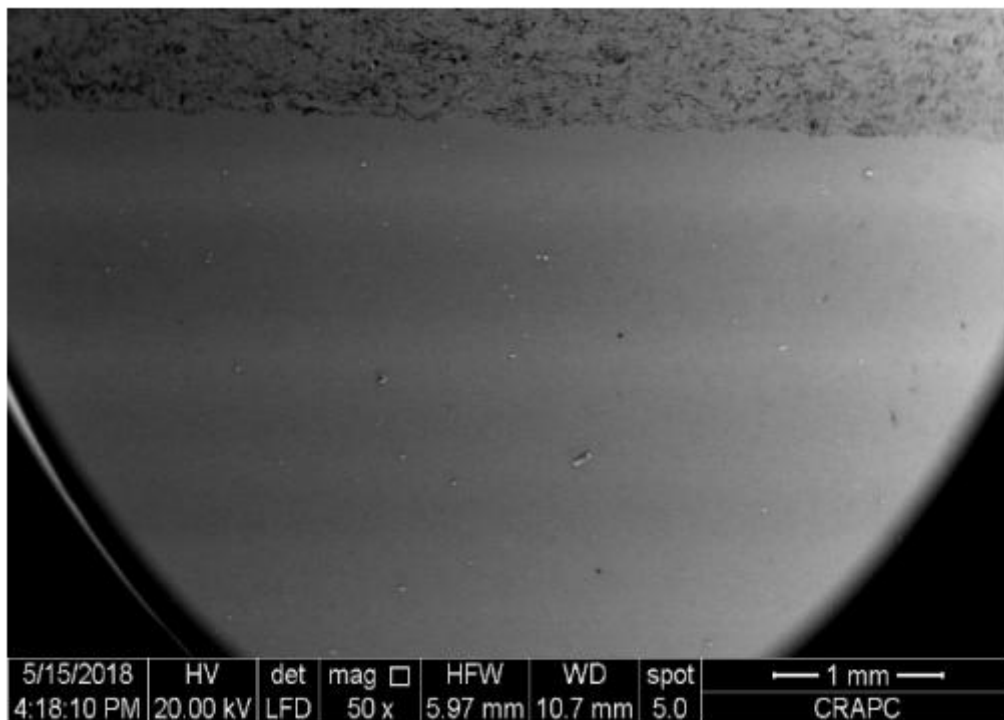
**Figure-II.15:** Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène a grossissement de 500µm



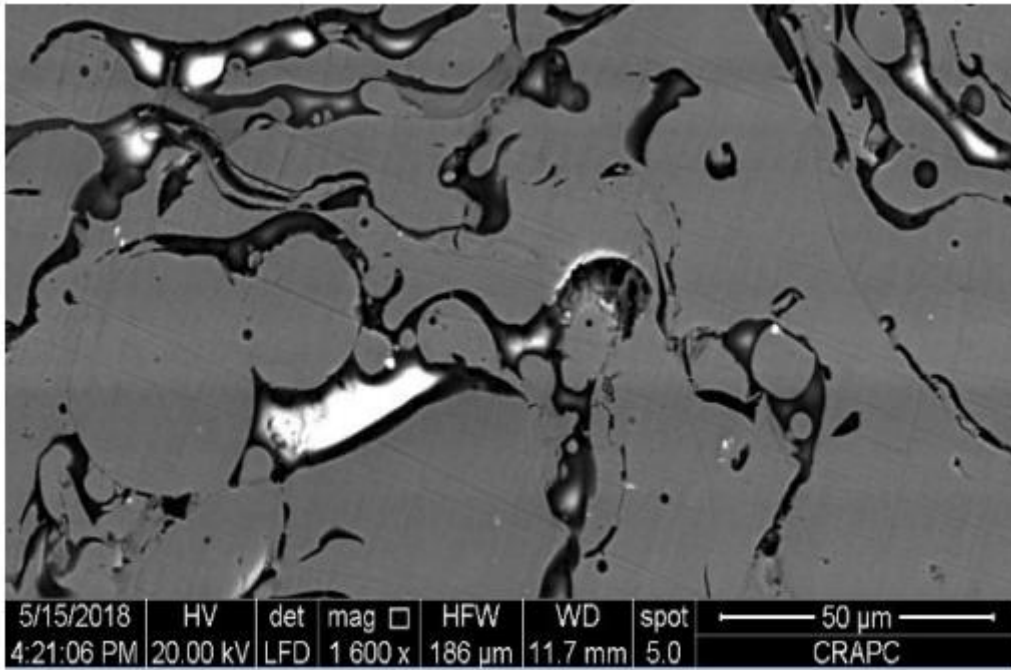
**Figure-II.16:** Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène a grossissement de 30µm



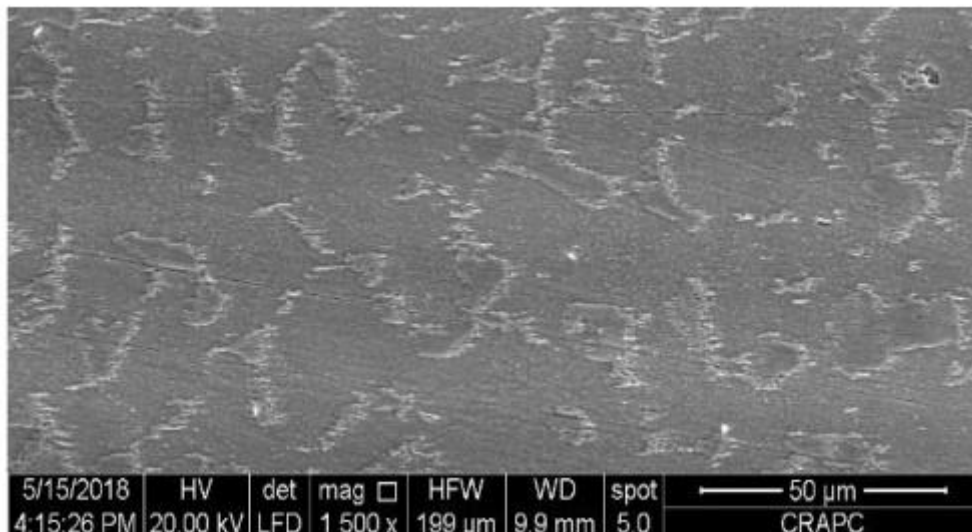
**Figure-II.17:** Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène. (Dépôt de molybdène.)



**Figure-II.19:** Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en Ni – Al à grossissement de 1 mm.



**Figure-II.19:** Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en Ni – Al a grossissement de 1mm.

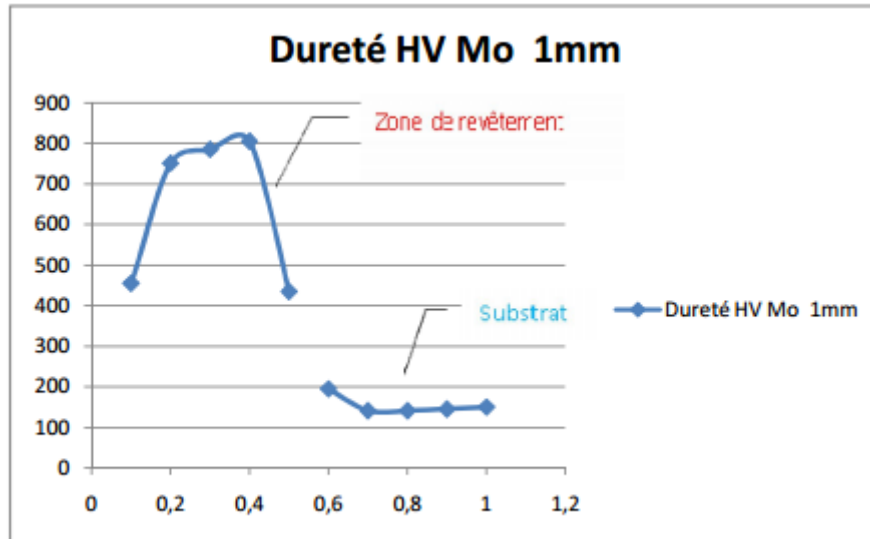


**Figure-II.21:** Microstructure du cœur de l'acier E37

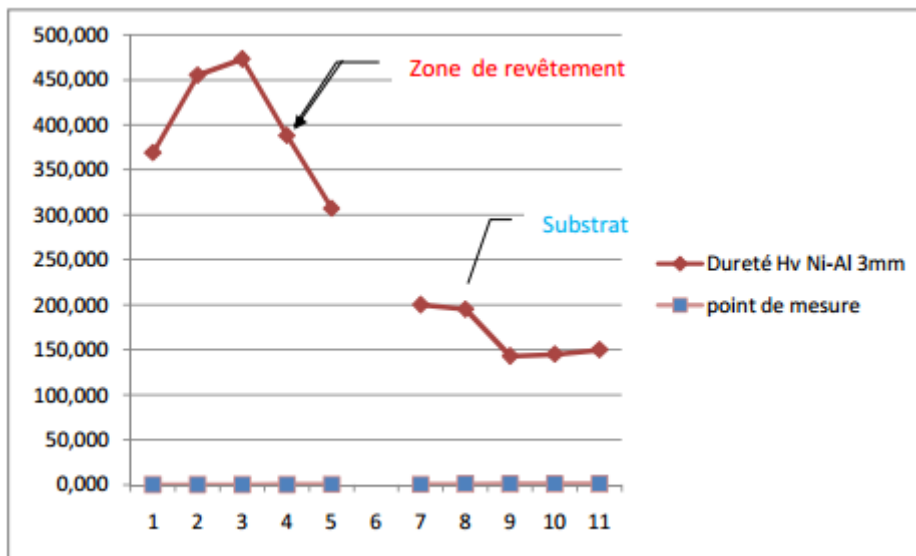
### II.9.2- Caractérisation par la Micro dureté Vickers :

Pour bien confirmer les résultats de l'étude microstructurale de l'acier E37, des profils de micro dureté Vickers ont été réalisés sur les deux échantillons (**Fig. II.14**) et (**Fig. II .15**). Les échantillons de référence présentent une dureté moyenne de 302 HV pour le Ni -Al, et une dureté moyenne de 399 HV pour le Mo. L'effet de métallisation sur la dureté des deux échantillons est bien remarquable ; Les courbes du profil de dureté de l'échantillon revêtu par le molybdène et Ni -Al sont présentées dans **la figure II .14 et II.15**. On constate que la

micro-dureté de la couche déposée varie considérablement jusqu'à atteindre une valeur maximale de 805 HV au 4<sup>ème</sup> point de mesure, les autres valeurs varient de (455 HV 700 HV) pour le molybdène ; par contre pour le Ni –Al la valeur maximale atteinte est de 473 HV au 3<sup>ème</sup> point.



**Figure-II.22:** Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu (Mo 1mm) et évolution de la micro dureté dû substrat.



**Figure-II.23:** Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu (Ni –Al 3mm) et évolution de la micro dureté dû substrat.



**Figure-II.24:** Profil de dureté des deux échantillons.

**Le tableau II.8 :** rassemble les résultats des valeurs de dureté dans chaque zone pour les deux types d'échantillon

**Tableau II.8:** Micro dureté des deux échantillons dans différentes zones

Zone	Echantillon revêtu par: Molybdène	Echantillon revêtu par: Nickel-Aluminium
Au dépôt	455 Hv	369 Hv
Près de l'interface Au cœur	435 à 195Hv 141Hv	307 à 200Hv 143Hv

### **II.10- Conclusion :**

Le revêtement (métallisation) est réalisé sur deux portées de l'ailette de ventilateur de tirage:

- **première portée :** métallisation à la flamme en fil en une couche de Molybdène à 1mm.
- **deuxième portée :** métallisation à la flamme en fil en une couche de Ni –Al à 3mm.

A partir de l'étude microstructurale et mécanique menée sur cet alliage revêtu, nous avons exploité des techniques de caractérisation pour extraire les informations suffisantes qui nous permettent d'expliquer les modifications structurales observées. L'étude détaillée des entreprises avec la mise en œuvre de la microscopie optique et électronique à balayage. Elle visait principalement la caractérisation macroscopique de la couche superficielle du substrat lors de la métallisation ainsi que le suivi de la structure du cœur de la pièce à traiter.

Il a été montré que lors de la métallisation, une légère diffusion locale du molybdène et Ni –Al s'est produite avec l'acier. Cette diffusion est justifiée par la diminution de la concentration du molybdène et Ni –Al à partir de la surface jusqu'à une certaine profondeur. Elle a été à l'origine de l'augmentation de la dureté superficielle de la pièce revêtu par le

molybdène jusqu'à 805 HV et 473 HV de **Ni -Al**. L'étude détaillée des caractéristiques morphologiques des différentes structures formées lors de la métallisation à la flamme, a été entreprise avec la mise en œuvre de la microscopie optique et électronique à balayage. Elle visait principalement la caractérisation macroscopique de la couche superficielle du substrat lors de la métallisation ainsi que le suivi de la structure du cœur de la pièce à traiter. Les propriétés mécaniques se sont beaucoup améliorées, dans la zone de dépôt, à l'interface et près de l'interface où on a enregistré 435Hv (éch ; molybdène) et 307Hv (écha ; **Ni -Al**). L'observation au MEB a montré la présence de pores à l'intérieur du molybdène et **Ni -Al** déposé.

# **Chapitre III:**

***Etude Microstructural et le  
comportement à l'usure du  
revêtement par poudre NiCrBSi  
renforcé par WC\_CO par  
projection à la flamme sur  
acier inoxydable martensitique***

## II.1. Introduction

L'oxygène à haute vitesse (**HVOF**) est une technologie qui implique le dépôt de gouttelettes de poudre fondues ou semi-fondues sur un substrat pour former un revêtement de faible porosité [22-23] et de haute force d'adhésion [24-25]. Une large gamme de revêtements **HVOF** appliqués dans presque tous les domaines industriels avec différentes combinaisons de matériaux de substrat de revêtement sont utilisés pour appliquer des couches protectrices au matériau surfaces [26-27]. Pour la limitation des coûts de maintenance et l'obtention des revêtements pour les composants exposés à des intensités d'usure ou stabilité thermique, les surfaces dures contenant du carbure de tungstène (**WC**) sont généralement utilisés. Pendant le processus de pulvérisation, les WC avec leurs températures de fusion élevées ne fondent pas et deviennent inclus dans le revêtement pulvérisé sous forme de particules dures et combiné avec le plomb liant relativement ductile à d'excellentes propriétés mécaniques [28-29]. Le cobalt agit comme un liant pour former un tribal film dense et ductile sur la surface usée pour protéger la surface sous-jacente d'une usure supplémentaire, ce qui entraîne un taux d'usure très faible [30]. Les matériaux durs **WC - Co** peuvent être densifiés par frittage en phase liquide et les propriétés mécaniques de ces matériaux dépendent de leur composition et de leur microstructure (en particulier de la granulométrie de la phase carbure [31]) Le collage purement mécanique entre le revêtement et le substrat, les fissures et la porosité sont inconvénients au détriment des performances des revêtements [32]. Dans de nombreuses recherches, les solutions sont recherché en ce qui concerne la possibilité d'inclure des particules de céramique dure dans des alliages métalliques en utilisant plusieurs techniques de dépôt afin d'augmenter la résistance à l'usure, la stabilité mécanique et la corrosion notamment à des températures élevées [33-34]. Le but de la présente étude était d'améliorer la résistance à l'usure par glissement des auto-fluxant **Ni Cr B Si** revêtements d'alliages par renforcement avec de la poudre WC-Co pulvérisée thermiquement suivi d'un secondaire traitement par refusions, afin d'améliorer leurs propriétés telles que pulvérisées. Les particules de **WC-Co** étaient ajoutées à la poudre **Ni Cr B Si** à différents rapports dans le but d'obtenir des revêtements avec un contenu en matériaux durs. Afin d'évaluer l'effet de la teneur en **WC-Co** dans le mélange, les expériences d'usure ont été réalisées avec différents rapports de mélange. Suite aux tests d'usure, les surfaces usées ont été étudiées au moyen de la microscopie électronique à balayage (**SEM**) avec la portée pour déterminer l'effet de **WC-Co** particules sur le mécanisme d'usure des revêtements.

## III2. Procédure expérimentale :

### III 2.1. Matériaux et procédés :

Le revêtements constitués d'alliages auto-fondants (**Ni Cr B Si**) avec différents ajouts de poudres de cermet (10,20 et 30% de **WC-Co**) ont été déposés par projection à la flamme sur des substrats en acier inoxydable martensitique. Les mélanges de poudre utilisés pour les

couches ont été obtenus après un processus de mélange mécanique. **Tableau 1** présente les exemples de codes et les compositions des poudres de revêtement. Dans les exemples de codes, le premier 2 chiffres représentent le pourcentage de poudre auto-fondante (en% en poids), tandis que les 2 derniers chiffres représentent le pourcentage de la teneur en poudre de cermet (en% en poids). Par exemple, le revêtement réalisé à l'aide d'un mélange de poudre avec 80% de **Ni Cr B Si** - 20% de **WC-Co** (% en poids) a été indiqué comme un revêtement 80/20. Antérieur à pulvérisation, une machine de sablage a été utilisée pour rendre la surface de travail de l'acier inoxydable substrat. Parce que pendant le processus de projection thermique, la poudre devient liquide et se déforme impact, un traitement de refusions à la flamme oxyacétylénique est appliqué, entraînant également le raffinage de la morphologie des couches et amélioration de l'adhérence revêtement / substrat. Après pulvérisation et refusions, les revêtements ont été examinés en coupe avec un microscope électronique à balayage (**SEM** / Philips XL30 **ESEM**), combiné avec une analyse aux rayons **X** à dispersion d'énergie (**EDX** / Company) à des grossissements entre **50X** et **1000 X**, afin de caractériser la microstructure des couches et la qualité des interfaces revêtement / substrat.

**Tableau 1.** Les exemples de codes et les poudres de revêtement avec différentes teneurs en WC-C

**Tableau-III.1.** Les exemples de codes et les poudres de revêtement avec différentes teneurs en WC-Co

<b>Sample code</b>	<b>coating Powder (in wt. %)</b>
90/10	90%Ni _ Cr _ B _ Si + 10% WC CO
80/20	80%Ni _ C r _ B _ Si + 20% WC CO
70/30	70%N i _ Cr _ B _ Si + 30% WC CO

### **III2.2. Mesure de la résistance à l'usure**

Les tests d'usure ont été réalisés conformément à la norme **ASTM G99**. Pour des résultats plus précis, les surfaces des échantillons ont été spécialement préparées par meulage et polissage, et enfin dégraissées avec acétone. De l'air avec une humidité de **50%** a été utilisé comme milieu d'essai et la température n'a pas dépassé **20 ° C**. Le tribomètre **CSM Pin-on-Dis** se compose d'un bras flexible qui a une boule de **WC-Co** sur la pointe, d'un diamètre de **6 mm**, qui agissent sur la surface de l'échantillon avec une force de **10 N (F)**. La trajectoire le rayon était de **8 mm** avec une vitesse linéaire de **16 cm / s**, tandis que le nombre de tours était de **10 000**. La (les) largeur (**s**) et la profondeur (**h**) de la piste d'usure ont été mesurées à l'aide d'un microscope numérique, afin de calculer l'aire de la section transversale (**A** - relation **1**). La quantification du taux d'usure (**K** relation **2**) était réalisée en utilisant les valeurs de la quantité de matière perdue (**V** - relation **3**), la charge appliquée (**F**) et la longueur de la trajectoire (**d**).

$$(1) A = h/6 * s (3 * h^2 + 4s^2)$$

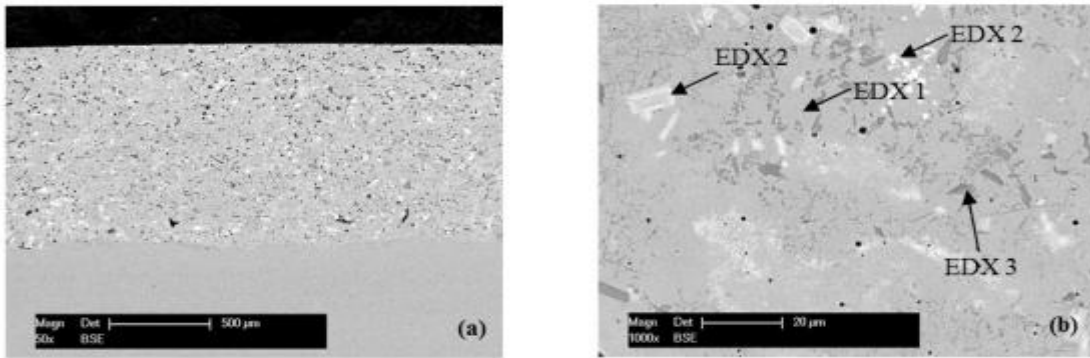
$$(2) K = V / F * d$$

$$(3) V = 2P * A$$

### **III3. Résultats et discussion :**

#### **III3.1. Caractérisation des revêtements :**

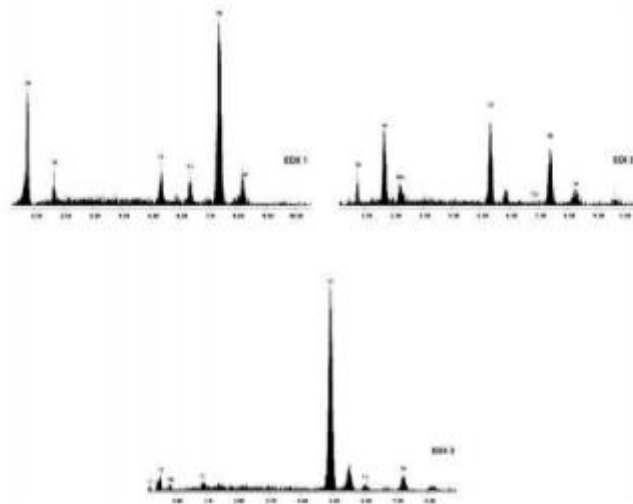
La microstructure des couches concernant la morphologie et la répartition des différents phases a été examinée par microscopie électronique à balayage (**SEM**) et la composition chimique des différents éléments structuraux ont été déterminés par spectroscopie à rayons **X** à dispersion d'énergie (**EDX**). L'analyse **EDX** a été utilisée afin d'évaluer la composition chimique des phases, différant par forme, distribution et nuance de gris. Les micrographies et les résultats de l'analyse **EDX** sont représentés sur **les figures 1 à 4**.



**Figure-III.1. Micrographies SEM pour l'échantillon 90/10:**

(a) - magnitude **50x** et (b) - magnitude **1000x**. Sur la base des résultats de l'analyse **EDX** (voir **figure 2**) réalisée pour chaque nuance de gris ou de blanc correspondant à une phase particulière de la microstructure, on peut conclure:

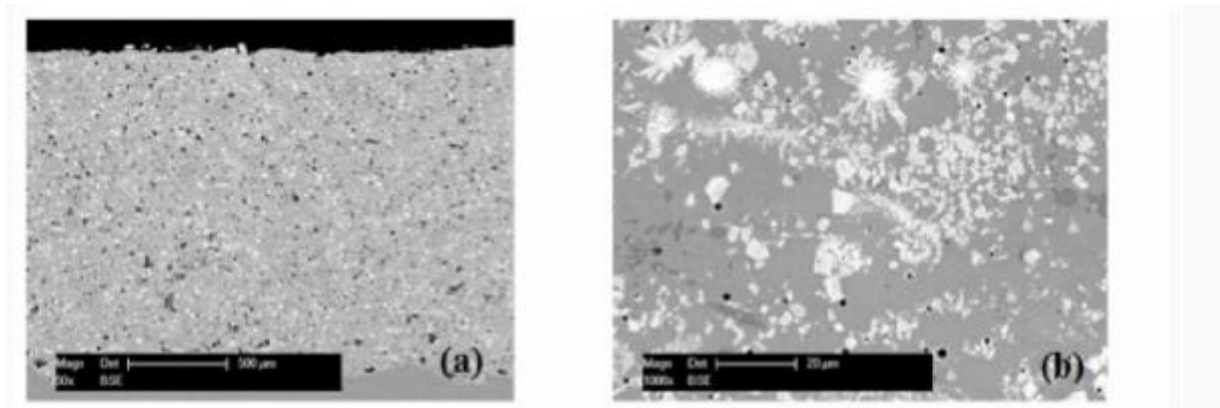
Les zones avec la nuance de gris correspondant au point marqué **EDX 1** représentent matrice métallique qui contient principalement des éléments tels que **Ni**, **Cr** et **Fe**; les particules marquées **EDX 2** (gris très clair à blanc) correspondent à une phase riche en tungstène carbure (**WC**); les zones marquées **EDX 3** (gris foncé) sont riches en Cr (carbures de chrome et chrome Borures).



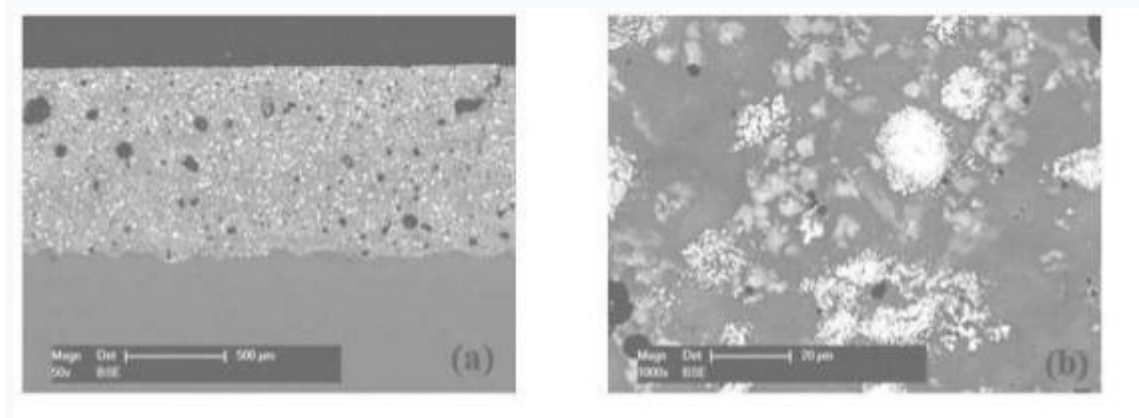
**Figure-III.2. EDX analyse de simple composition microstructural 90/10**

Comme le montrent les micrographies de **la figure 3** et de **la figure 4**, les revêtements constitués d'alliages auto-fondants en combinaison avec **20%**, respectivement **30%** de particules dures de **WC-Co** sont constituées des mêmes phases que le couche qui contient

10% de WC-Co. La seule différence est la proportion entre les phases (métal matrice, carbures, borures et siliciure



**Figure-III.3.** Analyse des sections de cours de microstructure de simple sections 80/20(a)\_  
magnitude 50x et(b) \_ magnitude 1000x

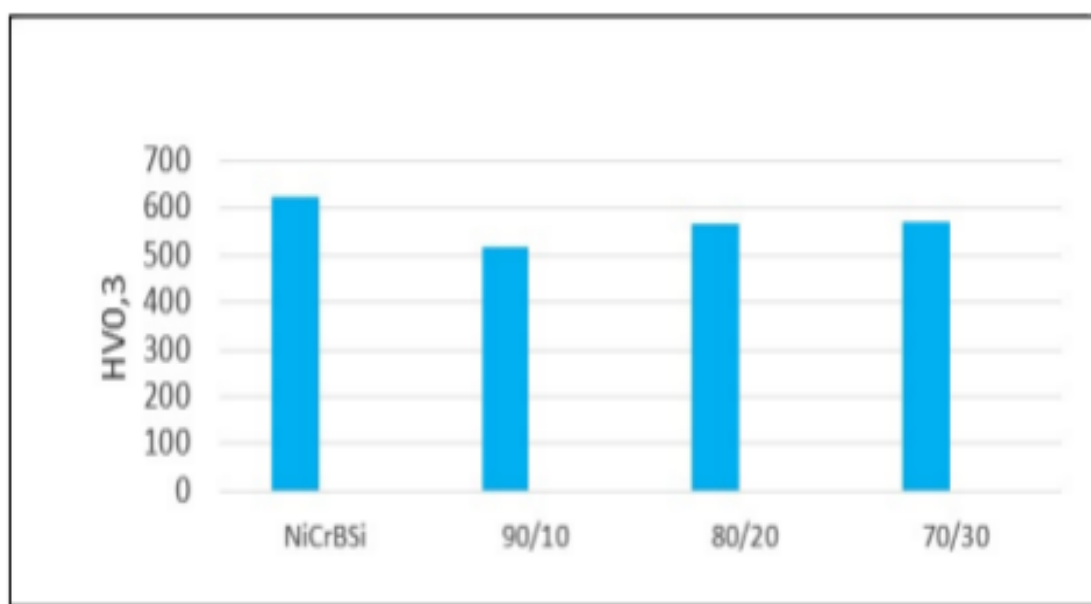


**Figure-III.4.** Analyse microstructural de simple course sections 70/30(a)\_ magnitude 50x  
et (b) \_ magnitude 1000x

### **III.2. Essais de dureté :**

Les mesures de dureté ont été effectuées sur des échantillons montés à l'aide d'un testeur Zwicky de type Z3.2A. Afin de déterminer la dureté Vickers, une charge de **0,3** kgf a été appliquée pendant **15** secondes. **La figure 5** montre les valeurs calculées en moyenne de **10** mesures, après les valeurs les plus élevées et les plus faibles ont été supprimés. On a pu observer que les **10** mesures pour chaque type de revêtement conduisaient à très différentes

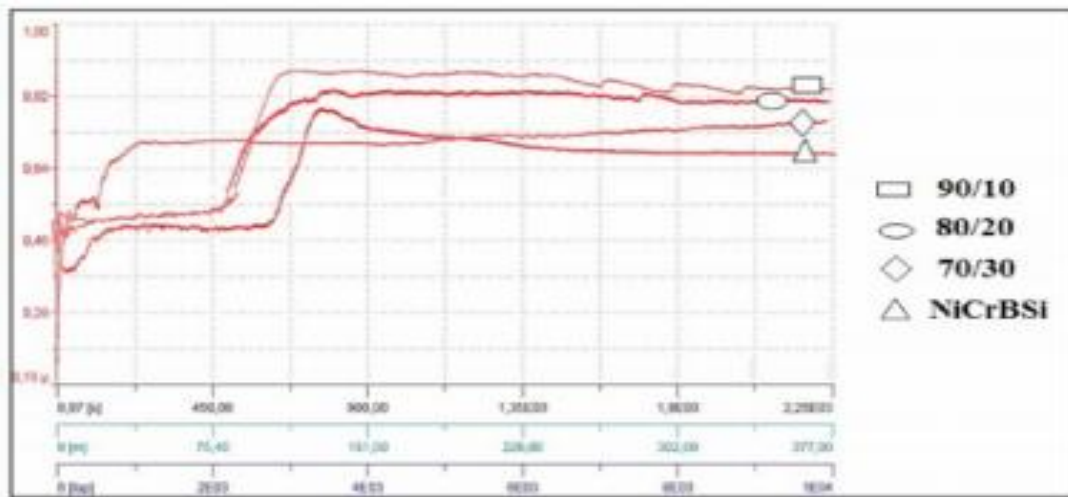
valeurs de dureté, déterminées par la distribution de phase non homogène dans les couches. Comme la taille de la piste du pénétrateur est directement associée à la dureté de l'élément structurel, les traces obtenues dans les zones de couches avec une teneur plus élevée en phases dures avaient de petites valeurs de diagonales, tandis que les phases avec des valeurs de dureté inférieures conduisent à des valeurs plus élevées de diagonales générées par le pénétrateur. Comme le montre **la figure 5**, pour des quantités allant jusqu'à **30%** de particules dures ajoutées à l'auto-fluxant alliage, l'augmentation de la teneur en cermet conduit à l'augmentation de la dureté, mais en relation avec la Revêtement( **Ni Cr B Si**), la teneur en **WC-Co** ajoutée ne conduit pas à des valeurs de dureté plus élevées, car il était attendu



**Figure 5.** Les valeurs plus élevées de diagonales générées par le pénétrateur

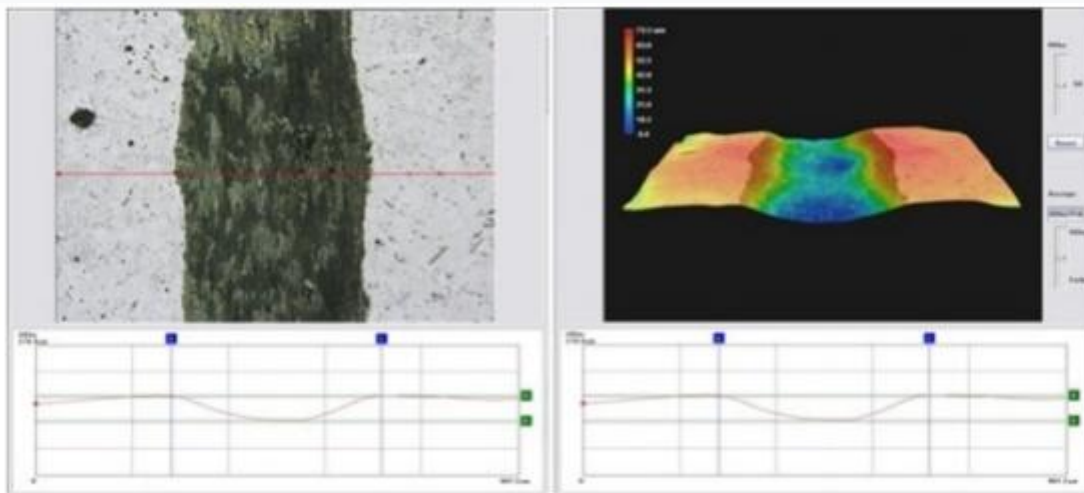
### **III.3. Test d'usure par glissement :**

Les coefficients de frottement pour les quatre revêtements de composition chimique différente (**Ni Cr B Si**) et mélange: 90/10, 80/20, 70/30) obtenus par les déterminations d'usure par glissement Pinon-Dick peuvent être vues dans **la figure 6**.



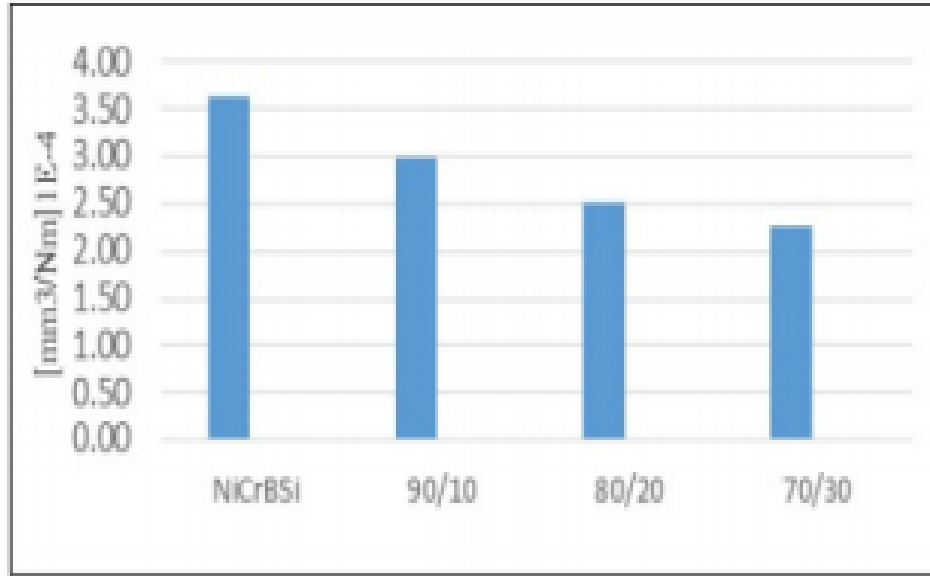
**La figure-III.6.** La variation de fraction coefficients pour les quater revêtement

Dans le cas de la couche **Ni Cr B Si**, les valeurs du coefficient de frottement se sont stabilisées. Les résultats présentés sous forme d'histogramme sur **la figure 8** montrent la résistance à l'usure du revêtement étudié. Ainsi, la couche d'alliage auto-fondant a la valeur la plus élevée du taux d'usure en comparaison avec les revêtements mixtes (90/10, 80/20, 70/30).



**La Figure-III.7** Topographie de à mixtes l'usure enduisant 70%Ni Cr B Si + 30% WC Co

On peut voir que l'augmentation de la teneur en composants (**WC-Co**) des revêtements augmente la résistance à l'usure,



**La Figure-III.8.** Les valeurs du taux d'usure par glissement sur les surfaces des revêtements.

#### **III.4. Conclusions :**

Les investigations menées dans le cadre de cette étude ont montré que le renforcement des alliages auto-fondants les revêtements des cermets **WC-Co** entraîne une augmentation significative de la résistance à l'usure par glissement. Dans ce En ce qui concerne, l'ajout de **10%**, **20%** et **30%** de **WC-Co** aux couches de (**Ni Cr B Si**) conduit à une diminution de la taux d'usure de **17%**, **31%** et respectivement **38%**. Partant de ces considérations, on peut conclure que l'ajout de matériaux durs aux alliages auto-fondants étend leur applicabilité aux domaines dans lesquels une meilleure résistance à l'usure est également requise.

En revanche, les résultats concernant le coefficient de frottement correspondent à ceux obtenus pour la résistance à l'usure, alors que les valeurs de dureté des couches testées ne peuvent pas être directement associées, car les phénomènes apparaissant à l'interface entre la couche de test et la boule **WC-Co** du Pinon Dick Tester sont de nature plus complexe. Il faut considérer que les valeurs des coefficients de frottement sont, entre autres, le résultat de la topographie, de la morphologie et de la composition chimique des le tribaux film généré le long de cette interface.

### **Conclusion générale :**

Ces dernières années, **les revêtements** se sont développés d'une manière significative et ont permis d'avoir des performances considérables en termes de résistance à l'usure et d'amélioration de la durée de vie des pièces.

Les propriétés du revêtement à prendre en compte, dans le choix de la technique de projection peuvent être classées en quatre grandes catégories :

- **Les propriétés mécaniques** (modules, fragilité, contraintes internes, coefficient de dilatation thermique...)
- **Les propriétés morphologiques** (épaisseurs, forme, rugosité inter faciale et superficielle...)
- **Les propriétés chimiques** (réactivité avec le milieu ambiant et avec le matériau antagoniste dans le cas d'essais tribologiques...)
- **Les propriétés microstructurales** (défauts, porosité, structure...)

## References Bibliographiques

- [1] International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER)  
E-ISSN 2455–1392 Volume 2 Issue 4, April 2016 pp. 556 - 563  
Scientific Journal Impact Factor: 3.468  
<http://www.ijcter.com>
- [2] Frank J. Hermanek, Thermal Spray Terminology and Company Origins, First Printing, 2001, ASM International, Materials Park, OH
- [3] R. Knight and R.W. Smith, Thermal Spray Forming of Materials, Powder Metal Technologies and Applications, Volume 7, ASM Handbook, ASM International, 1998, pp. 408–419
- [4] R.C. Tucker, Jr., Thermal Spray Coatings, Surf. Eng., Vol.5, ASM Handbook, ASM International (1994), pp. 497–509
- [5] Katica simunovic, "thermal spraying," welding engineering and technology, pp.1-12.
- [6] Coddet C, Barbezat G., Fauchais P. et Montavon G., "Projection Thermique et Revêtements épais : principe de base", Ecole thématique Du CNRS, paru dans Revêtements et Traitement de Surface, Presses polytechniques et universitaires Romandes, 1998, 467-477.
- [7] Sun, L., Berndt, C.C, Gross, K.A. and Kucuk, A. (2001), —Material Fundamentals and Clinical Performance of Plasma Sprayed Hydroxyapatite Coatings: Review, J. Biomed. Mater. Res: Appl. Biomater, Vol. 58, pp. 570–592.
- [8] Pfender, E. (1994), —Plasma Jet Behavior and Modeling Associated with the Plasma Spray Process, Thin Solid Films, Vol. 238, pp. 228–241.
- [9] "Sultzer Metco Spray World: All about Thermal spray Technology", CD-ROM, 1998.
- [10] Fauchais, P., Coudert, J.F. Vardelle, M. Vardelle, A. and Denoirjean, A. (1992), —Diagnostics of Thermal Spray Plasma Jets, J. Thermal Spray Technol., Vol. 1, pp. 117–128.
- [11] Amardeep S. Kang, Gurbhinder Singh and Vikas Chawla, " Some Problems Associated with Thermal Sprayed Ha Coatings: A Review," International Journal of Surface Engineering & Materials Technology, Vol.3, No.1, Jaunir-Jeune 2013.
- [12] J.P.PEYRE, C.TOURNIER, choix des traitements thermiques Superficiels, éd. CETIM (1985).
- [13] A. Prôner. Revêtement par projection, (1999).
- [14] M. Ducos. Revêtement par projection, (1999).

[15] E.FELDER, C.ANGELILIS, M.DUCCAROIR, M. IGNAT, P. MAZOT, propriétés mécaniques des films minces: problématiques Et moyen de mesure, Annale de chimie sciences des matériaux, vol.23, sep (1998).

[16] B. Etcheverry, Thèse de doctorat, Polytech.Toulouse, France (2006).

[17] Carobert, A. Vardelle, preceding of 15 the international thermal Spray conférence, p.729-740, mai (1998).

[18] Vignes S, Shanhua K et al. 2017 Identifier les paramètres de pulvérisation HVOF optimaux à atteindre porosité minimale et dureté maximale dans les revêtements métalliques amorphes à base de fer Technologie de la défense 13pp 101-110

[19] Valiserions Katranidis, Sai Gue et al. 2017 Etude expérimentale de pulvérisation d'oxy combustible à haute vitesse Revêtements WC-17Co appliqués sur des géométries complexes Partie A: Influence de la projection cinématique paramètres sur l'épaisseur, la porosité, les contraintes résiduelles et la micro dureté Surface et revêtements Technologie 311pp 206–215

[20] Lyphout C, Per Nylon et. Al. 2012 Force d'adhérence des revêtements IN718 pulvérisés au HVOF Journal de la technologie de pulvérisation thermique 21pp 86–95

[21] Tong Yul Cho, Jae Hong Yoon et. Al. 2009 Propriétés de surface et résistance à la traction de Revêtements de pulvérisation thermique HVOF de poudre WC-Co sur la surface de l'acier 420J2 et couches de liaison de Ni, Ni Cr et Ni / Ni Cr, technologie des surfaces et des revêtements 203pp 3250-3253

[22] Gurmail Singh, Niraj Bala et Vikas Chawla 2017 Comportement d'oxydation à haute température Revêtement Ni Cr Al Y projeté thermiquement HVOF sur l'acier du tube de chaudière T-91 Matériaux aujourd'hui: Actes 4pp 5259–5265

[23] Mohammad M, Java dpour S et. Al. 2013 Propriétés et microstructure des chocs thermiques étude des revêtements LVPS et HVOF-Co Ni Cr Al Y Si sur le super alliage IN738LC Aspirateur 88pp 124-129

- [24] Sundararajan G, Joshi SV et Rama Krishna L 2016 Surfaces d'ingénierie pour moteur automobile et composants du groupe motopulseur Opinion actuelle en génie chimique 11pp 1–6
- [25] Federici M, Menapace C et. Al. 2016 Effet de la rugosité sur le comportement à l'usure du HVOF revêtements glissant à sec contre un matériau de friction Usure 368-369pp 326–334
- [26] Thiema P G, Chorny A et. Al. 2017 Comparaison de la microstructure et de la force d'adhérence de revêtements projetés au plasma, à la flamme et oxy-combustible à haute vitesse à partir d'une poudre d'aluminure de fer Technologie des surfaces et des revêtements 324pp 498–508
- [27] Mudgal D, Ahuja L et. Al. 2017 Comportement à la corrosion des superalliages revêtus de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni Cr véritable incinérateur de déchets médicaux Technologie des surfaces et des revêtements 325pp 145–156
- [28] Prasanna N D, Siddaraju C et. Al. 2018 Études sur le rôle des revêtements HVOF dans la lutte contre l'érosion dans les alliages pour turbines Materials Today: Proceedings 5pp 3130–3136
- [29] Pukasiewicz A G M, De Boer H E et. Al. 2017 L'influence des paramètres de pulvérisation de HVOF sur la microstructure, les contraintes résiduelles et la résistance à la cavitation des évitements Fe Mn Cr Si Surface et technologie des revêtements 327pp 158–166
- [30] Ciubotariu C R, Secosan E et. Al. 2016 Etude expérimentale sur la cavitation et résistance à la corrosion du Stellite 6 et des revêtements refondus auto-fondants Strojnikivestnik - Journal of Mechanical Engineering 62pp 154-162
- [31] Bonny K, De Baets P et. Al. 2010 Finition de surface: impact sur les caractéristiques tribologiques des WC – Co métaux durs, Tribologie International 43pp 40–54

[32] Pengbo Mi, Chongjin Zhao et. Al. 2018 Comportement à l'usure par glissement du revêtement WC (nano WC-Co) pulvérisé HVOF à des températures élevées Chimie et physique des matériaux 206pp 1-6

[33] Yang Q, Senda T et Hirose A 2006 Comportement à l'usure par glissement des revêtements WC – 12% Co à températures élevées Technologie des surfaces et des revêtements 200pp 4208– 4212

[34] Hwan-Cheol Kim, In-Jin Shon ET. Al. 2007 Consolidation du WC ultrafin et du WC – Co dur matériaux par frittage activé par courant pulsé et ses propriétés mécaniques International Journal des métaux réfractaires et des matériaux durs 25pp 46–52

## Résumé :

Toutes les parties d'une machine en cours de fonctionnement sont soumises à de fortes contraintes, ce qui conduit à la corrosion. Pour augmenter la durée de vie de ces pièces, nous utilisons un revêtement.

Dans cette mémoire, nous donnons un revu des différentes méthodes de revêtement.

**Mots clés:** revêtement, microstructure, microdureté.

## المخلص:

جميع القطع لماكنة ما تكون أثناء العمل معرضة لإجهادات كبيرة، مما يؤدي في النهاية إلى تآكلها. لزيادة مدة حياة هذه القطع نقوم بالتلبيس.

في هذه الرسالة نعطي نظرة عامة على طرق التلبيس.

**كلمات مفتاحية:** تلبيس، البنية المجهرية، الصلادة.

## Abstract :

All parts of a machine during operation are subjected to high stress, which leads to corrosion. To increase the life of these parts, we use a coating.

In this memory, we give a review of the different coating methods.

**Keywords :** coating, microstructure, microhardness.