

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE de TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT de GENIE MECANIQUE
N°...



DOMAINE : TECHNOLOGIE
FILIERE : GENIE MECANIQUE
OPTION : FABRICATION &
PRODUCTIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: Arioua Mostafa

Chikh Kamel

Intitulé

**Contribution à l'étude des Revêtements Ni - Al,
Mo d'une aube de ventilateur de tirage en acier**

E37

Soutenu devant le jury composé de :

Y. Rouabhi	Enseignant Université de M'sila	Président
Menasri Nouredine	Enseignant Université de M'sila	Encadreur
A. Sebhi	Enseignant Université de M'sila	Examineur
M. Arselane	Enseignant Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2017 / 2018.

REMERCIEMENTS

Tout 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'sila 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 près 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 ma femme

A tous mes proches amis sans exceptionnel A tous ceux qui me connaissent et qui

ne me Connaissent pas de près et de loin

Kamel

Dédicace

L'être que m'est le plus cher au monde, À 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

À mes très chers frères et ma chère sœur

À ma femme

À tous mes proches amis sans exceptionnel À tous ceux

qui me connaissent et qui ne me Connaissent pas de près et

de loin

Mostafa

La liste des figures

Chapitre I

Figure - I.1 : Etapes de fabrication du ciment.....	12
Figure - I.2 : Extraction et transport de la matière première.....	12
Figure -I.3 : Concassage.....	13
Figure -I.4 : Alimentation des doseurs.....	14
Figure -I.5 : Broyeur cru.....	14
Figure -I.6 : Silos d'homogénéisation.....	15
Figure -I.7 : Les étapes de cuisson du clinker.....	16
Figure -I.8 : Circuit de cuisson.....	17
Figure - I.9 : Four rotatif.....	18
Figure -I.10 : Refroidisseur.....	18
Figure -I.2 :Broyage.....	19
Figure -I.11 : Ensachage et expédition du ciment.....	19
Figure -I.12 : Processus de fabrication du ciment.....	20

Chapitre II

Figure- II.1 : Facteur d'influence de la projection thermique.....	23
Figure- II.2 : Les différents procédés de revêtement des surfaces.....	24
Figure- II.3 : Principe de la projection thermique.....	26
Figure- II.4 : Les différentes sources d'énergie en projection thermique.....	26
Figure- II.5 : Chalumeau classique à fil (à gauche) et à poudre (à droite).....	27
Figure- II.6 : Schéma de principe du procédé HVOF.....	29
Figure- II.7 :Schéma de principe d'un pistolet à arc électrique.....	29
Figure- II.8 :Schéma de principe d'un pistolet plasma.....	30
Figure- II.9 :Température d'utilisation et vitesse des particules des procédés de projection thermique.....	32
Figure- II.10 :Buse de projection thermique a- à poudre. b- à fil.....	35

Figure- II.11 :Schéma de principe de la projection thermique à la flamme (poudre ou fil).....	36
Figure- II.13 :Pistolet à poudre.....	38
Figure- II.14 :Poste de métallisation à la flamme en fil (MEI).....	41

Chapitre III

Figure - III.1 : pistolet de projection flamme-fil.....	45
Figure - III.2 : les substrats avant le sablage.....	47
Figure - III.3 : les substrats durant le sablage.....	47
Figure - III.4 :Les substrats après le sablage.....	47
Figure - III.5 :L'échantillon subi un polissage.....	47
Figure - III.6 : Les étapes pratiques du procédé de projection flamme-fil.....	48
Figure - III.6 : Echantillon de prélèvement de la micro-dureté des éléments enrobé.....	51
Figure - III.8 : Micro-dureté	52
Figure - III.9 : Microscope optique en transmission et réflexion OLYMPUS.....	53
Figure - III.10 a) : Microscopie Electronique à Balayage.....	54
Figure- III.10b) : Microscope de type Jeol /JSM-6390Principe du MEB.....	54
Figure - III.11 : Microstructure de l'échantillon revêtu par le Ni – Al a grossissement ×200.....	55
Figure -III.12 : Microstructure de l'échantillon revêtu par le Ni – Al a grossissement×50.....	56
Figure - III.13 : Microstructure de l'échantillon revêtu par le Mo.....	56
Figure - III.14 : Microstructure de l'échantillon revêtu par le Mo grossissement ×50.....	57
Figure - III.15 : Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène a grossissement de 500µm.....	58
Figure -III.16 : Micrographie MEB de l'échantillonrevêtu en molybdène a grossissement de 30 µm.....	59
Figure - III.17 : Micrographie MEB de l'échantillonrevêtu en molybdène.(Dépôt de molybdène.).....	59
Figure - III.18 : Microstructure du cœur de l'acier E37.....	60

Figure -III.19: Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en Ni – Al a grossissement de 1mm.....	60
Figure - III.20: Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en Ni -AL.(Dépôt deNi-AL.).....	61
Figure - III.21: Microstructure du cœur de l'acier E37.....	62
Figure - III.22: Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu (Mo 1mm) et évolution de la micro-dureté du substrat.....	62
Figure -III.23: Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu (Ni –Al 3mm) et évolution de la micro-dureté du substrat.....	63
Figure - III.24: Profil de dureté des deux échantillons.....	63

La liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II-1 : Quelques caractéristiques des revêtements / source employée.....	33
Tableau II-2 : Autres caractéristiques des revêtements / source employée.....	34

Chapitre III

Tableau III- 1 : composition chimique De l'E37.....	44
Tableau III - 1 : Paramètres de projection flamme-fil.....	50
Tableau III - 2 : La Pression d'allumage de revêtement flamme-fil.....	50
Tableau III - 3: Le Débit de projection de revêtement flamme-fil (Ni-Al, Mo).....	50
Tableau III - 4 : La composition de fil Ni-Al.....	50
Tableau III - 5 : La composition de fil Mo.....	50
Tableau III - 6 : Evolution de la micro-dureté des échantillons revêtus (Ni-Al 3 mm) et Evolution de la micro-dureté du substrat.....	52
Tableau III - 7 : Evolution de la micro-dureté des échantillons revêtus (Mo 1 mm) et Evolution de la micro- dureté du substrat.....	52
Tableau III - 8: Micro dureté des deux échantillons dans différentes zones.....	63

Liste des abréviations et symboles

- PA = assisté par plasma (Plasma Assisted)
- CVD = dépôt chimique en phase vapeur (Chemical Vapour Deposition)
- PVD = dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapour Deposition)
- IBAD = dépôt assisté ioniquement (Ion Beam Assisted Deposition)
- II = implantation ionique (Ion Implantation)
- APS = La projection plasma atmosphérique
- LPPS = La projection plasma à pression réduite
- Débit : Débit massique de matière pouvant être employé avec la source considérée,
- 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,
- Rend. : Rendement intrinsèque de projection (fortement dépendant du type de matériau).
- FF : Projection à la flamme (fil),
- FP : Projection à la flamme (Poudre),
- HVOF : Projection à la flamme supersonique,
- Arc. : Projection à l'arc électrique,
- Plasma : Projection à la torche à plasma d'arc soufflé.
- E37 : acier ordinaire 37
- Ni –Al : alliage de Nickel-aluminium
- MEI : Maintenance des Equipements Industriels de M'sila
- MEB : microscopie électronique à balayage

Table des matières

Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste d'abréviation et symboles	
Introduction générale.....	10

Chapitre I : Processus de fabrication du ciment

I.1. Introduction:.....	11
I.2. Historique :.....	11
I.3. Définition du ciment :.....	11
I.4. Processus de fabrication du ciment :	11
I. 4.1. Carrière :	12
I.4.2. Concassage :.....	13
I.4.3. Préparation du cru :.....	13
I.4.4. Broyage cru :.....	14
I.4.5. L'homogénéisation :.....	15
I.4.6. Ligne de cuisson :.....	15
I.4.7. Tour à cyclones :.....	16
I.4.8. Four rotatif :.....	17
I.4.9. Refroidisseur :.....	18
I.4.10. Broyage ciment :.....	18
I.4.11. Ensachage et expédition :.....	19
I.5. Conclusion :.....	20

Chapitre II : Les procédés de revêtement par projection thermique

II.1. Introduction.....	22
II.2. Les procédés de projection thermique.....	24
II.2.1. Généralités.....	25
II.2.2. Principe de base et formation du dépôt.....	25

II.2. 3.Les procédés par combustion	27
II.2.3.1.La projection à la flamme.....	27
II.2.3.2.La projection par combustion discontinue (détonation) ou continue (HVOF).....	28
II.2.3.Les procédés par décharge électrique.....	29
II.2.3.1.La projection à l'arc électrique.....	29
II.2.3.2.La projection plasma	29
II.2.3.2.1. Pistolets plasma.....	30
II-2.3.2.1.La projection plasma atmosphérique (APS).....	31
II-2.3.2.2.La projection plasma à pression réduite (LPPS).....	32
II-3.Comparaison des différents procédés de projection thermique	32
II- 4.Les procédés de revêtement utilisés	34
II.4.1.La métallisation par flamme	34
II.4.1.1.Définition.....	34
II- 4.1.2.Principe de la Métallisation.....	35
II- 4.1.3.Métallisation (projection à la flamme fil ou poudre).....	35
II- 4.1.4.La mécanique d'accrochage.....	35
II- 4.1.4.Métallisation à la flamme par pistolet à poudre.....	37
II- 4.1.4.1.Principe.....	37
II- 4.1.4.2.Fonctionnement.....	38
II- 4.1.4.3.Les applications	39
II- 4.1.4.4.Les dépôts.....	39
II- 4.1.4.5.Les utilisations	40
II- 4.1.5.Métallisation à la flamme par pistolet à fil	40
II- 4.1.5.1.Principe.....	40
II- 4.1.5.2.Fonctionnement.....	40
II- 4.1.5.3.Les applications.....	41
II- 4.1.5.4.Les dépôts	41
II- 4.1.5.5.Les utilisations	42
II- 5.Conclusion.....	42
Chapitre III :Etude et caractérisations des revêtements du ventilateur FN280	
III-1.Introduction.....	44
III.1.Matériau étudié.....	44
III.2.Métallisation par projection thermique.....	44

III.2.1. Système de déposition :.....	44
III.3. Préparation des surfaces avant métallisation.....	45
III.3.1. La préparation des surfaces	45
III.3.1.1. La propreté	45
III.3.1.2. La rugosité	46
III.3.1.3. Le préchauffage	46
III.4. Les modes de préparation	46
III.4.1. Le sablage	46
III.5. Préparation des échantillons.....	47
III.6. Mode opératoire :.....	48
III.7. Paramètres de projection influant sur le dépôt	49
III.8. Méthode expérimentales.....	51
III 8.1. La micro-dureté.....	51
III.8.2. Microscopie Optique	53
III.8.3. Microscopie Electronique à Balayage (MEB).....	53
III.9. Résultats et interprétations	54
III.9.1. Observation métallographique	54
III.9.1.1. Examen au microscope optique.....	54
III.9.1.2. Examen au microscope électronique (MEB) :.....	57
III.9.2. Caractérisation par la Micro dureté Vickers.....	61
III.10. Conclusion :.....	63
 Conclusion générale	 66

:

Introduction générale :

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

Dans notre étude nous avons des ventilateurs qui peuvent être soumis à un grand nombre d'avaries (usure, fatigue de contact...etc.) qui apparaissent lors du fonctionnement et dont les causes sont multiples.

Pour cela, nous suggérons dans cette étude un moyen de protéger ces ventilateurs contre ces avaries, ce qui leur donnera une longue durée de vie.

Ainsi l'objectif de ce mémoire est d'étudier :

La qualité de revêtement (métallisation) utilisée pour deux échantillons:

1er échantillon : revêtu uniquement par le molybdène.

2eme échantillon : revêtu par Nickel-aluminium.

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.

L'étude s'appuie sur des essais de métallisation réalisés sur deux paliers, afin d'avoir une estimation sécuritaire de la résistance à l'usure et la corrosion.

Le premier chapitre est consacré à la Processus de fabrication du ciment.

Dans un deuxième chapitre, nous avons décrit le procédé de revêtement par projection thermique utilisées dans le domaine industriel. Nous verrons les principes et les mécanismes de revêtement par flamme, et les techniques employées par la MEI (M'sila).

Dans un troisième chapitre, nous avons présenté toutes le paramètre et les caractérisations utilisées pour suivre les changements microstructurales et caractériser ainsi nos échantillons.

Et pour finir nous verrons les principales caractérisations, leurs interprétations et les conclusions à tirer de cette étude.

Chapitre I :

processus de fabrication du ciment

I.1. Introduction:

L'industrie des matériaux de construction, dont le ciment constitue la matière de base, détient une place importante dans le secteur des industries de transformation en Algérie, dont les remarquables propriétés hydrauliques (faculté de durcir en présence d'eau), si sa production pouvait être maîtrisée, des développements considérables pour les bâtisseurs.

Le ciment est produit en portant à une température de 1450 °C un mélange de calcaire et d'argile. On obtient alors des nodules durs appelés clinker. Le clinker additionné de gypse est broyé très finement pour obtenir le ciment "Portland". L'ajout au clinker, lors de son broyage, d'autres éléments minéraux (laitiers de hauts fourneaux, cendres de centrales thermiques, fillers calcaires, pouzzolanes naturelles ou artificielles) permet l'obtention des différentes catégories de ciments "à ajouts". Mélangé à des granulats, du sable, des adjuvants et de l'eau, le ciment est l'élément de base indispensable pour la fabrication du béton, dont il est le composant actif. C'est pourquoi il est aujourd'hui l'élément essentiel et incontournable du secteur de la construction contemporaine et donc du monde moderne.

I.2. Historique :

Le ciment est le constituant de base des bétons et des mortiers. Ce liant hydraulique artificiel permet de coller entre eux les grains de sable et les granulats. Les Chinois, les Égyptiens, les Mayas construisaient avec des mortiers à base d'une chaux obtenue par cuisson de roches calcaires, suivie d'une extinction à l'eau.

Aujourd'hui, matériau de construction universellement utilisé, le ciment est soumis à des normes rigoureuses. Les différentes destinations (maçonnerie, ouvrages portuaires, centrales thermiques ou nucléaires) requièrent des types et classes de ciment devant avoir des caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques normalisées [1].

I.3. Définition du ciment :

Le ciment est un liant hydraulique obtenu par cuisson à très haute température d'un mélange de calcaire et d'argile, suivi d'une phase de broyage. La plupart des ciments sont à base de clinker et d'ajouts. Il s'emploie le plus souvent sous forme de poudre : mélangé avec de l'eau, il fait prise et permet d'agglomérer entre eux des sables et des granulats (sable ou graviers), pour constituer de véritables roches artificielles, bétons ou mortiers [1].

I.4. Processus de fabrication du ciment :

Avant d'obtenir du ciment, la matière première passe par diverses étapes de transformation physico-chimiques de l'extraction jusqu'à l'expédition [1].

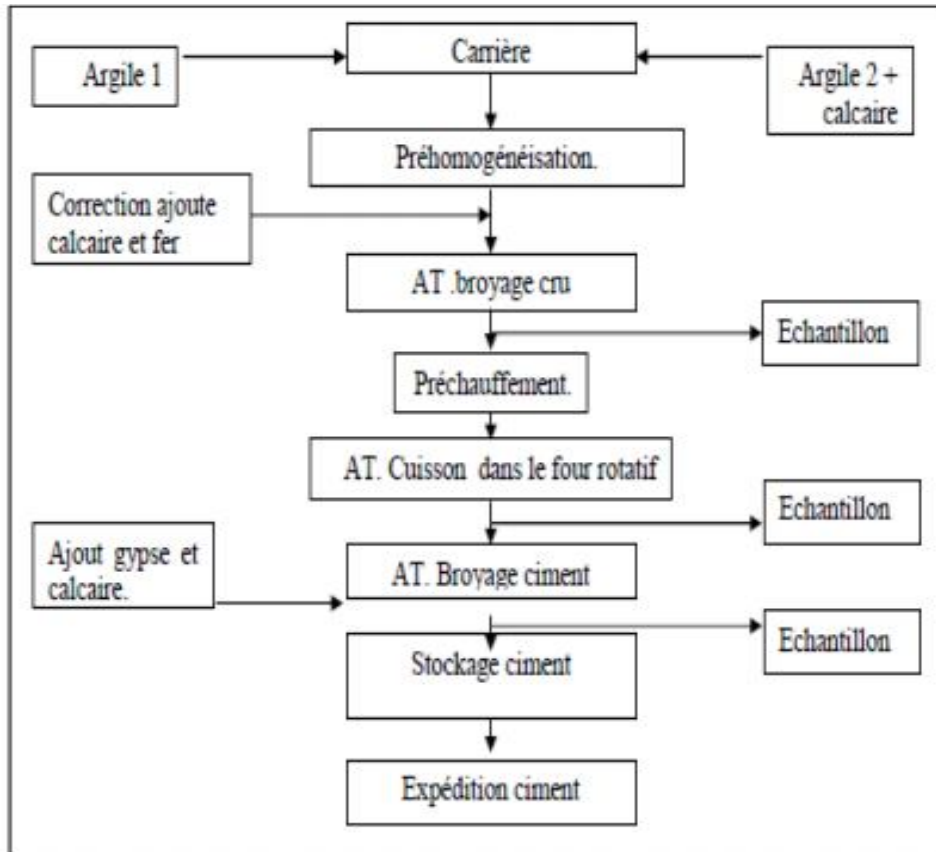


Figure. I.1 : Etapes de fabrication du ciment[1*].

I. 4.1. Carrière :

LAFARGE ciments Meknès exploite une carrière qui fournit deux matières premières : le calcaire et le schiste. L'extraction de ces roches se fait par abattage à l'explosif[1*].

Il consiste à fragmenter le massif exploité à l'aide d'explosifs :



Figure I.2: Extraction et transport de la matière première

I.4.2. Concassage :

C'est une opération qui consiste à réduire la granulométrie de la matière première en fragments de faibles dimensions (25 à 40 mm). Elle assure également un certain mélange des matières premières arrivant de la carrière (calcaire et schiste). En effet, le calcaire et le schiste transportés par les camions sont déchargés dans une trémie qui est reliée à un alimentateur à vitesse variable qui permet de réguler le débit d'alimentation[1*].

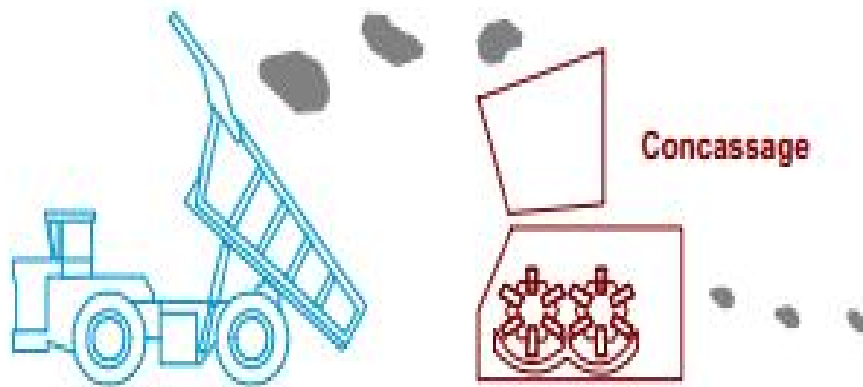


Figure I.3: Concassage

I.4.3. Préparation du cru :

La préparation du cru consiste à réaliser un dosage approprié des 4 constituants de base : chaux, silice, Alumine et Fer.

Mais pour avoir un cru dosé, il faut ajouter des produits auxiliaires :

- Pyélite : Apport de silice et Alumine.
- Ph tanite : Apport de silice.
- Minerai de Fer : Roche riche en Oxyde de fer

Les matières premières constituant le cru doivent être finement broyées et parfaitement homogénéisées de manière à faciliter les réactions au cours de la cuisson[1*].

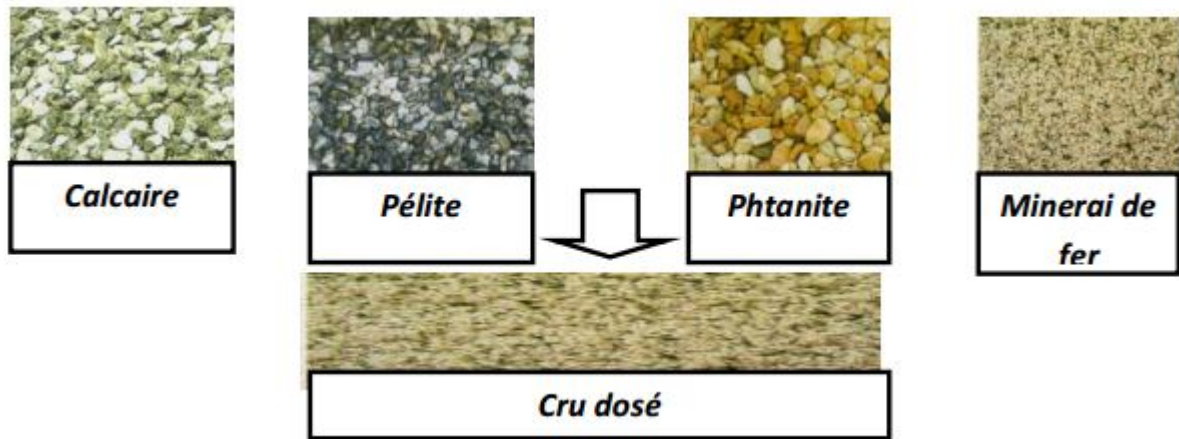


Figure I.4: Alimentation des doseurs

I.4.4. Broyage cru :

Les matières premières doivent être finement broyées pour faciliter les réactions chimiques au cours de la cuisson dans le four.

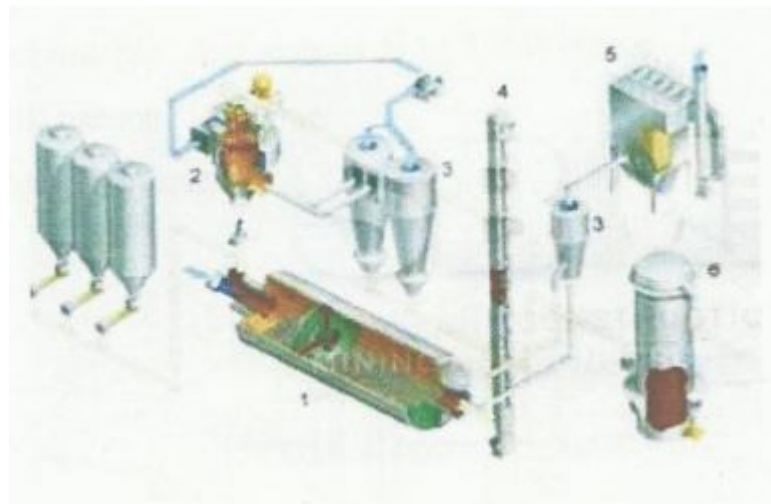


Figure I.5: Broyeur cru

La matière passe donc par les doseurs qui alimentent le broyeur sécheur. La fonction de séchage est nécessaire pour diminuer le taux d'humidité de la matière. En plus du séchage et de la fragmentation, le broyeur assure le mélange des différents minerais apportés par les matières premières et les ajouts de correction en faibles proportions. A la fin du broyage, la matière est dirigée vers un séparateur qui sélectionne les particules selon leur grosseur[1*].

I.4.5. L'homogénéisation :

Après broyage, le cru est expédié, à l'aide de deux élévateurs, vers deux silos d'homogénéisation qui assurent à la fois le stockage et l'homogénéisation de la farine de capacité :

v Silo 1 : 7500 tonnes.

v Silo 2 : 5000 tonnes.

Cette homogénéisation permet d'alimenter les fours avec un cru de composition chimique constante dans le temps[1*].



Figure I.6: Silos d'homogénéisation

I.4.6. Ligne de cuisson :

On entend par cuisson le processus de transformation de la matière crue en clinker par un apport thermique suffisant pour obtenir des réactions chimiques complètes conduisant à l'élimination presque totale de chaux non combinée[1*].

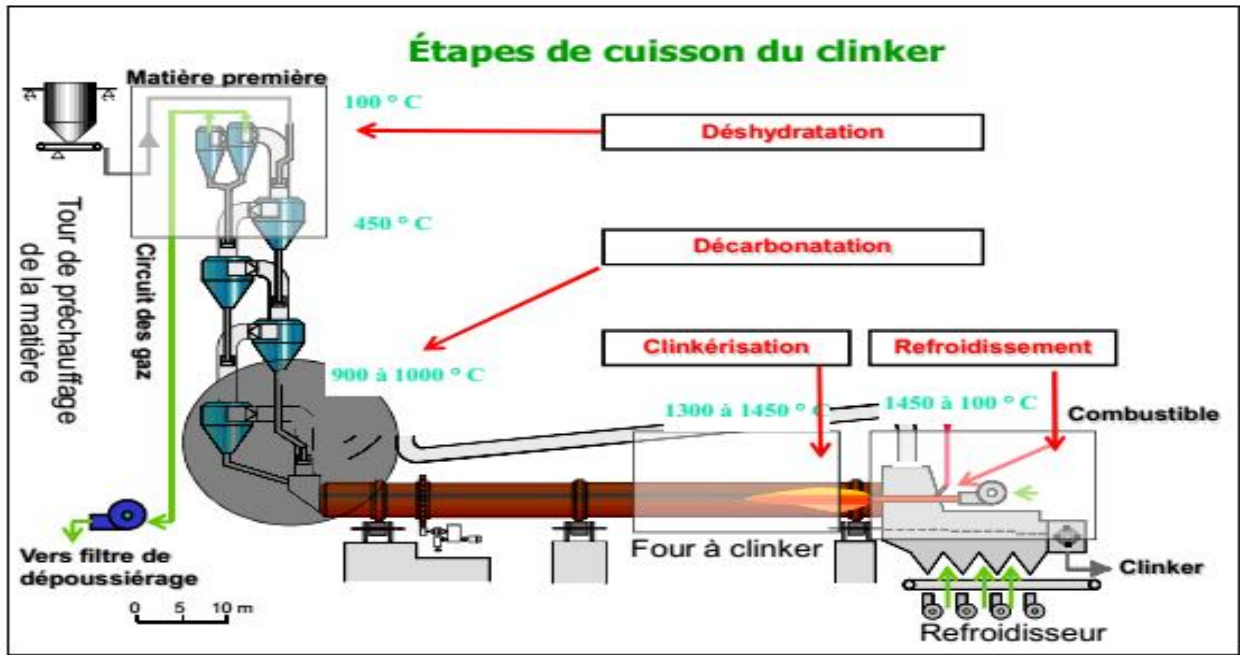


Figure I.7: Les étapes de cuisson du clinker

La ligne de cuisson est constituée de :

- Une tour à cyclones.
- Un four rotatif.
- Un refroidisseur.

I.4.7. Tour à cyclones :

La tour à cyclones est un échangeur de chaleur à voie sèche constituée de cinq étages.

Elle permet d'effectuer un échange thermique à contre courant entre les gaz chauds (850°C) sortant du four et la farine froide (50 à 60°C). Les gaz parcourent l'édifice de bas en haut alors que la matière le parcourt en sens inverse[1*].

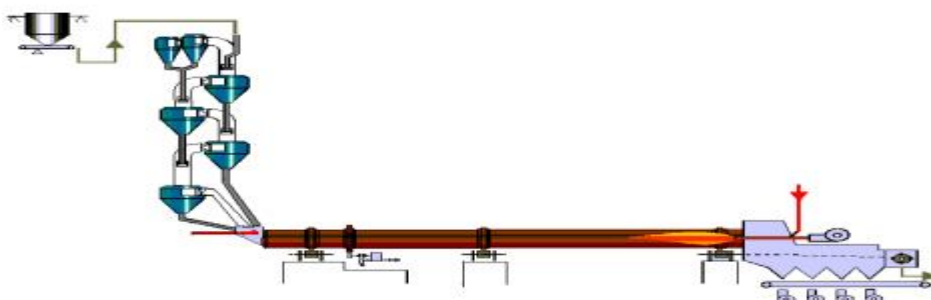


Figure I.8: Circuit de cuisson

I.4.8. Four rotatif :

Le four constitue par une virole cylindrique de 90m de long et de 5.6m de diamètre protégé par de la brique réfractaire), incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale.

Le calcaire est chargé à l'extrémité supérieure, le combustible et l'air comburant étant brûlé à l'extrémité inférieure.

C'est une grande enceinte circulaire rotative dans laquelle on injecte le combustible sous pression pour produire une flamme. C'est un échangeur de chaleur à contrecourant dans lequel la flamme et les gaz récupérés du refroidisseur cèdent leur chaleur à la farine qui arrive en sens inverse. Le four est constitué par une virole en acier et protégée par un revêtement intérieur en matériaux réfractaires.

Ainsi au fur et à mesure de l'avancement de la matière dans le four, elle passe par plusieurs stades de transformation :

Elle subit d'abord un séchage, puis un réchauffage entre 400 et 500°C ; elle entre vers 900 à 1100°C dans une zone de décarbonatation et de calcination pour aboutir vers 1450°C à la clinkérisation (transformation de CS_2 en C_3S en présence d'alumine et d'oxyde de fer qui subit une fusion).

La matière sortant du four est le clinker, elle se présente sous forme de grains gris foncés, arrondis, à surface irrégulière et dont le diamètre peut aller jusqu'à 3 cm [1*].

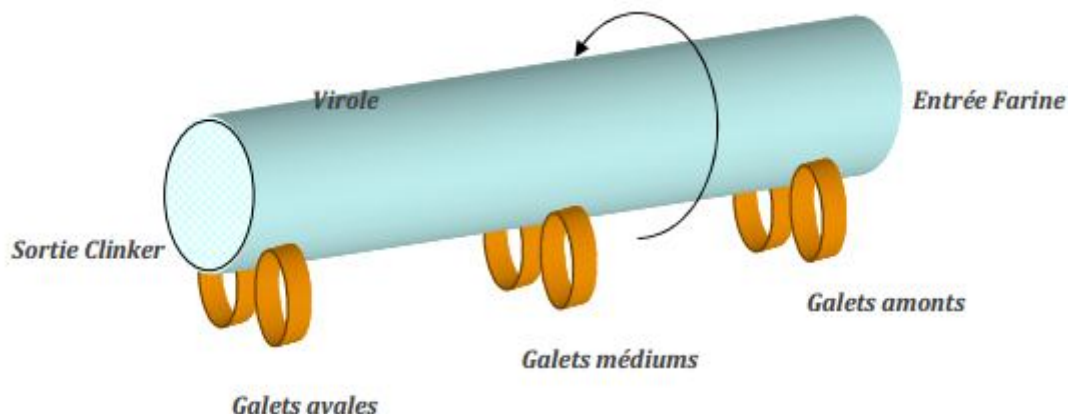


Figure I.9: Four rotatif

I.4.9. Refroidisseur :

Il est situé à l'aval du four, c'est un refroidisseur à grilles horizontales au nombre de deux à commande hydraulique. Le refroidissement est assuré par onze ventilateurs. L'air produit par ces ventilateurs est insufflé sous les grilles par des chambres de soufflage.

Le refroidisseur a un triple rôle :

- Refroidir le clinker qui sort du four
- Récupérer le maximum de chaleur contenu dans le clinker
- Assurer la trempe de clinker par un refroidissement énergétique et rapide[1*].

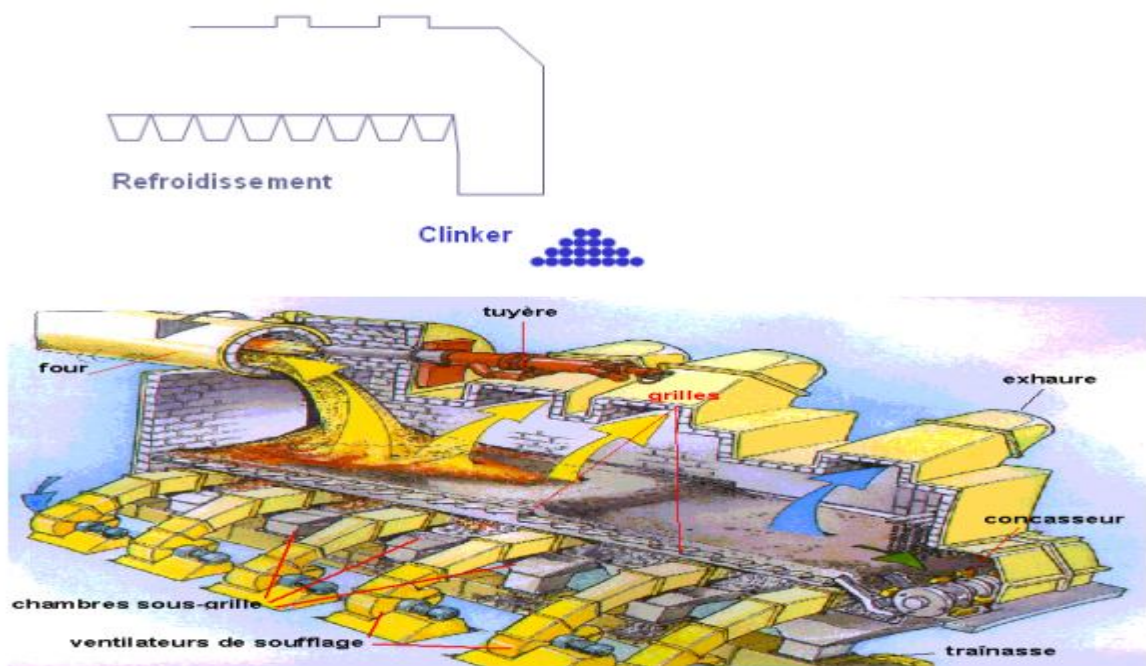


Figure I.10: Refroidisseur

I.4.10. Broyage ciment :

Le clinker et le gypse sont broyés très finement pour obtenir un « ciment pur ». Des constituants secondaires sont également additionnés afin d'obtenir des ciments composés.

Ce processus chimique conduit ainsi à l'obtention d'un produit semi-fini appelé clinker, qui possède des propriétés de liant hydraulique.

Le clinker est stocké dans des halls (ou silos) puis, lors d'une nouvelle étape de broyage, passé dans des broyeurs à boulets (ou à galets) dont la rotation provoque, par chocs et écrasement, la réduction en grains particulièrement fins. Finalement il est transformé en ciment en ajoutant du

Gypse dans une proportion de 3% à 5%. La poudre obtenue de moins de 60 microns, est appelée ciment. (Figure I.8).

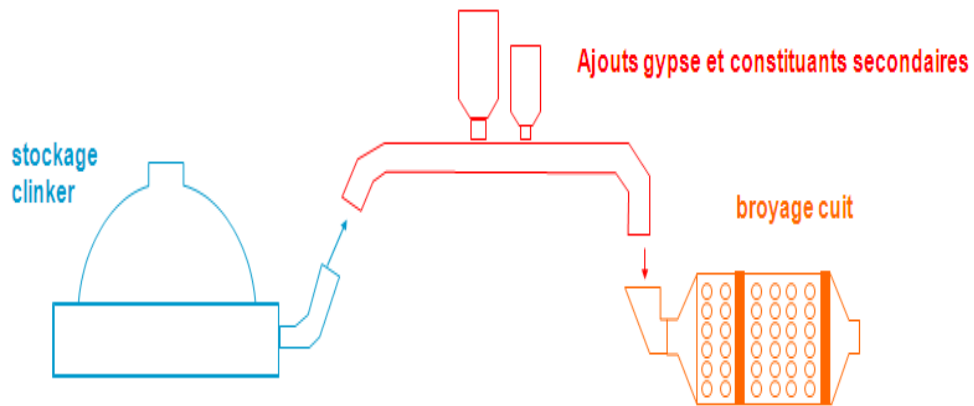


Figure I.2: Broyage[2] .

I.4.11. Ensachage et expédition :

A la sortie du broyeur, le ciment est orienté vers les silos de stockage et de livraison.

La livraison du ciment s'effectue soit en sacs, soit en vrac.

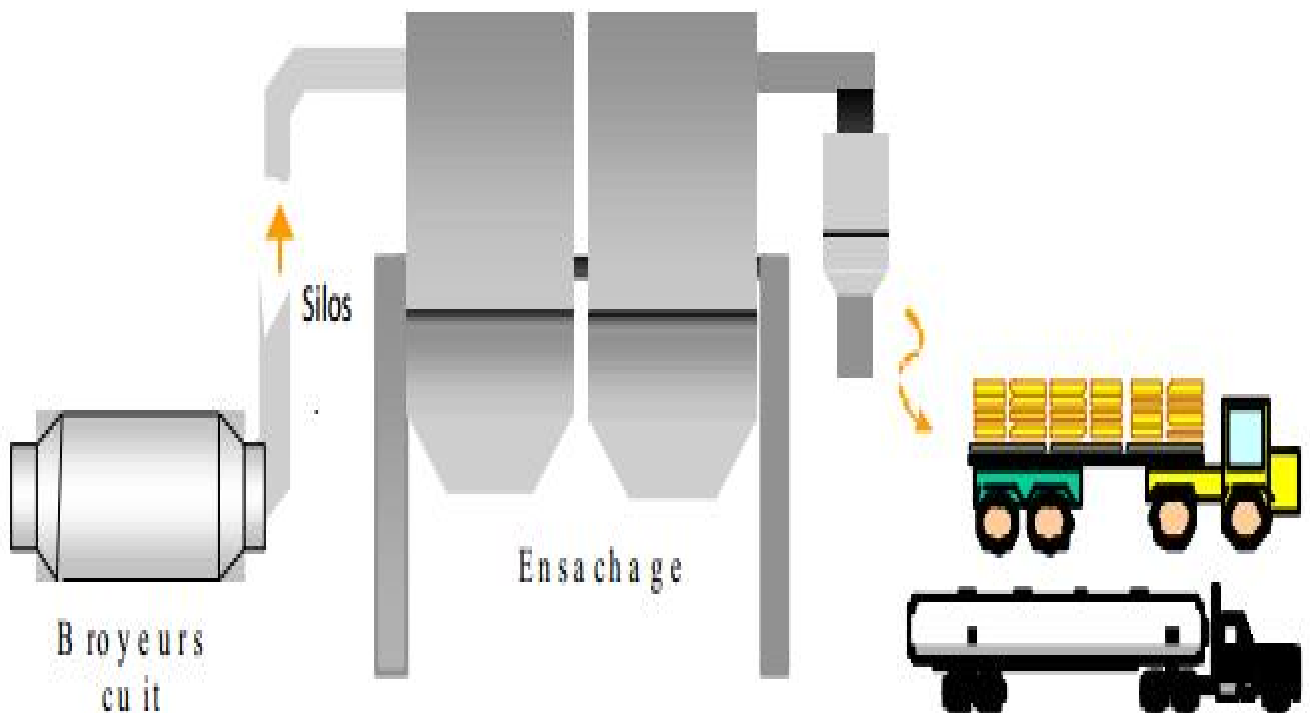


Figure I.11: Ensachage et expédition du ciment[1*].

Les ciments stockés dans des silos sont expédiés en vrac ou en sacs vers leurs lieux de consommation.

Le ciment enfin obtenu est stocké dans des silos de plusieurs milliers de tonnes, parfois divisés en compartiments permettant la conservation de plusieurs qualités de ciment. Il est ensuite livré en vrac ou en sac. Après, il peut être livré en vrac, dans des Citernes ou être emballé en palette de sacs de 25 à 32 kilos. Pour la livraison en vrac, les camion-citerne sont placés sur un pont bascule et remplis à l'aide de manches télescopiques situées à la base des silos. Le remplissage est contrôlé et les données nécessaires à l'établissement des documents d'expédition et de facturation sont transmises à l'ordinateur central (Figure I. 11).

I.5.Conclusion :

L'étude bibliographique démontre que le ciment est un mélange de calcaire et d'argile multiminéral complexe utilisé de manière quasi universelle dans la formulation des bétons. Les nombreuses variétés d'additifs permettent d'obtenir des matériaux aux applications multiples et aux performances exceptionnelles. La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

Le diagramme synoptique ci-dessus montre tout le circuit que la matière d'approvisionnement traverse pour être transformée en produit fini. Des carrières jusqu'à l'ensachage et l'expédition, les moyens matériels mis en jeu sont énormes avec des machines de grandes puissances.

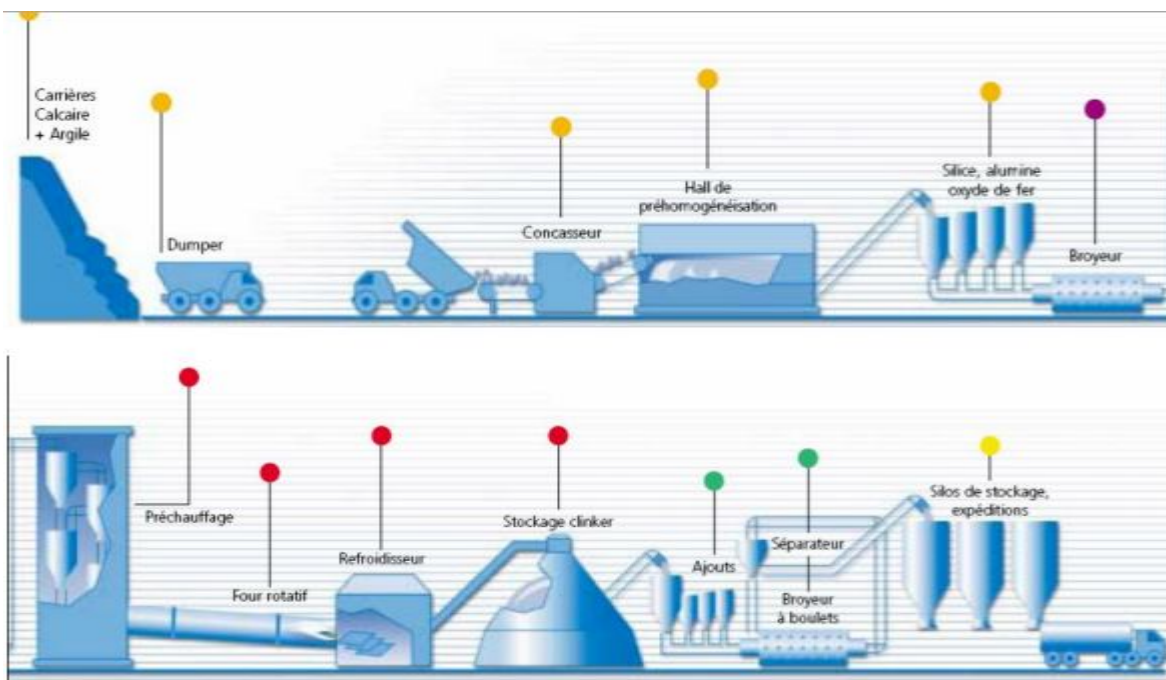


Figure I.12: Processus de fabrication du ciment[1**]

Chapitre II :

Les procédés de revêtement par projection thermique

II.1.Introduction

Dans le domaine des revêtements et traitements de surface, pris au sens large, les notions de surface et d'interface ont un rôle majeur, En fonction de leurs caractéristique, ces deux notions conditionnent les propriétés fonctionnelles d'une pièce en services : résistance à la fissuration, à la corrosion, à la fatigue mécanique au choc thermique, à l'usure et au frottement, dureté, aspect extérieur. La science des surfaces à connu un important essor au cours de ces dernières décennies. Bien que conscient, depuis longtemps, des différences entre les propriétés surfaciques et volumiques, ce n'est que depuis peu de temps qu'elles sont réellement prises en compte de mises à profit. Le développement de nouvelles méthodes de caractérisation, qui sont devenues de plus en plus sensibles et performantes, a permis de faire d'énormes progrès sur la connaissance des surfaces, notamment, en permettant d'établir des relations entre les caractéristiques d'une surface et le propriétés d'emploi (adhésion tribologie, fatigue de contact, corrosion ...).

Apparue, dès le début du siècle dernier, la projection thermique a joué un rôle très important dans l'évolution de la science des surfaces depuis près de 100 ans. Cette technique consiste à projeter en fines particules, sur une surface préalablement préparée, un produit d'apport solide qui est fondu par l'intermédiaire d'un pistolet ou d'un chalumeau adéquat. Elle peut, en réalité, être considérée comme un système très complexe ou de nombreux paramètres interviennent et interagissent.

Jusque dans les années 1920, la projection thermique (appelée successivement shoopage de nom de son inventeur le Docteur Shoop puis métallisation) avait essentiellement des applications pour la protection contre la corrosion et pour la décoration. Son utilisation s'est développée, après la seconde guerre mondiale suite aux pénuries de métaux et de pièces de rechanges. Les industriels de l'époque ont utilisé la projection thermique pour restaurer les côtes initiales de pièces mécanique usées. Au cours des années qui ont suivi, le champ d'application de la projection thermique s'est de plus diversifié, avec entre autres, l'apparition du canon à détonation (fin des années 1950) qui a permis des avancées dans le domaine de l'usure et du frottement et avec celle des premiers systèmes de projection à la troche plasma (dans les années 1960) qui ont été très utilisés dans l'industrie aéronautique.

Le développement actuel de la projection thermique est dû essentiellement aux industries de point (aéronautique et automobile, biomédicale, microélectronique..). Il est, d'ailleurs, de plus difficile de trouver un secteur industriels ou l'on n'a pas recours à l'utilisation de ce procédé. Citons par exemple le cas de l'industrie informatique qui utilisé de plus en plus fréquemment des implants revêtus de titane et/ou d'hydrox apatite, dont l'organigramme illustre une explication exhaustive.

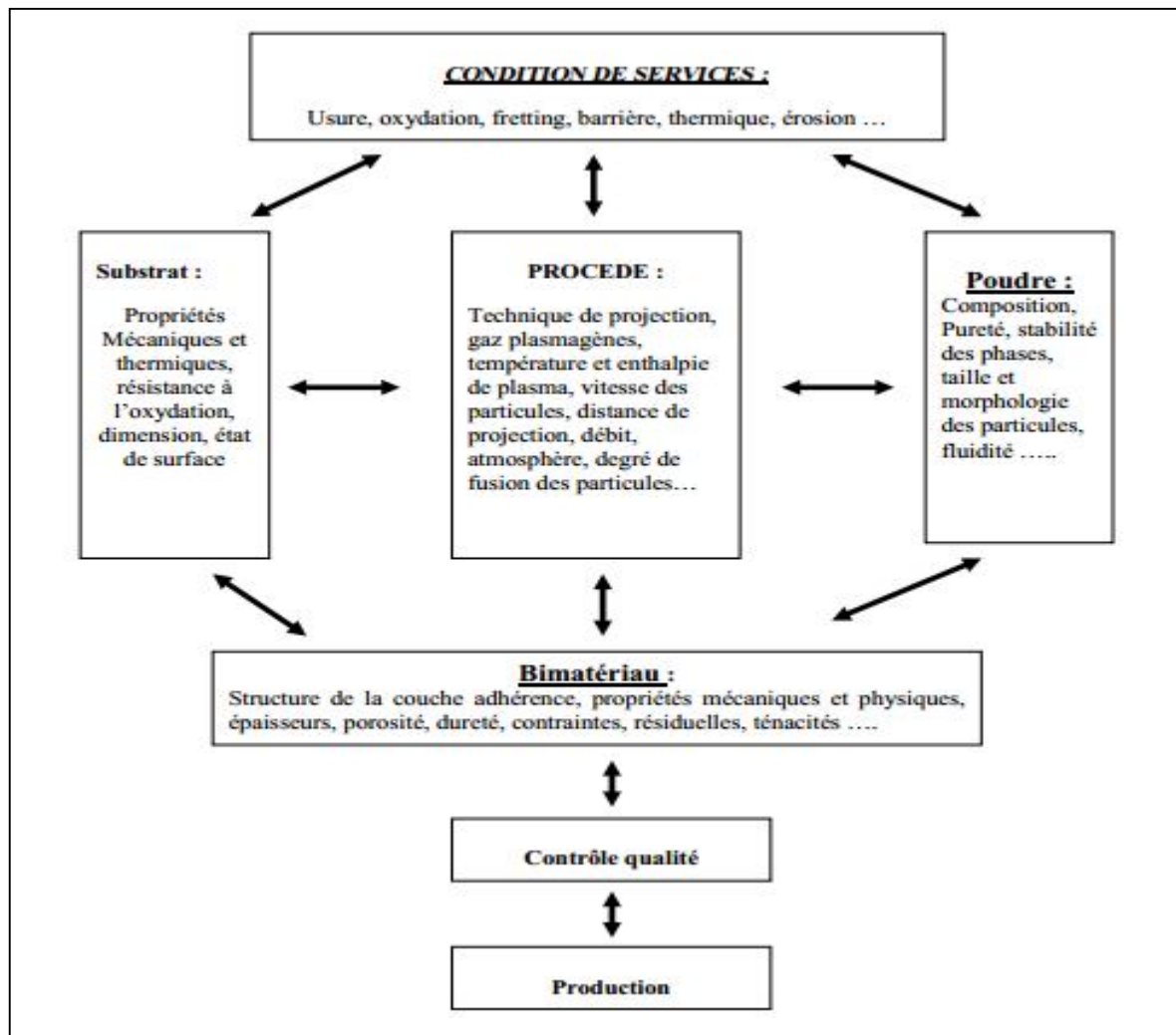


Figure-II.1 :Facteur d'influence de la projection thermique [2].

Le développement rapide des revêtements tribologiques, lors de ces dernières années est essentiellement dû à l'apparition de nouvelles méthodes de dépôt qui permettent d'obtenir des propriétés physiques (morphologie, composition, structure et adhérence) jusque-là impossibles à atteindre. La technique qui est à la base de cet accroissement d'intérêt pour les revêtements, est sans aucun doute la technique de projection à la torche plasma.

Rickerby et Matthews proposent une la classification des différents procédés de dépôt en trois catégories [3]:

- Les procédés de projection thermique (fusion complète ou partielle).
- Les procédés en phase gazeuse
- Les procédés par voie humide

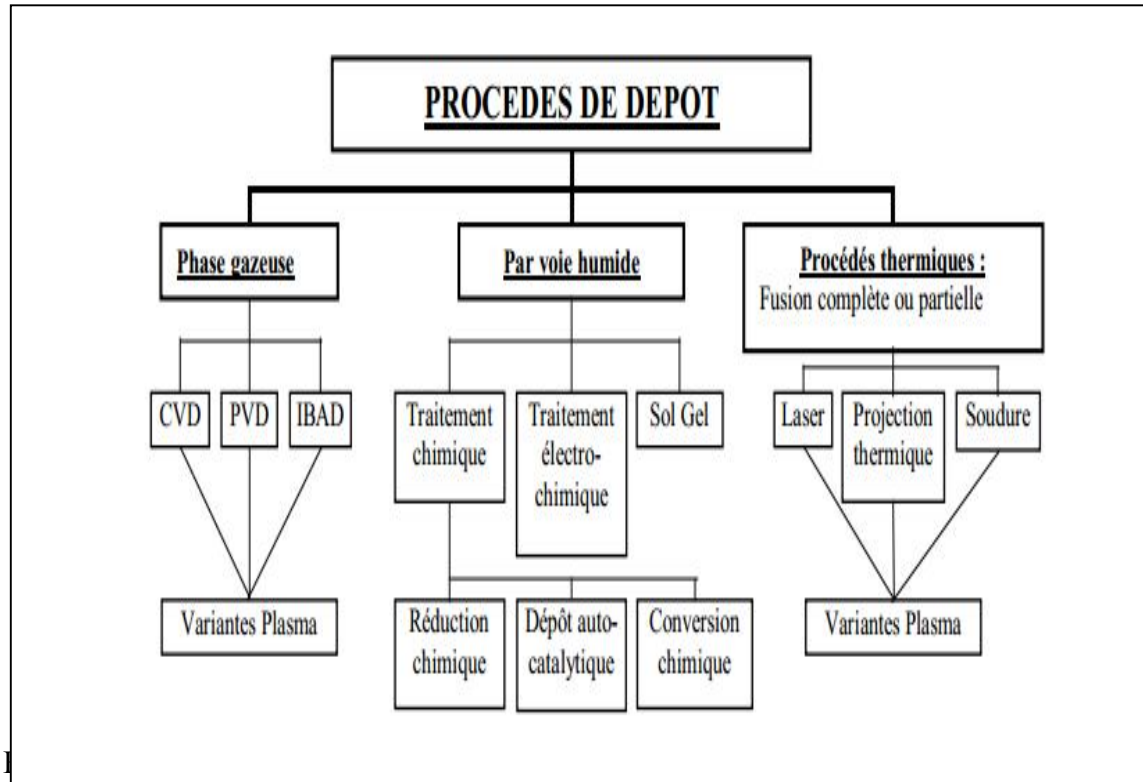


Figure-II.2 : Les différents procédés de revêtement des surfaces[2].

Dans cette figure et dans tout le reste du document, nous allons utiliser les abréviations suivantes :

- PA = assisté par plasma (Plasma Assisted)
- CVD = dépôt chimique en phase vapeur (ChemicalVapourDeposition)
- PVD = dépôt physique en phase vapeur (PhysicalVapourDeposition)
- IBAD = dépôt assisté ioniquement (Ion BeamAssistedDeposition)
- II = implantation ionique (Ion Implantation)

Dans ce chapitre, nous allons décrire d'une manière synthétique les différents procédés de projection thermique (procédés par combustion et par décharges électriques).

II.2. Les procédés de projection thermique[5, 6, 7]

Dans ce paragraphe, nous allons traiter à la fois les procédés par combustion (projection à la flamme et projection par combustion continue ou discontinue) et les procédés par décharge électrique (projection à l'arc et projection plasma). Il est évident que chacun de ces procédés couvre un vaste domaine, cependant le but premier de ce chapitre étant de présenter la majeure partie des procédés de projection thermique, nous allons nous contenter d'en décrire brièvement les principales caractéristiques.

II.2.1. GENERALITES

La projection thermique a été inventée en 1909 par Shoop qui eût l'idée d'utiliser un chalumeau oxyacétylénique pour projeter un métal en fusion [4]. Cette technique se développe à partir de 1914 sous le nom de "shoopage" et consiste essentiellement à projeter du zinc et de l'aluminium pour la protection de l'acier.

De nos jours, la projection thermique se caractérise par l'utilisation d'une source d'énergie (combustion ou décharge électrique) en vue de fondre et d'accélérer un matériau fragmenté (avant ou après fusion).

Depuis l'invention d'origine de Shoop de nombreuses évolutions ont permis une diversification et un large accroissement des potentialités de la technique :

- 1911 : Utilisation de l'arc électrique soufflé (Shoop)
- 1951 : Apparition de la projection thermique à la torche plasma (APS, Plasma dyne)
- 1955 : Apparition du canon à détonation (D-Gun, Union Carbide)
- 1983 : Apparition du chalumeau à flamme supersonique: procédé HVOF (High Velocity Oxy Fuel) (Browning).

La projection thermique est de plus en plus utilisée depuis la découverte de son procédé, car elle offre à un utilisateur de nombreuses possibilités d'anoblissement de surface. Un revêtement projeté thermiquement peut améliorer ou modifier les propriétés anticorrosives, anti-usure et anti-frottement, électromagnétiques, thermiques (barrière thermique), esthétiques... De plus, ce procédé déjà universel permet, entre autre, de déposer une très large gamme de matériaux : métaux, céramiques, cermets, polymères, composites... De plus, il est possible de créer des revêtements soit sous forme d'une couche simple à composition unique, soit sous forme de couches multiples à gradient de composition ou de propriétés fonctionnelles. Ainsi, avec ce procédé, on a la possibilité de mettre en place le bon matériau au bon endroit ce qui confère à un tel dépôt le pouvoir de remplir plusieurs rôles simultanément. Une des rares contraintes de la projection thermique est liée à la géométrie de la pièce à revêtir. En effet, la zone où l'on doit déposer le revêtement doit être suffisamment accessible.

II.2.2. PRINCIPE DE BASE ET FORMATION DU DEPOT

La projection thermique consiste à fondre et à accélérer un matériau afin qu'il puisse s'étaler sous forme de gouttelettes sur un substrat et y former un dépôt par empilements successifs.

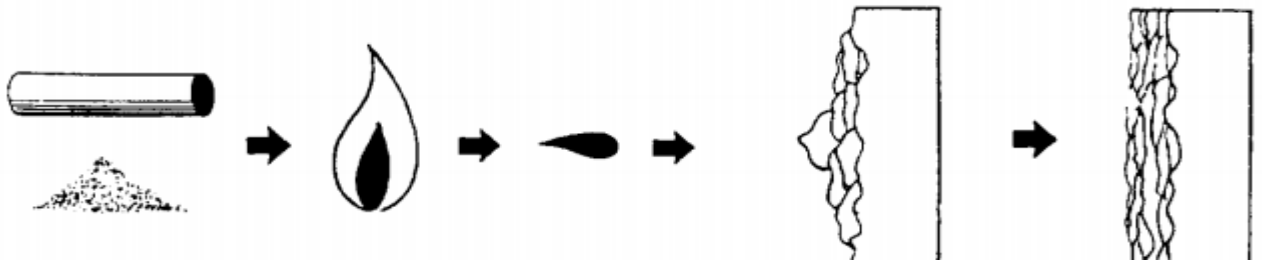


Figure-II.3 :Principe de la projection thermique

La source d'énergie doit donc être suffisamment puissante pour fournir l'énergie nécessaire à la fusion rapide du matériau et délivrer un jet gazeux susceptible de véhiculer les particules. Les différentes sources d'énergie utilisables en projection sont présentées sur la Figure-II.4.

Quant au matériau, il doit posséder un point de fusion à une température suffisamment éloignée de la température de décomposition éventuelle (de 200°C au moins) ou bien pouvoir être introduit dans une matrice fusible. Ce matériau peut se présenter sous forme d'un fil ou bien d'une poudre, laquelle est généralement utilisée en vrac ou sous forme d'un cordon qui s'apparente alors à un fil[8].

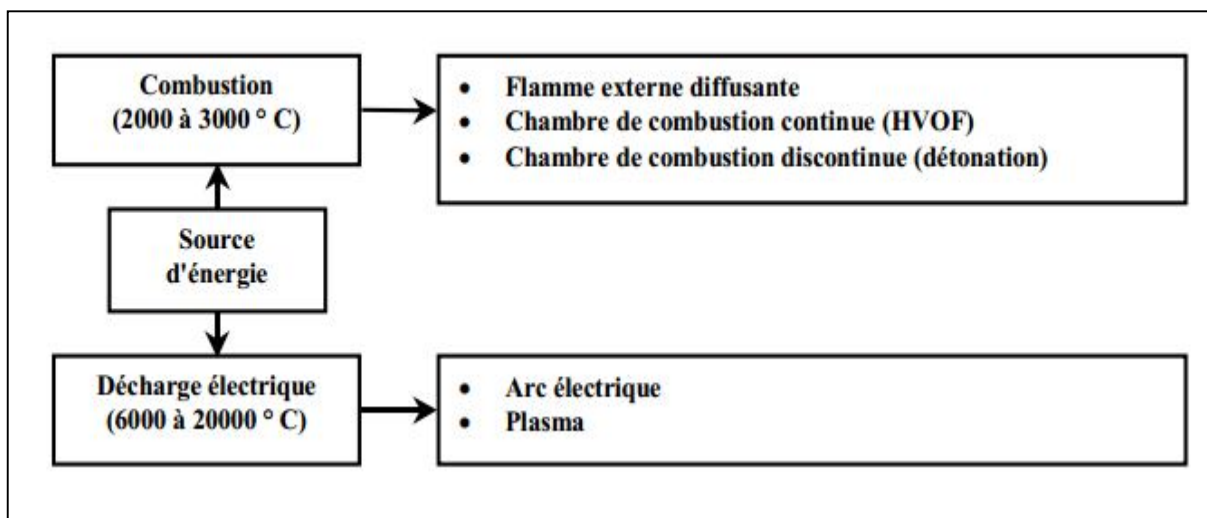


Figure-II.4 : Les différentes sources d'énergie en projection thermique[5]

La formation du revêtement est obtenue par empilement des particules sur le substrat. L'équilibre entre l'énergie cinétique et l'énergie thermique des particules joue à ce niveau un rôle prépondérant. En effet, pour ces deux types d'énergie, l'excès est aussi néfaste que le défaut. Une particule liquide arrivant à grande vitesse sur le substrat se fragmente et donne naissance à des couches poreuses. Une particule solide rebondit sur le substrat et diminue considérablement le rendement de projection et est aussi une des origines de la présence de contraintes résiduelles dans le dépôt. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne répartition entre ces deux énergies de façon à obtenir un bon écrasement des particules.

II.2. 3. 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.

II.2.3.1. 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 Figure- II.5. 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...

Toutefois, on peut améliorer les performances en réalisant la réaction dans un milieu confiné afin d'augmenter la pression d'introduction des gaz.

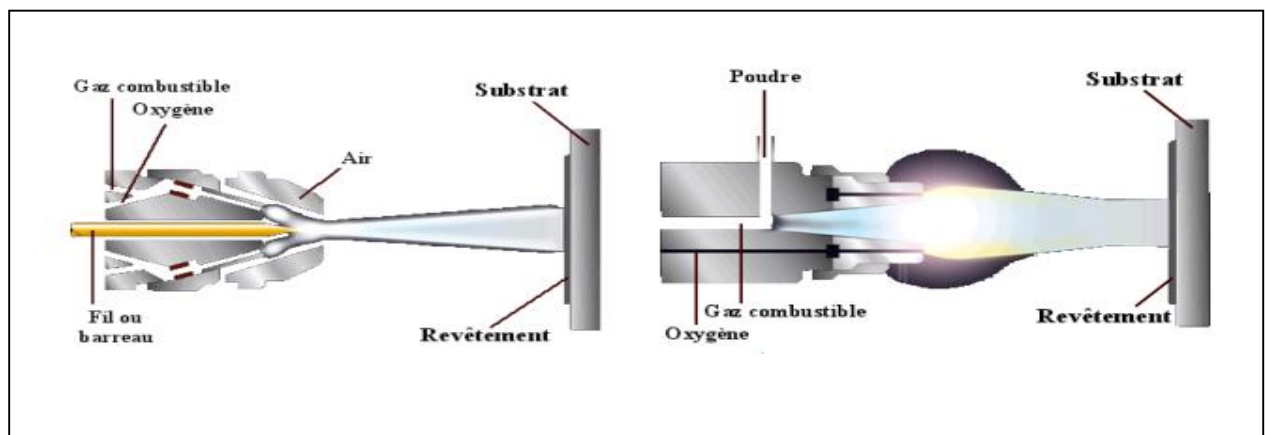


Figure-II.5 :Chalumeau classique à fil (à gauche) et à poudre (à droite)

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].

II.2.3.2. 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. Ensuite, grâce à une étincelle produite par une bougie, on enflamme le mélange ce qui génère une onde de choc ($3000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) qui entraîne la poudre à une vitesse de l'ordre de $900\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 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 Mach 5.

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 Velocity Oxy Fuel).

En fait, les différences qui séparent le D-, le Jet-, le Mach- et le Fare- (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 (cf. figure I-9). 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].

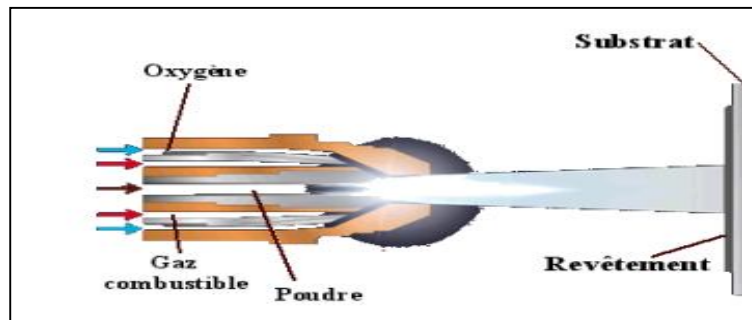


Figure- II.6 :Schéma de Principe du procédé HVOF[9]

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 "flameplating").

II.2.3.LES PROCEDES PAR DECHARGE ELECTRIQUE

II.2.3.1. 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 Shoop (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 I-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.

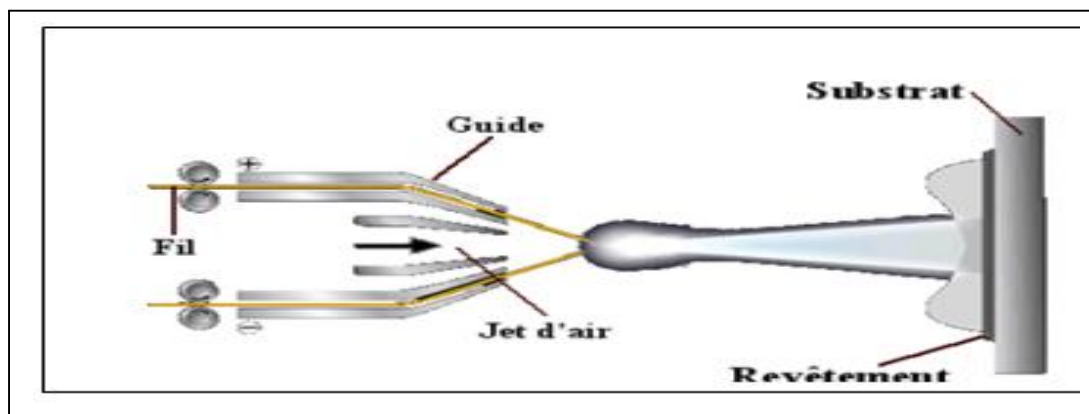


Figure-II.7 :Schéma de principe d'un pistolet à arc électrique

II.2.3.2.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 (Atmospheric Plasma

Spraying). 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 (Low Pressure Plasma Spraying) ou VPS (Vacuum plasma Spraying). 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 projectable, 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.

II.2.3.2.1. 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 (environ6000°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.

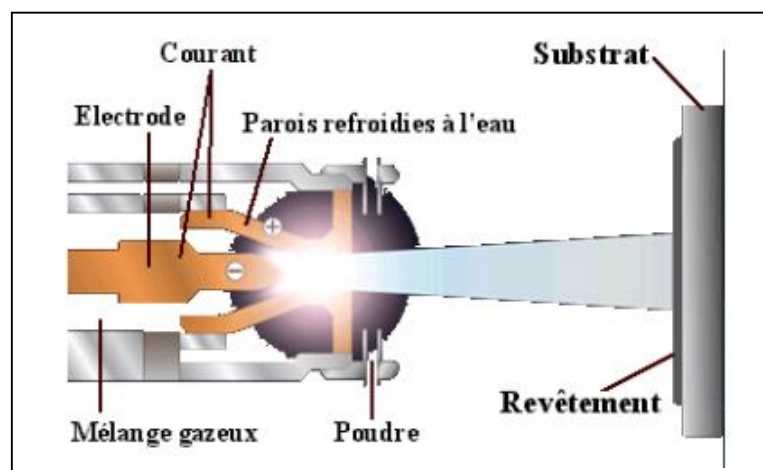


Figure-II.8 :Schéma de principe d'un pistolet plasma[9]

Dans les deux cas de projection précédemment cités, on réalise la projection à l'aide d'un pistolet plasma (cf. figure II.8) 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 6000m. s^{-1}) 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.

II-2.3.2.1. 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'oxydes élevés ($>30\%$), et pour certaines céramiques, des changements de composition importants. A 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 $100\text{ }\mu\text{m}$. On peut parfois faire des dépôts de plusieurs mm[9].

II-2.3.2.2. 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 résiduelle 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 trajectoire, 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 "in situ" 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].

II-3. COMPARAISON DES DIFFERENTS PROCÉDES DE PROJECTION THERMIQUE

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

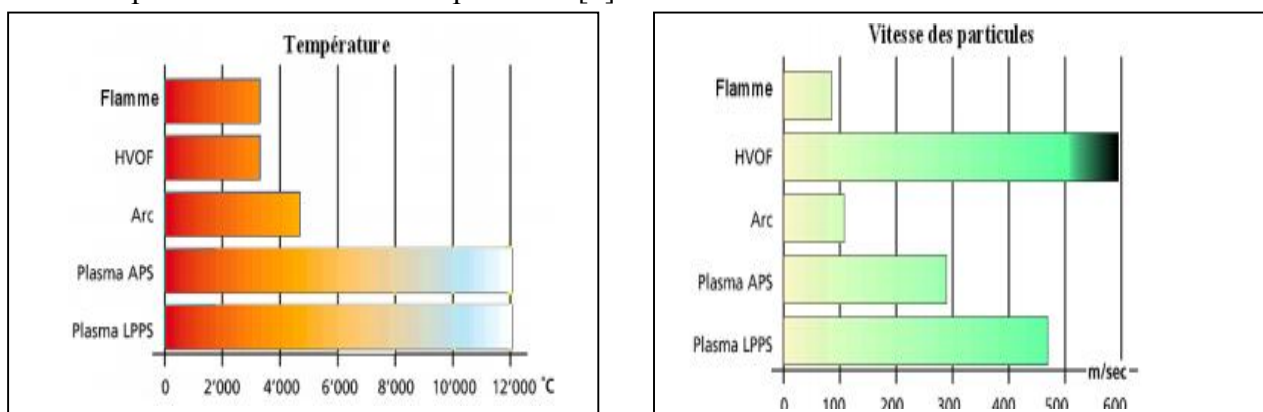


Figure-II.9 : Température d'utilisation et vitesse des particules des procédés de projection thermique.

Les tableaux II-1 et II-2 décrivent quelques-unes des caractéristiques des revêtements en fonction de la méthode de projection utilisée [6].

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

- Débit : Débit massique de matière pouvant être employé avec la source considérée,
- 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,
- Rend. : Rendement intrinsèque de projection (fortement dépendant du type de matériau).

Source	Débit (kg.h-1)	Adh. (1 à 10 arbitraire)	Coh. (1 à 6 arbitraire)	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

Tableau II-1 : Quelques caractéristiques des revêtements / source employée

Dans le tableau II-2 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,
- Plasma : Projection à la torche à plasma d'arc soufflé.

	Matériaux	FF	FP	HVOF	Arc	Plasma
Adhérence (MPa)	Métaux ferreux	14	28	62	41	34
	Métaux non-ferreux	21	21	70	41	34
	Oxydes		14-34			21
	Carbures		34-48	83		55-69
Densité (%) Par rapport au matériau massif	Métaux ferreux	90	90	98	90	95
	Métaux non-ferreux	90	90	98	90	95
	Oxydes		95			95
	Carbures		90	98		95
Epaisseur maximale (mm)	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	1,25 - 5
	Oxydes		0,4			1-2
	Carbures		0,4	0,6		1-2
Epaisseur minimale (mm)		0,05	0,05	0,05	0,07	0,05

Tableau II-2 : Autres caractéristiques des revêtements / source employée

II- 4. 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 (sujet de notre étude).

II- 4.1. La métallisation par flamme :

II- 4.1.1. 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 de 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[10].

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 [11] .

- **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 [11] .

II- 4.1.2.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[11].

II- 4.1.3.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-II.10**).

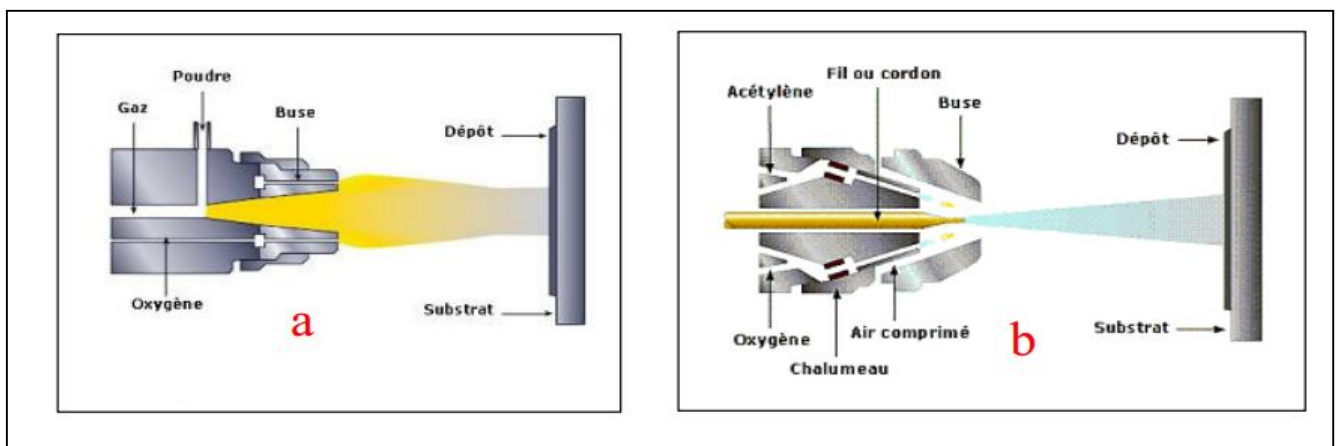


Figure-II.10 : Buse de projection thermique a- à poudre. b- à fil

II- 4.1.4.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 oxygaz, 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- II.10 .b**).

Pour le mode de fusion, les pistolets à flamme oxy- 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.

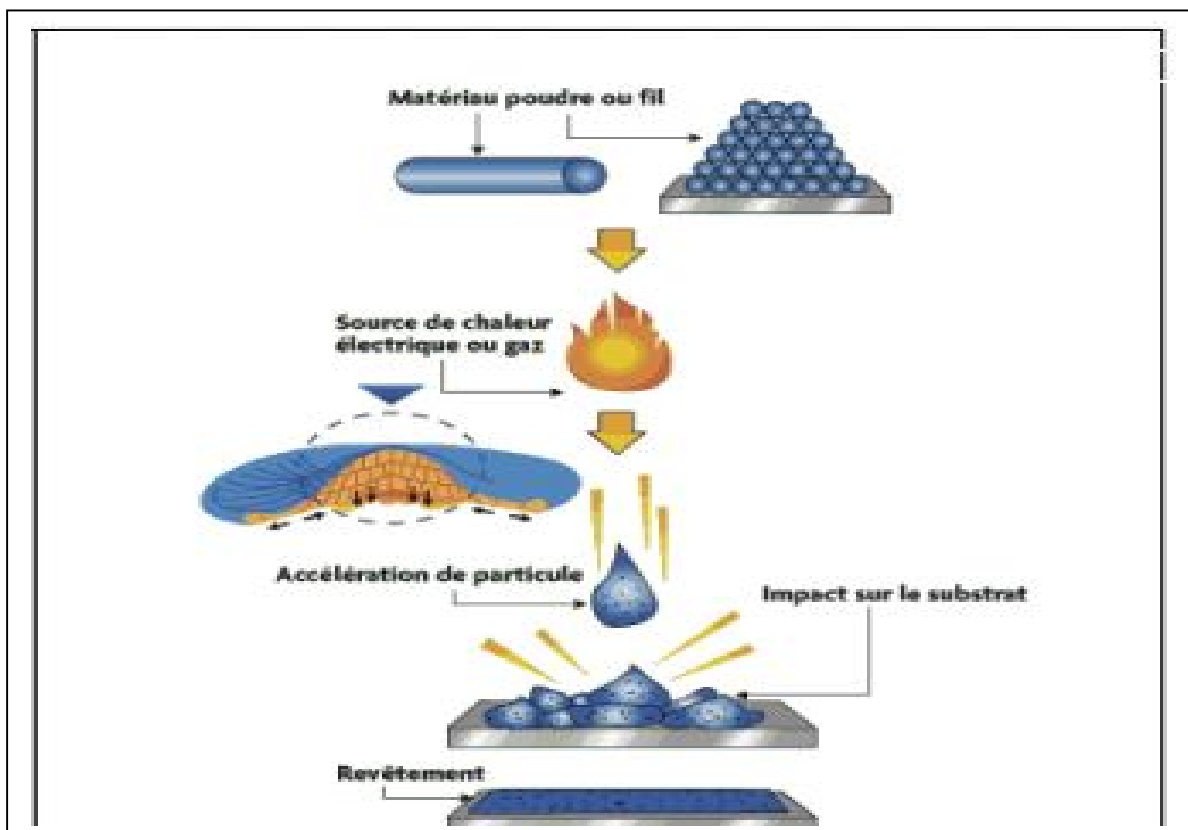


Figure-II.11 :Schéma de principe de la projection thermique à la flamme (poudre ou fil)[12].

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 [12].

II- 4.1.4.Métallisation à la flamme par pistolet à poudre

II- 4.1.4.1.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 oxy-combustible produite par un chalumeau et de le véhiculer grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion[13].

II- 4.1.4.2.Fonctionnement

Le pistolet de projection (Fig. II.13) est équipé d'un chalumeau oxy-gazde forme cylindrique alimenté en périphérie par les gaz de combustion (en général un mélange oxy-acétylène ou oxy- propane).



Figure-II.13 :Pistolet à poudre[13]

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 29traversant 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[13].

II- 4.1.4.3. 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).

II- 4.1.4.4. 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 [14], les propriétés d'usage d'un revêtement/substrat dépendent des caractéristiques intrinsèques des zones qui le constituent et notamment de l'interface couche-substrat. En effet, ces 30 interfaces est souvent ressentie 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 [15].

La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques [16]:

- 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).

II- 4.1.4.5. 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.

II- 4.1.5. Métallisation à la flamme par pistolet à fil

II- 4.1.5.1. 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 oxy-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 [10].

II- 4.1.5.2. Fonctionnement

Le pistolet de projection est équipé d'un chalumeau oxy-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.

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 matériau x 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 [13].



Figure-II.14 : Poste de métallisation à la flamme en fil (MEI)

II- 4.1.5.3. Les applications

Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000°C et la température à l'extrémité du fil ou de la baguette peut atteindre 95% de la température de la flamme. Ce qui permet de projeter des céramiques. La vitesse des particules est plus élevée que pour la flamme poudre, en raison du vecteur d'air comprimé, puisqu'elle atteint 150m/s.

La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de 1 à 25 kg/h, avec un pistolet portatif suivant la nature et le diamètre du fil, mais peut aussi déposer jusqu'à 40 kg/h avec un pistolet fixe en rechargement massif.

II- 4.1.5.4. Les dépôts

Tous les matériaux peuvent être projetés avec ce procédé, qu'ils soient tréfilés (sous forme de fil) ou non (sous forme de baguette), ou en poudre (sous forme de cordon). Ces différents conditionnements, permettent des dépôts de toutes sortes et la possibilité d'utiliser un pistolet à flamme fil pour projeter des

alliages auto fusibles. L'accrochage du dépôt sur le support se fait de façon mécanique. Mais après une projection d'alliages auto fusibles, il est possible de refondre le dépôt afin de le lier métallurgiquement à son support[13].

II- 4.1.5.5.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.

II- 5.Conclusion

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...)

Chapitre III :

Etude et caractérisations des revêtements du ventilateur FN280

III-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.

III.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[17]:

	C	MN	SI	P	S	NI	CR	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	0,004	0,003	0,047	0,053	0,005	0,002	.	95,21	0,0168

Tableau suivant III.A -composition chimique De l'E37 :

III.2- Métallisation par projection thermique.

III.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'sila.

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés dans lesquels un matériau d'apport (fil) porté par un pistolet est fondu grâce a 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 a déposé 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 III.1 : pistolet de projection flamme-fil.

III.3-Préparation des surfaces avant métallisation :

III.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.

III.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 anticorrosion[18].

III.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 [12] :

- 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[18].

III.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 [18].

III.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 de revêtement, la préparation de surface va différer pour être, soit :

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

III.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 sujet.

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 (subjectiles). Le grenailage met en œuvre des projectiles extrêmement variés, différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres qui influencent le résultat.



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



Figure III.4: les substrats après le sablage

III.5-Préparation des échantillons :

Après l'enrobage, les échantillons pour l'examen micrographique subit 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 subi ensuite un polissage de finition à l'aide papiers abrasifs (P5000) (**Figure III.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 III.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 HNO₃

*97 ml d'éthanol C₂ H₅ OH.

III.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)



(b)



(c)



(d)



(e)

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

Figure III.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

III.7- Paramètres de projection influant sur le dépôt^[18] :

- 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 de 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.

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

Tableau. III.1: Paramètres de projection flamme-fil

- Pression d'allumage :

	Oxygène	Acétylène	Air (comprimé)
Pression d'allumage (PSI)	2,1	1	4,8

Tableau. III.2: La Pression d'allumage de revêtement flamme-fil

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

- Débit de projection :

	Oxygène	Acétylène	Air (comprimé)
Débit de projection Ni-Al (L/min)	44	39	52
Débit de projection Mo (L/min)	35	15	55

Tableau III.3:Le Débit de projection de revêtement flamme-fil (Ni-Al, Mo).

Symbole	Élément	Masse atomique	Atomes	Pour cent en masse (%)
Ni	Nickel	58.693	1	68.507
Al	Aluminium	26.981	1	31.492

Tableau III.4: La composition de fil Ni-Al.

Symbole	Élément	Masse atomique	Atome	Pour cent en masse (%)
Mo	Molybdène	95.96	1	100

Tableau III.5: La composition de fil Mo.

III.8. méthode expérimentales :

III 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 III.7**).

Les mesures de la micro-dureté ont été réalisées à l'aide d'un pénétrateur de mode Vickers (Voir **FigIII.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 0.1 mm pour les échantillons revêtus 3 mm de Nickel-aluminium.



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

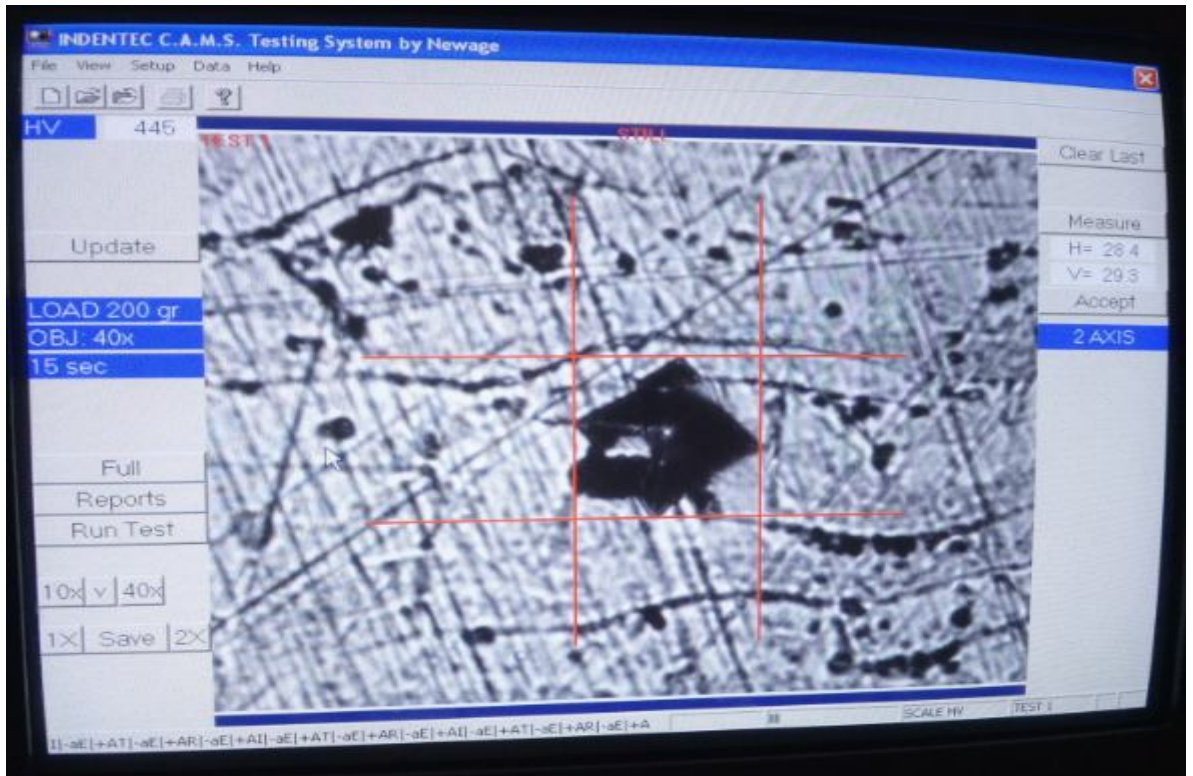


Figure III.8 Micro-dureté

	Zone de revêtement Ni-Al 3mm					substrat				
Point de mesure	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Dureté HV Ni-Al 3mm	369	455	473	388	307	200	195	143	143	145

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

	Zone de revêtement Mo 1mm					substrat				
Point de mesure	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Dureté HV Mo 1mm	455	751	771	805	435	195	141	141	145	150

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

III.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 III.9 Microscope optique en transmission et réflexion OLYMPUS BH2.

III.8.3- Microscopie Electronique à Balayage (MEB) :

En microscopie électronique à balayage (MEB) on travaille en vide ordinaire de l'ordre de $1.3 \cdot 10^{-3}$ 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 [21]. Un faisceau d'électrons est produit au sommet de l'appareil à l'aide d'un canon à électron (Fig.III.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 Jeol/JSM-6390 (Fig.III.10:b)



Figure III.10: a) Microscopie Electronique à Balayage

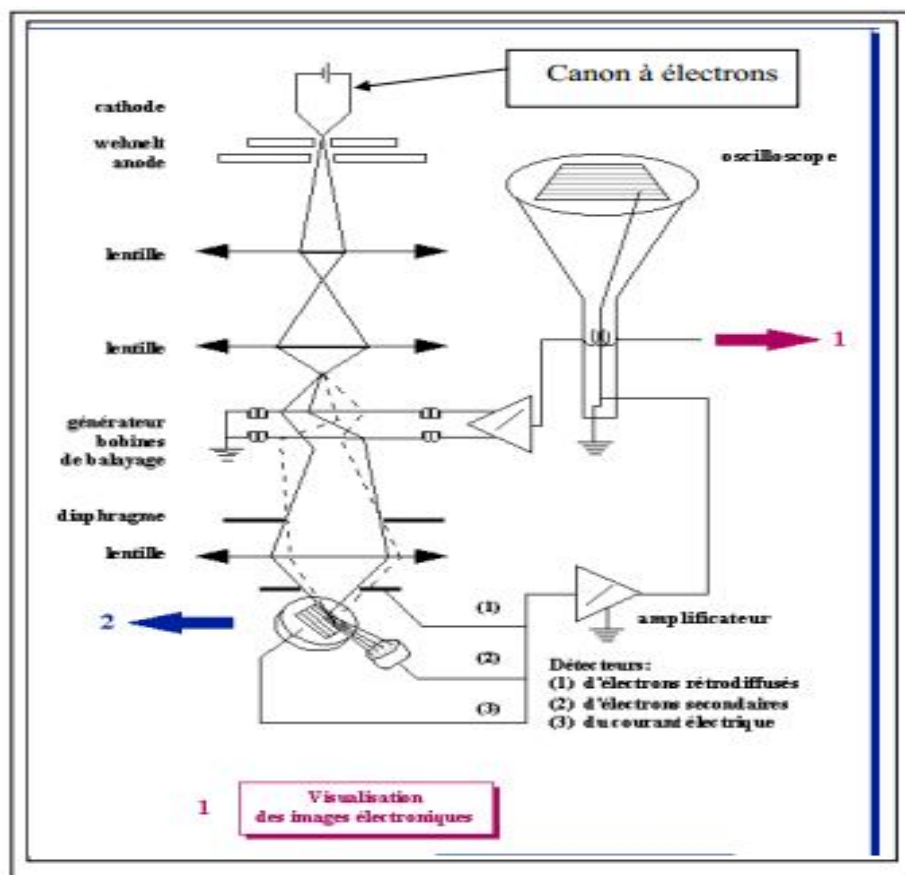


Figure. III.10:b) Microscope de type Jeol /JSM-6390 Principe du MEB[20]

III.9- Résultats et interprétations :

III.9.1- Observation métallographique:

III.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 III.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.

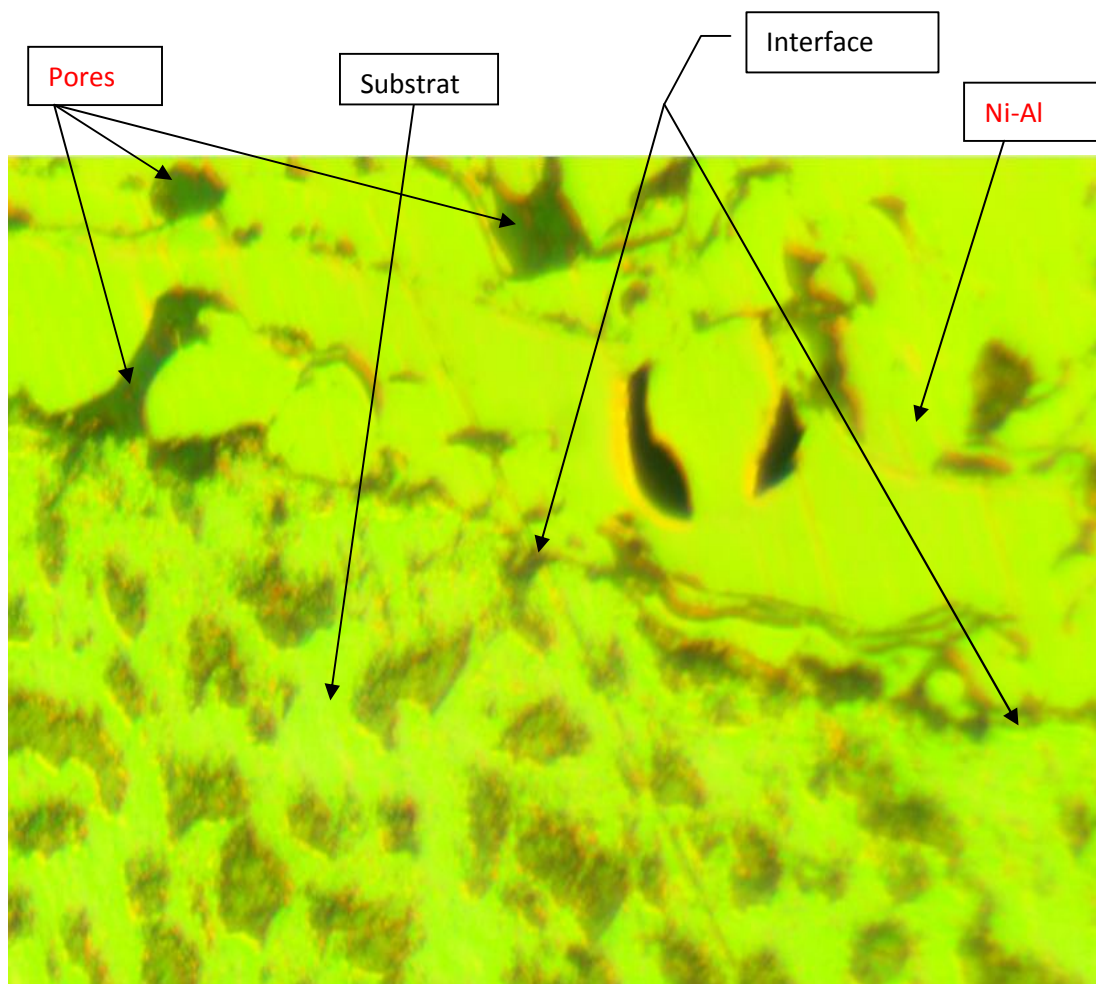


Figure III.11: Microstructure de l'échantillon revêtu par le Ni – Ala grossissement $\times 200$

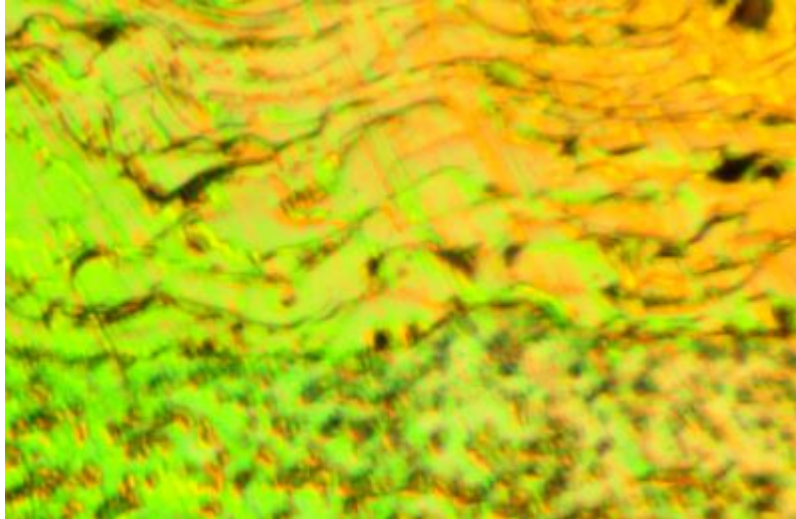


Figure III.12: Microstructure de l'échantillon revêtu par le Ni – Al a grossissement $\times 50$

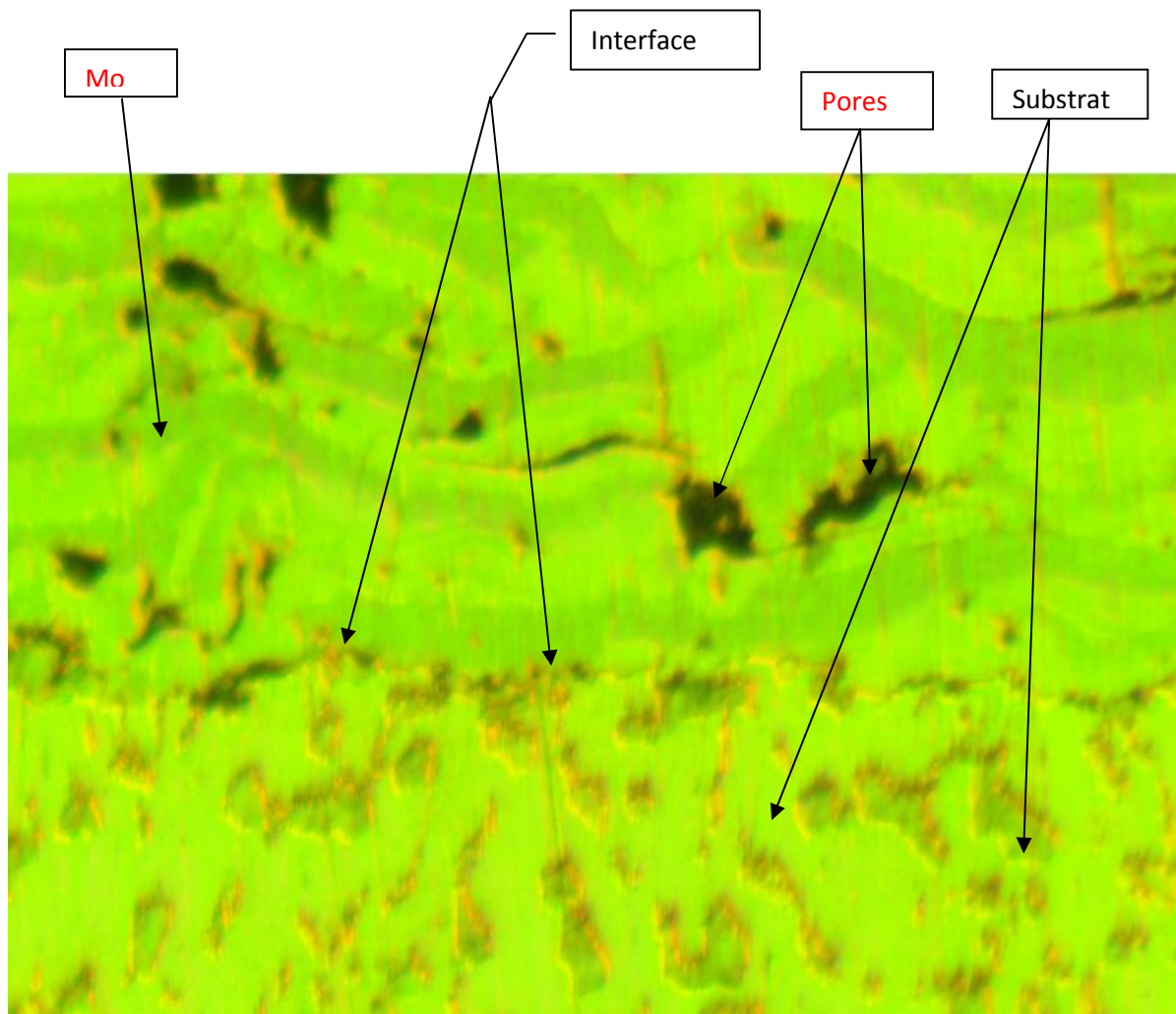


Figure III.13: Microstructure de l'échantillon revêtu par le Mo

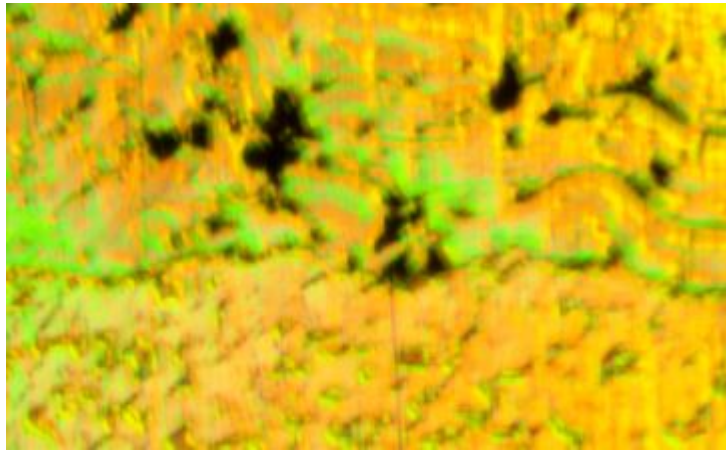


Figure III.14: Microstructure de l'échantillon revêtu par le Molybdène et Ni-Al. Grossissement $\times 50$

III.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 III.15 et III.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 [20]. 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 III.21 et 18) confirme le résultat d'observation par microscopie optique.

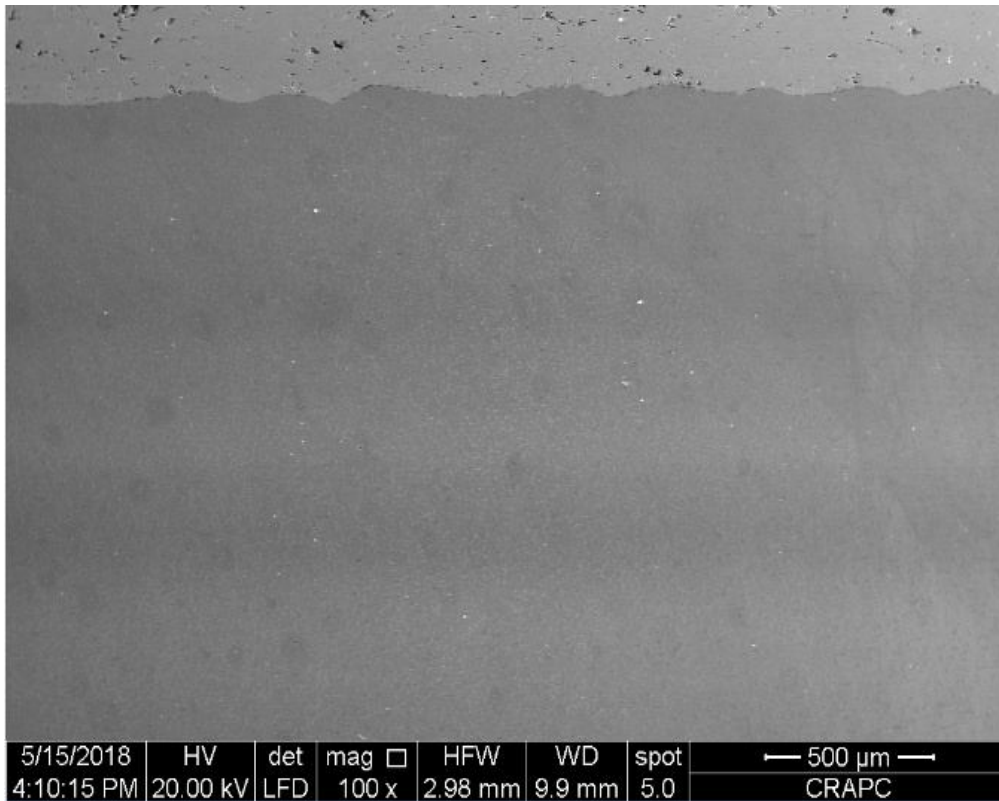


Figure III.15: Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène a grossissement de 500µm.

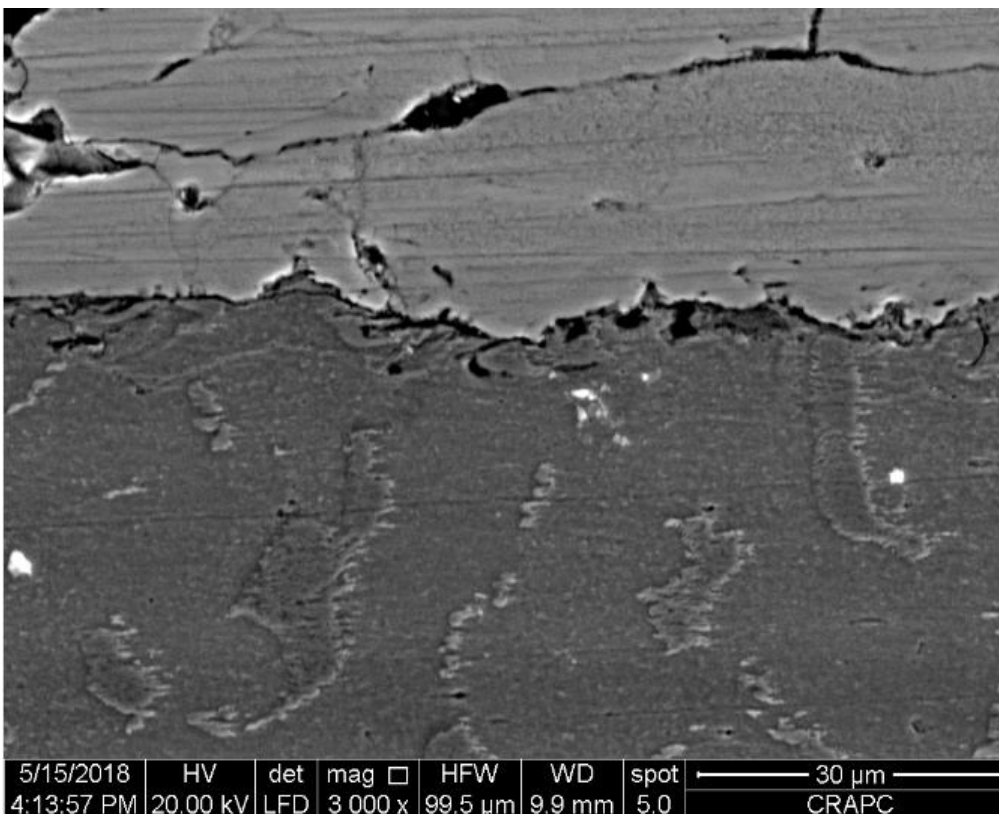


Figure III.16: Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène a grossissement de 30µm.

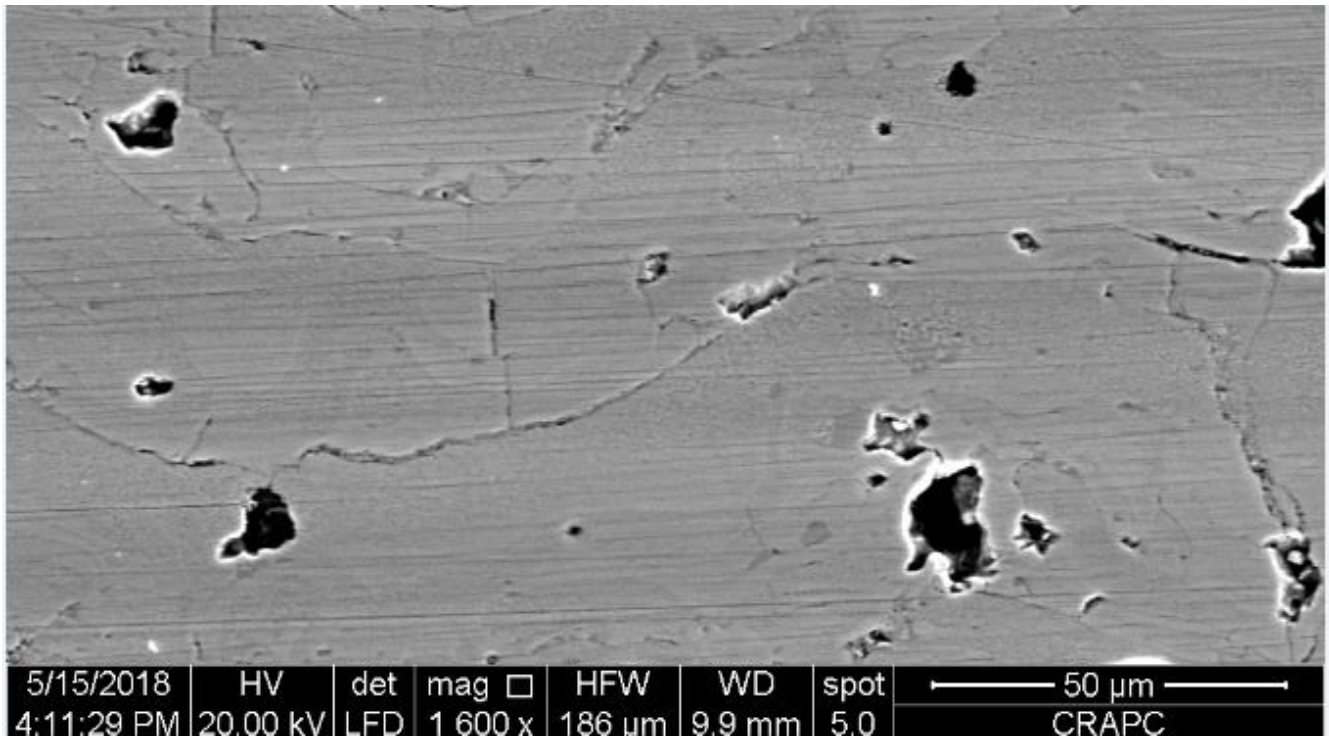


Figure III.17: Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en molybdène.(dépôt de molybdène.)

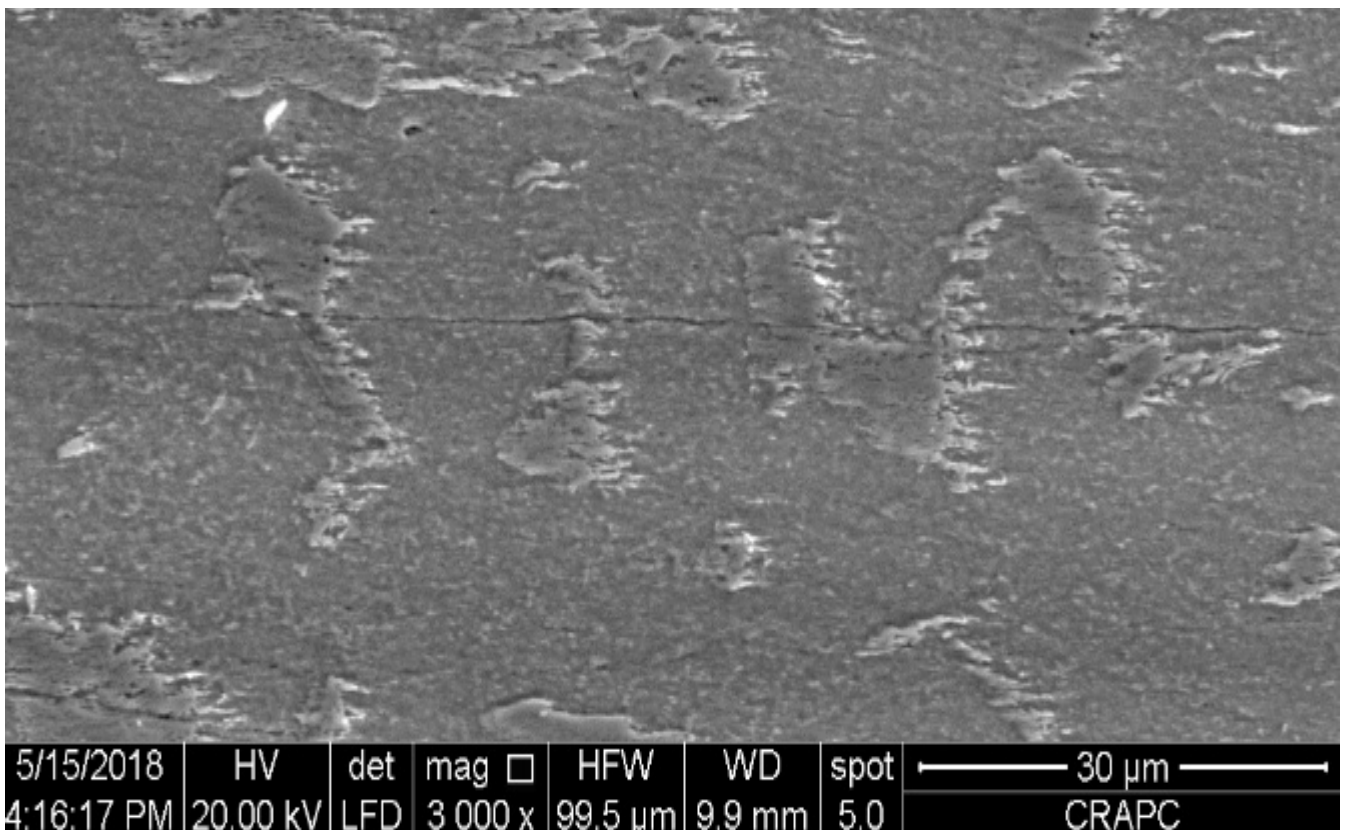


Figure III.18: Microstructure du cœur de l'acier E37

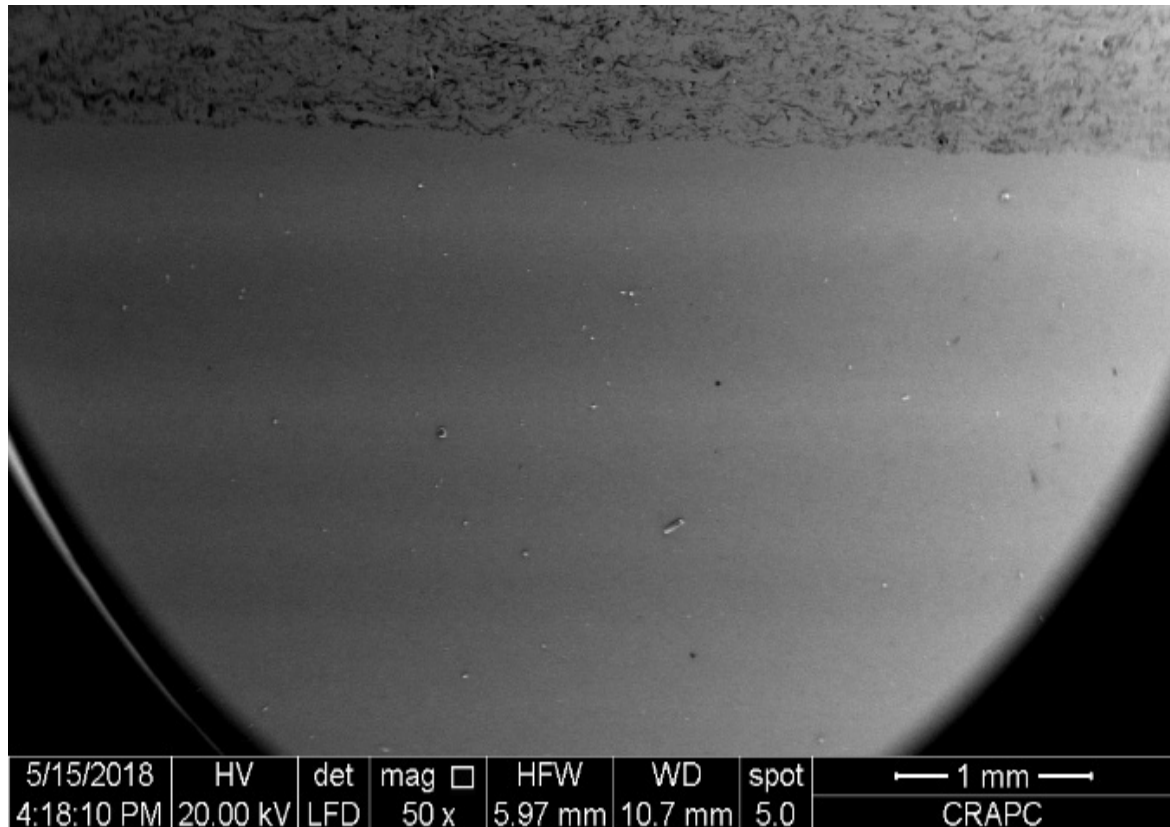


Figure III.19: Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en Ni - Al a grossissement de 1mm.

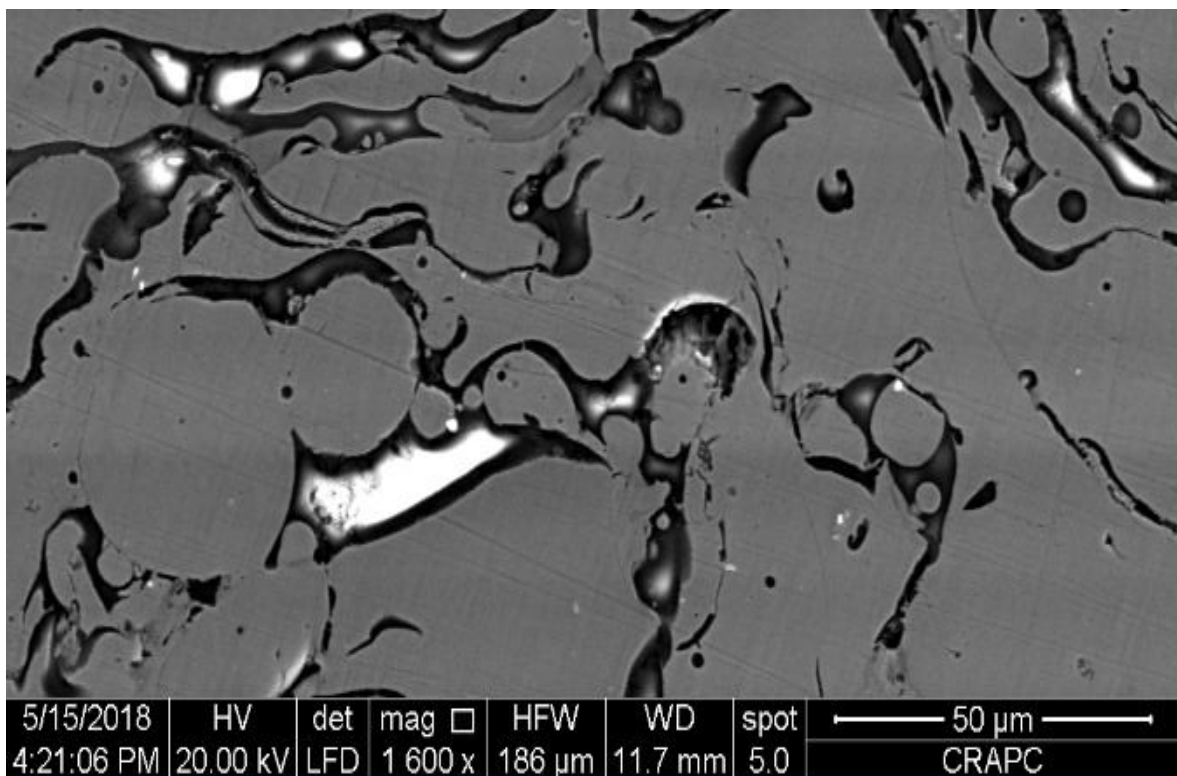


Figure III.20: Micrographie MEB de l'échantillon revêtu en Ni -AL. (Dépôt de Ni - AL.)

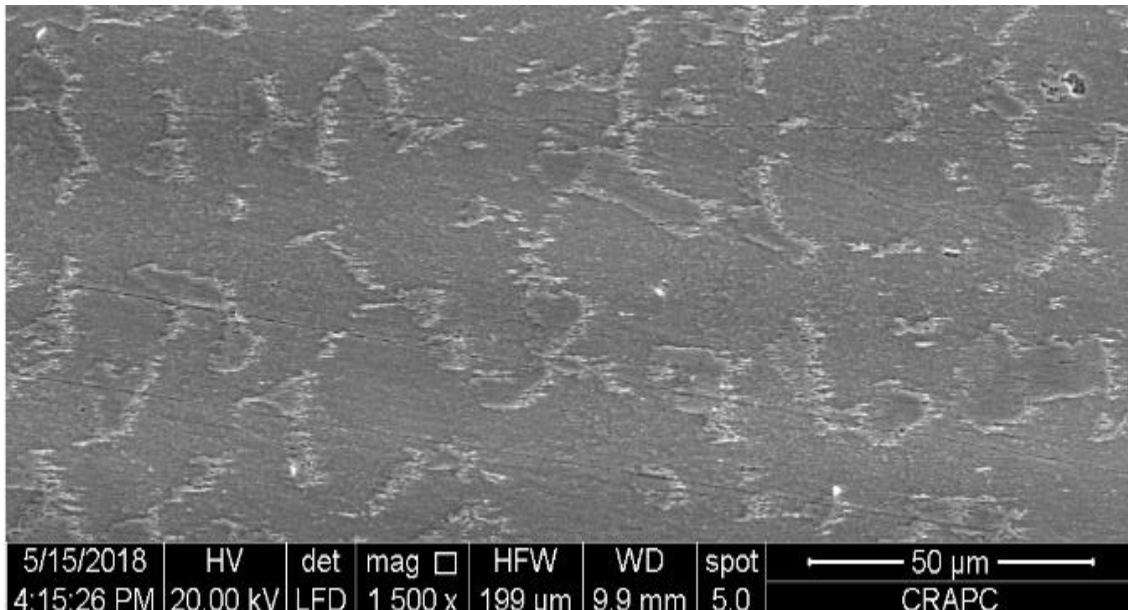


Figure III.21: Microstructure du cœur de l'acier E37

III.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. IV.14) et (Fig. IV.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 IV.14 et IV.15. On constate que la micro-dureté de la couche déposée varie considérablement jusqu'à atteindre une valeur maximale de 805 HV au 4^{ème} 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^{ème} point.

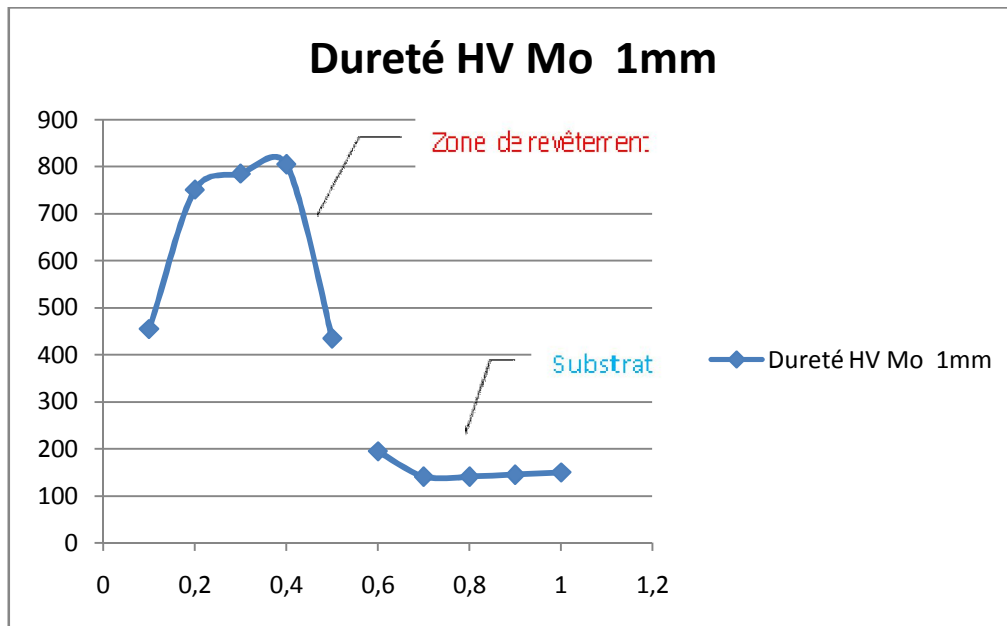


Figure III.22: Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu (Mo 1mm) et évolution de la micro-dureté dû substrat.

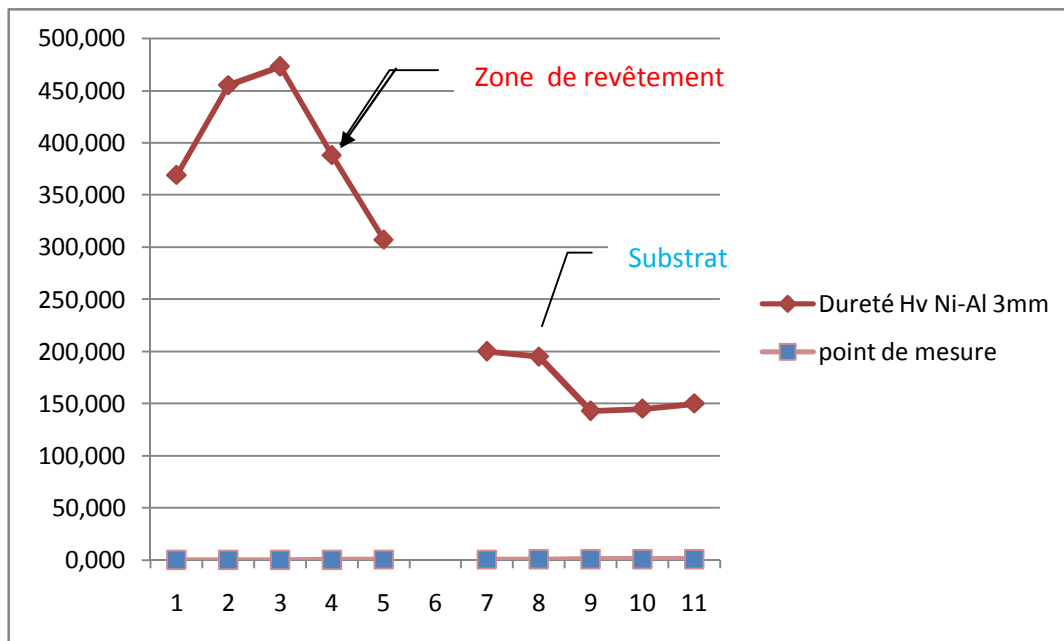


Figure III.23: Evolution de la micro-dureté du échantillon revêtu (Ni –Al 3mm) et évolution de la micro-dureté dû substrat.

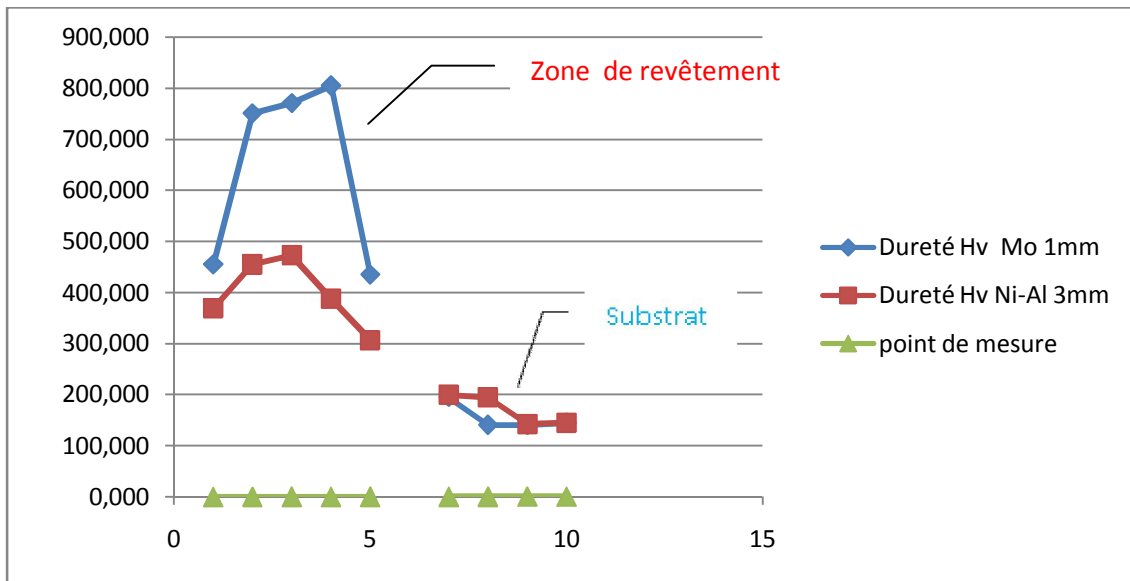


Figure III.24: Profil de dureté des deux échantillons.

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

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

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

III.10- Conclusion :

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objet de comprendre le mécanisme de métallisation à la flamme en fil menée sur l'acier E37.

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 (éch ; Ni –Al).

L'observation au MEB a montré la présence de pores à l'intérieur du molybdène et Ni -Al déposé.

Enfin et comme perspectives, nous pensons continuer cette étude pour répondre aux questions suivantes:

- Quelles couches résistent bien à l'usure et la corrosion ?

Conclusion général

Les ventilateurs de tirage sont de type aspirant sans caisson d'aspiration. Ils peuvent être soumis à un grand nombre d'avaries (usure, fatigue de contact...etc.) apparaissant lors du fonctionnement et dont les causes sont multiples.

Parmi les techniques pour améliorer la résistance contre l'usure : les dépôts de revêtements. Il existe plusieurs procédés de dépôts de revêtements, le choix d'un tel procédé dépend de plusieurs paramètres (l'épaisseur du revêtement, type du matériau du substrat ...etc.).

La réalisation des revêtements par projection thermique flamme-fil (Mo, Ni-Al) sur des substrats en acier E37 ont donné :

1. L'épaisseur du revêtement n'a pas une influence significative sur la micro.dureté.
2. le molybdène est un élément carburigène qui forme en présence du carbone avec le fer des carbures très durs, Il augmente aussi la vitesse de diffusion du carbone dans l'austénite et retarde sensiblement cette vitesse aux températures inférieures.
3. les duretés des couches en molybdène sont plus élevées comparées aux duretés des couches en Ni-Al.

Vu que les tests ont montré que le revêtement au Molybdène donne un meilleur résultat de dureté par rapport à celui par le Ni-Al, alors ce type de revêtement sera utilisé et généralisé pour nos ventilateurs ce qui leur permettra une longue durée de vie et une exploitation optimale.

Références Bibliographiques

- [1] Lafarge. Activités du Group (version en Algérie).
LAFARGE (consulté le 10 septembre).
- [1*] Lafarge. Fabrication du Ciment (version en portugais).
LAFARGE (consulté le 8 septembre 2015).
- [1**] Lafarge. Glossaire. Processus de fabrication du ciment ;
LAFARGE (Consulté le 8 septembre 2015).
- [2] Richard C., Béranger G., Coddet C., "Méthodologie et outils
De caractérisation des CNRS, paru dans Revêtements et Traitement
De Surface, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1998, 37-87.
- [3] 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.
- [4] Schoop, Scientific American, nov.1, 1913, p.346.
- [5] Richard C, "Étude des caractéristiques mécaniques de revêtements
Projetés par procédés thermiques", Thèse de l'UTC, Compiègne, Déc. 1992.
- [6] Hanlin et M. Ghislain, Bases théoriques de la projection thermique,
LERMPS, M'sila (2004).
- [7] J.P.PEYRE, C.TOURNIER, choix des traitements thermiques superficiels,
Den.CETIM(1985).
- [8] Unger R.H., "comparison of thermal spray bond coats", Thermal
Spray: Advances in coating technology. Proceedings of the national
thermal spray conference. 14-17 Sept.1987, Orlando, Florida, USA,
1987, 365-370.

- [9] "SultzerMetco Spray World: All about Thermal spray Technology", Cd-Rom, 1998.
- [10] I.Lakhtine. Métallographie et traitement des métaux, 3emeEdit., Edit. Mir, (1982).
- [11] J.P.PEYRE, C.TOURNIER, choix des traitements thermiques Superficiels, éd. CETIM (1985).
- [12] A. Prôner. Revêtement par projection, (1999).
- [13] M. Ducos. Revêtement par projection, (1999).
- [14] 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).
- [15] B. Etcheverry, Thèse de doctorat, Polytech.Toulouse, France (2006).
- [16]C.Robert, A. Vardelle, preceding of 15 the international thermal Sprayconférence, p.729-740, mai (1998).
- [17]R.Bensimon, les aciers, 2 vol., Pyc, Paris (1971).
- [18] 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).
- [19] Pontoon C.B. et Rawlings R.D., "Vickers indentation fracture Toughness: Part 2 Application and critical evaluation of standardized indentation toughness equations", Materials Science and Technology, vol. 5, pp 865-871, Oct. 1989.

[20]Zaouli M., "Caractérisation par diffraction X de l'état mécanique
Et microstructural des couches minces métalliques et céramiques
obtenues par PVD et plasma", Thèse de
L'ENSAM, Paris le 17 Mai 1990.

[21] Association Technique de Traitement Thermique, Métallographie
etTechniques d'analyses, Dunod, Paris (2004).

تلعب مراوح السحب دورا استراتيجيا في صناعة الاسمنت وذلك بعدم السماح بضياح الغبار الناجم عن طحن الكلينكر . إن وجود خلل في نظام الترشيح (وجود ثقوب في المصفاة....الخ) يعرض هذه المراوح للارتداء و التآكل و عدم التوازن....الخ. لذلك لجانا إلى طريقة التلييس كحل لهذا المشكل.

العمل المقدم في هذه المذكرة هدفه دراسة تلييس عينة من الصلب العادي E37 و ذلك باستعمال تقنيات الإسقاط الحراري. تقتصر هذه الدراسة على عينتين :

العينة الأولى : عينة ملبسة بمادة الموليبدان بسمك 1 مم .

العينة الثانية : عينة ملبسة بمادة النيكل – اليمينيوم بسمك 3 مم .

تحديد مميزات عملية التلييس تركز على عدة عوامل أهمها البنية ; الالتصاق ; الكثافة ; الصلادة , وذلك باستعمال تقنيات التمييز مثل المجهر الضوئي ; المجهر الماسح الالكتروني ; اختبار الصلادة.

الكلمات الاستدلالية : تلييس ; ارتداء ; التصاق ; المجهر الماسح الالكتروني.

Résumé:

Les ventilateurs de tirage jouent un rôle stratégique Dans l'industrie du ciment ; En ne permettant pas la perte de poussière provoquée par le broyage du clinker. Quand il y a un problème dans le système de filtration, comme dans le cas où nous avons un passage perceptible de fluide qui contient des grains. Ces problèmes rendent les ventilateurs vulnérables à l'usure et même à d'autres problèmes de déséquilibre ... etc.

En fait, c'est pour cette raison que nous proposons dans cette étude l'application de la méthode de revêtement afin de protéger ces ventilateurs contre ces dommages, ce qui leur donnera une longue durée de vie.

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour objet de comprendre le mécanisme de métallisation à la flamme (revêtement) menée sur un échantillon de la nuance d'acier E37 et suivre l'évolution de la microstructure interne et des propriétés mécaniques.

L'opération de revêtement est réalisée sur deux échantillons:

-1° échantillon: échantillon revêtu par le molybdène.

-2° échantillon: échantillon revêtu par le nickel – aluminium.

La caractérisation du revêtement s'est basée sur l'étude de:

La structure, l'adhérence, la densité (porosité) et la dureté. Avec des techniques de caractérisation telles que la microscopie optique et électronique à balayage, la micro dureté.

Mots clés: métallisation, revêtement, adhérence, microscopie électronique à balayage.

Abstract:

Draft fans play a strategic role in the cement industry. They do not allow the loss of dust caused by clinker grinding. When there is a problem in the filtration system such as the case where we have a noticeable passing of fluid that contains grains. These problems make the fans vulnerable to wear and even to other problems of imbalance...etc.

In fact, it is for this reason that we propose in this study the application of coating method so that to protect these fans against these damages, which will give them a long life span.

The presented work in this paper is basically designed to understand the flame metallization (coating) carried out on a sample of steel grades E37 as well as to follow and clarify the evolution of the internal microstructure and the mechanical properties.

The current coating operation is fundamentally carried out on two samples;

*1st Sample: sample coated with molybdenum.

*2nd Sample: sample coated by nickel-aluminum.

The characterization of the coating is based on the study of different factors among which are: the structure, the adhesion, the density (porosity) and the hardness With characterization techniques such as optical and scanning electron microscopy.

Key words: Metallization, Coating, Adhesion, Scanning Electron Microscopy.