REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : ingénierie des matériaux et de surface

Etude d'évaluation d'un revêtement obtenue par projection thermique

---

Proposé et Dirigé par :

Djeghdjough Mohamed

Présenté par :

Cheriet Mohamed Chahereddine

Salmi Mourad

Promotion : 2018/2019

Remerciement

Nous remercions tout puissant ALLAH de nous avoir permis et aider à accomplir ce travail en nous assurant l'attente de notre objectif et arriver à notre but.

Nous tenons à remercier particulièrement monsieur DJEGHDJOUGH MOHAMED notre promoteur pour ses conseils, son assistance, son suivi et son soutient pour mener à tenir nos différents travaux de notre mémoire de fin d'étude.

Nous témoignons de notre gratitude à l'ensemble des enseignants de l'université Dr. YAHIA FARES de Médéa, et particulièrement les enseignants de département de génie mécanique.

Nous remercions le laboratoire de traitement des surfaces des matériaux département de la science des matériaux l'Université Saad Dahlab de Balida. Je remercie le Professeur Nacer-Eddine Bacha pour son travail et ses conseils pour réaliser cette mémoire.

Merci à tous ceux qui, à un moment ou un autre, nous ont apporté leur savoir faire Tous nos remerciements vont à messieurs les membres du jury qui nous ont honorés par leur présence et leur sens du savoir.

إهداء

إلى زوجتي نجاة و أولادي ابتهال سيرين و مرتضى شهر الدين،
و كل من قدم لي الدعم
أهدى هذا المجهود المتواضع ،

إهداء

إلى امي وابي وكل اخوتي ،
و كل من قدم لي الدعم
أهدى هذا المجهود المتواضع ،
شـــــــــــــــــــــــهر الدين

SOMMAIRE :

Liste des figures :……1,2

Liste des tableaux :…….....3

Résumé : ……...4

Introduction :…….…….5

Chapitre 01 :

1.1 Projection thermique :……..……...….6

1.1.1 Définition :……6

1.1.2Techniques de projection :…….……6

1.1.3 Les différents procédés de la projection thermique :……7

1.1.3.1 Procédé par projection flamme :……..…...7

1.1.3.2 Procédé par projection flamme à poudre :……...…..7

1.1.3.3 Procédés projection flamme fil :……8

1.1.3.4 Procédé flamme hypersonique :…….……8

1.1.3.5 Procédé par Projection au Canon à détonation :……8

1.1.3.6 Procédé HVOF :…….9

1.1.3.7 Projections par arc électrique entre deux fils :……...……10

1.1.3.8 Procédé par principe de la projection plasma :…….....11

1.2 Matériaux pour la projection :……..……12

1.3 Application de la projection :……...…….……...12

1.4 Construction du dépôt :…….....…….12

Chapitre 02 :

2-1 L’adhésion et les sous-couches d’accrochages:……..15

2.1.1 L’adhésion et L’adhérence :……15

2.1.1.1 Définition :……..15

2.1.1.2 Mécanisme d'adhérence :……...16

2.1.1.3 Les théories d'adhésion :……16

2.1.1.3.1 Les liaisons interatomiques :……...16

2.1.1.4 L'adhésion du revêtement par projection :…….17

2.1.1.5 L'ancrage mécanique :……17

2.1.1.6 Une liaison physique :……18

2.1.1.7 Une liaison chimique :……18

2.2 Le mouillage :……18

2.2.1 Paramètre influencent le mouillage :……..19

2.2.1.1 La température :……...19

2.2.1.2 Le temps :……19

2.3 Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat :……19

2.3.1 L'étalement :……19

2.3.2 Impact :……19

2.3.3 Solidification :……20

2.4 Etat physico-chimique de substrat :……20

2.4.1 La rugosité :…….....20

2.4.2 Le préchauffage :……21

2.4.3 Oxydation du substrat métallique :……..21

2.4.4 Température de transition :……..22

2.5 Etat physico-chimique des particules :……22

2.5.1 Vitesse de particules :……...23

2.5.2 Température de particules :……..24

2.6 L'Adhésion céramique/métal :……25

2.6.1 Les sous-couches d'accrochage :……...25

2.6.2 Les sous-couches de liaison utilisées :……...25

Chapitre 03 :

3. Expérimental et matériaux :……26

3.1 Les appareils utilisent :……26

3.1.1 Tamiseuse :……26

3.1.2 La balance :……27

3.1.3 Le décapage et polissage :……27

3.1.4 Pistolet flamme-poudre ROTOTEC 80 :……...28

3.1.4.1 Principe de fonctionnement :……..28

3.1.4.2 Donnée techniques :……28

3.1.5 Microscope optique :……29

3.1.6 Posi-test :……...29

3.1.6.1 Précision :……...29

3.1.6.2 Caractéristiques :……30

3.2 Matériaux utilises :……...30

3.2.1 Les poudres utilisées :……...31

3.2.1.1 Préparation de la poudre :……..31

3.2.1.2 Les résultats après le tamisage :……31

3.2.1.3 analyses des résultats obtenus :……..33

3.2.2 Substrat utilisées :……34

3.3 Expérience :……34

3.3.1 Application :……34

3.3.2 L'essai d'adhérence :……35

3.3.3 Résultats et discussion :……36

3.25 Résultats d arrachement :……..38

3.3 discutions des résultats :…….39

Conclusion général :……...40

Bibliographie :……...41

Liste des figures :

Figure 1.1 : Schéma de principe de la projection thermique. [1]……...6

Figure 1.2 : Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre. [9]…….……..7

Figure 1.3 : Schéma du principe d'un pistolet flamme fil. [9]……...8

Figure 1.4 : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation.[1]…….....……..9

Figure 1.5 : Principe de fonctionnement procédé HVOF.[1]……...10

Figure I.6 : Principe de fonctionnement de projection arc-fil. [1]……...11

Figure 1.7 : Principe de fonctionnement de projection plasma. [1]……..…...11

Figure 1.8 : Classification des différentes technologies de projection thermique.[1]……12

Figure 1.9 : Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique .[1]……..13

Figure 2.1 : différence entre l'adhésion et l'adhérence. [2]…….……15

Figure 2.2 : L'adhésion mécanique sur un substrat.[3]…….18

Figure 2.3 : Goutte de liquide sur une surface lisse - Définition de l'angle de mouillage. [4]……...18

Figure 2.4: Modes impact Formation of solid splats during thermal spray deposition. [8]……...…..20

Figure 2.5 : représente la surface oxydée. [6]……..22

Figure 2.6 : Morphologie d'un splat en fonction de la température du substrat. [7]……22

Figure 2.7 : Effet de la taille de particule (18 µm et 46 µm) sur l'évaluation de la vitesse d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma. Tirée de (Chang-Jiu, Guan-Jun et Öz1) [8]…….....23

Figure 2.8 : Effet de la température des particules (18 µm et 46 µm) sur l'évaluation de la température d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma. [9]……..24

Figure 2. 9 : Valeurs expérimentales du travail d'adhaorWexp de différents métaux purs sur l'alumine en fonction de valeurs correspondantes du facteur thermodynamique [10]…….25

Figure 2.10 : Contrainte de rupture d'un dépôt de zircone projeté sur XC38 Durée de vie d'un revêtement du zircon sur différentes sous couches d'accrochage…

Figure 3.1 : Un tamiseur. …….27

Figure 3.2 : Une balance. …….28

Figure 3.3 : Une meule. ……...28

Figure 3.4 : ROTOTEC 80. …….29

Figure 3.5: Un microscope métallographique ZEISS……..31

Figure 3.6 : Posi_test……32

Figure 3.7 :Colle pour test d'adhésion…….33

Figure 3.8 : Histogramme représente la distribution granulométrique des poudres (Ni Al Mo et Ni Al Cr Si) ……..35

Figure 3.9: Substrat avant et après meulage…….36

Figure 3.10 : Image représente le revêtement obtenu par projection thermique……..36

Figure 3.11: Résultat de la métallographie (images prisent par un microscope optique)…….37

Figure 3.12 : Chariot fixé sur le revêtement par une colle……...37

Figure 3.13 : la projection des poudres métallique par projection thermique……..38

Figure 3.14 : Image du chariot arracher par Posi test. …….39

Figure 3.15 :deux photos représentent l'arrachement du revêtement avec le chariot arraché. ……39

Figure 3.16 : représente les revêtement arraché……..……...……..40

Figure 3.17 histogramme représente l force d'adhérence du revêtement pour chaque granulométrie des poudre utilise (ni al mo, ni al cr si)……40

Liste des tableaux :

Tableau 2.1: Energie associée aux liaison secondaires et aux liaisons primaires.[13]……...17

Tableau 2-2 : Les différentes températures de fusion des aluminures de nickel ……26

Tableau 3-1 Représente la distribution granulométrique des poudres (Ni Al Mo et Ni Al Cr Si)……..34

Tableau 3.2 représente la force d'adhérence du revêtement pour chaque granulométrie des poudre utilise (ni al mo, ni al cr si)……40

ملخص:

قمنا في هذا العمل بطلاء خزفي على عدة صفائح معدنية وذالك من خلال إسقاط مسحوق اللهب الحراري عليها بعد تحضيرها. ويعتمد ذلك على طلاء أولي كوسيط لطلاء ثنائي يستند إلى نوعين من المســــــــاحيق في هذه التجربة الأول **Ni Al Mo** و الثاني **Ni Al Cr Si** و لمعرفة تأثيره على التصاق الطلاء الذي تم الحصول عليه تم إجراء اختبار الالتصاق بواسطة جهاز اختبار التصاق (Posi-test) و تجربة قياس حبيبي مختلف للطبقات الوسيطة التي تتراوح بين **32 <d> µm 53** و **53 <d> µm75** و **75 <d1> µm50**. أظهرت النتائج التجريبية أن طبقة الطلاء النحيفة الترابطية لديها التصاق جيد جدًا مقارنة بأحجام الجسيمات الأخرى.

Résumé :

Ce travail consiste aréalisé un revêtement en céramique sur un substrat métallique par projection thermique flamme poudre, Pour protéger notre structure.Ses dépôtssont réalisé avec deux sous couches d'accrochage a base nickel la première poudre **Ni Al Mo** et une deuxième poudre **Ni Al Cr Si** pour voir l'influence de celle-ci sur l'adhérence du revêtement obtenue. L'essai d'adhérence a été réalisé par testeur d'adhésion (Posi-test) sur différentes granulométries des sous couches d'accrochage qui varie entre **32<d>53µm** et **53<d>75µm** et **75<d1>50µm** pour les deux sous couches d'accrochage. Les résultatsexpérimentaux ont montré que la sous couche d'accrochage la plus fine à une très bonne adhérence par rapport aux autres granulométries.

Abstract:

This work consists of a ceramic coating on a metal substrate by thermal flame powder projection, to protect our structure. Its deposits are realized with two-band coating based on the first **Ni Al Mo** powder and a second **Ni Al Cr Si** powder to see the influence of it on the adhesion of the coating obtained. The adhesion test was carried out by adhesion tester (Posi-test) on different granulometry of the subbing layers which varies between **32 <d> 53µm** and **53 <d> 75µm** and **75 <d1> 50µm** for the two sub-layers of hanging. Experimental results have shown that the thinnest bonding undercoat has a very good adhesion compared to other particle sizes.

Introduction :

Les structures en service sont soumises toujours à différents types sollicitations mécanique et chimique dépendent des conditions et le milieu de travail tel que l'environnement l'usure le cycle thermique tout ça influençant sur la structure mise en œuvre.

Depuis plusieurs dizaines d'années, les concepteurs et les utilisateurs sont de plus en plus essayent de développé la durabilité des pièces et la rénovation des pièces mécaniques usées est maintenant plus que primordiale sur le plan économique, pour cela, la technique de la projection par flamme poudre aura lieu dans ce domaine. Se caractérise par un rendement de dépôts élevés et des coûts faible par rapport aux autres procédés d'entretien. Ce procédé consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustible, et à le véhiculer jusqu'au substrat grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000 °C. La vitesse des particules projetées par la flamme est faible Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de

Quelques dixièmes à quelques centièmes de millimètre d'épaisseur.

L'objectif de ce travail est de réaliser des dépôts céramique avec deux sous couches d'accrochage à base de nickel la première et Ni Al Mo et Ni Al Cr Si pour voir l'influence des sous couches d accrochage sur la qualité du revetement obtenue par projection flamme poudre.

Notre travail est en trois chapitres :

Premier chapitre : est une recherche purement bibliographique sur la projection thermique et présenté la différente technique de projection utilisée dans l'industrie.

Deuxième chapitre : une recherche bibliographique sur l'adhérence du revêtement et l'influence des sous couche d'accrochage.

Troisième chapitre : il est deux parties :

a) matériaux et procédés utilisé : présentation des protocoles expérimentale et les appareils utilisé pour caractériser la qualité du revêtement.
b) résultats et discussion : présentés les résultats de nous expérience ainsi que des discussions et des commentaires.

Et à la fin une conclusion générale

CHAPITRE N° 01

1.1 Projection thermique :

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans une première partie une synthèse bibliographique sur la projection thermique et ces différentes méthodes sur la projection qui est la technique employée pour réaliser nos dépôts,

1.1.1 Définition :

La projection thermique fait partie des techniques de traitement de surface par voie sèche. Cette technique regroupe un ensemble de procédés utilisés pour réaliser des revêtements épais (quelques dizaines de micromètres à quelques centaines généralement) de nature très variées sur des substrats (pièce à revêtir) tout aussi variés.

1.1.2 Techniques de projection :

La projection thermique consiste à utiliser une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma) pour fondre un matériau d'apport ou le porter à l'état pâteux, puis le projeter sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie, La matière à déposer, sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur. Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées qui heurtent, s'étalent et se solidifient sur la surface à revêtir, formant un dépôt par empilements successifs. **. [1]**

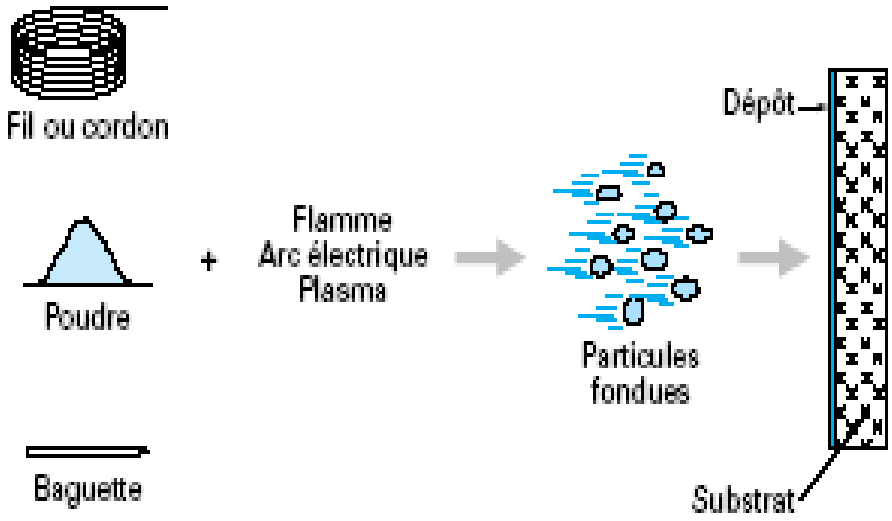


Figure 1.1 : Schéma de principe de la projection thermique. [1]

1.1.3 Les différents procédés de la projection thermique :

Il existe de nombreux procédés de projection thermique qui sont différenciés Principalement par la source d'énergie mise en œuvre (combustion, décharge électrique). Les trois principaux sont la projection par flamme, par arc électrique et par plasma. **[3]**

1.1.3.1 Procédé par projection flamme :

On désigne par le nom de projection flamme toute projection utilisant l'énergie thermique provenant de la combustion d'un carburant avec l'oxygène. La température d'une flamme oxy-combustible varie de 2800°C à 3150°C. Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2800°C, et qui ne subliment pas, peuvent être projetés. Il existe deux types de projection par flamme qui sont à flamme poudre et fil. **[3]**

1.1.3.2 Procédé par projection flamme à poudre :

Le procédé de projection par flamme est le procédé de projection thermique le plus ancien, consistant à introduire un matériau sous forme de poudre dans une flamme oxy-combustible
Et à le véhiculer jusqu'au substrat grâce à l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion [1,9] Les températures de la flamme sont de l'ordre de 3000 °C. La vitesse des particules projetées par la flamme est faible (~ 50 m / s) et c'est pourquoi elles sont souvent accélérées avec de l'air. La distance entre la buse et le substrat est comprise entre 100 et 200 mm afin que les particules de poudre aient un temps de séjour suffisamment long pour être fondues. Ce procédé permet d'obtenir des dépôts de quelques dixièmes à quelques centièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 1 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat (T<250°C). [1, 6-9] Les taux de porosité varient de 10 à 20% avec un rendement moyen de 50 %. La force d'adhérence des dépôts au substrat est de 20 à 40 MPa. **[1]**

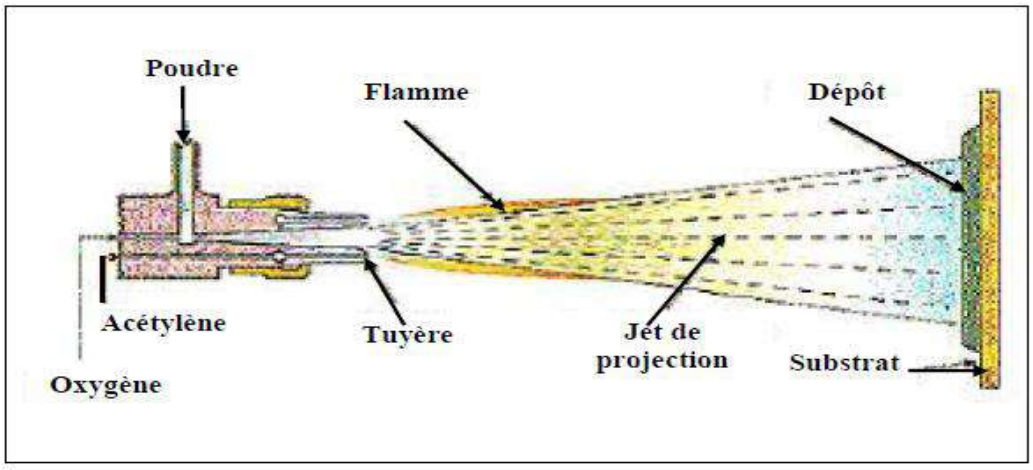


Figure 1.2 : Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre. [9]

1.1.3.3 Procédés projection flamme fil :

Dans cette technique le matériau d'apport est introduit dans le centre de la flamme sous forme de fil, de cordon, ou de baguette. Ce procédé utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme poudre et qui ne sert qu'à faire fondre le matériau. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé, celui-ci sert à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils. La vitesse des particules est plus élevée (150m/s), la température du bout de fil peut atteindre 0.95 fois la température de la flamme ce qui permet la projection des céramiques, à des taux horaires de dépôts qui varient de 1 à plus de 30 kg/h en fonction du matériau, les propriétés de dépôts désirées et les diamètres de fil ou de baguettes utilisés. **[9]**

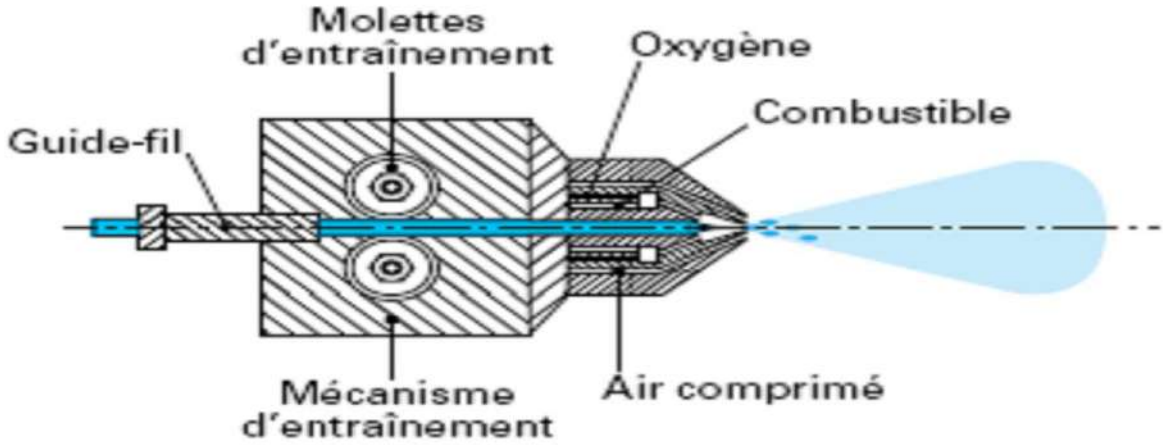


Figure 1.3 : Schéma du principe d'un pistolet flamme fil. [9]

1.1.3.4 Procédé flamme hypersonique :

Cette projection tient son nom de la vitesse très élevée de sortie des gaz qui se situe Entre Mach 1 et Mach 2, et est présentée par de procédés qui sont :

- La projection hypersonique à tir discontinu : canon à détonation.
- La projection hypersonique à tir continu : HVOF (**H**igh **V**elocity **O**xy **F**uel). **[3]**

1.1.3.5 Procédé par Projection au Canon à détonation :

Dans ce procédé le matériau d'apport, sous forme de poudre, est introduit dans un Tube fermé à une extrémité appelé canon à détonation **[9]**, en même temps que les gaz de combustion (généralement oxygène et acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de 6 à 8 allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée est éjectée à très grande vitesse (950 m/s) par l'onde de choc créée et qui se propage dans le tube avec une surpression de

l'ordre de 2 MPa. Le régime de projection est donc discontinu entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué. Les dépôts réalisés avec ce

Procédé possèdent des caractéristiques remarquables telles que la porosité qui est inférieur

À 1% et une adhérence qui est souvent supérieur à 80 MPa, à des taux horaires de dépôts de

L'ordre de 3 à 5 kg/h. **[1,9]**

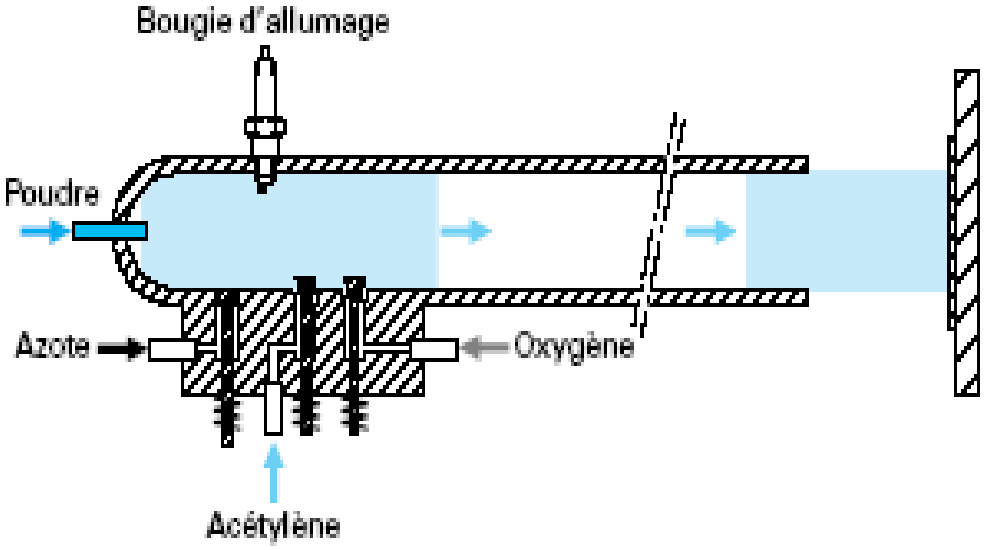


Figure 1.4 : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation. [1]

1.1.3.6 Procédé HVOF :

On utilise également une torche à flamme, mais la géométrie spéciale de la tuyère, et l'ajout d'une chambre de combustion (où règne une pression de 5 à 7 bars), suivie d'une tuyère convergente-divergente permet d'atteindre des vitesses de gaz supersoniques de1800 à 2200 m/s et des températures de 2500 à 2800°C (fig. I.5).[2] Le matériau à projeter, généralement sous forme de poudre, est injecté à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où il est fondu et accéléré dans la tuyère à une vitesse de 300 – 600 m/s. Les pressions importantes atteintes dans le pistolet n'autorisent pas l'utilisation de l'acétylène comme gaz combustible (risque d'explosion). [10) Pendant leur temps de séjour très court (quelques dixièmes de millisecondes) dans la flamme, les particules sont généralement chauffées à l'état pâteux, l'énergie cinétique (vitesse>300m/s) acquise permettant cependant la réalisation de dépôts caractérisés par une faible porosité (<2%), une bonne adhérence (70- 100MPa) et une faible rugosité de surface. **[1]**

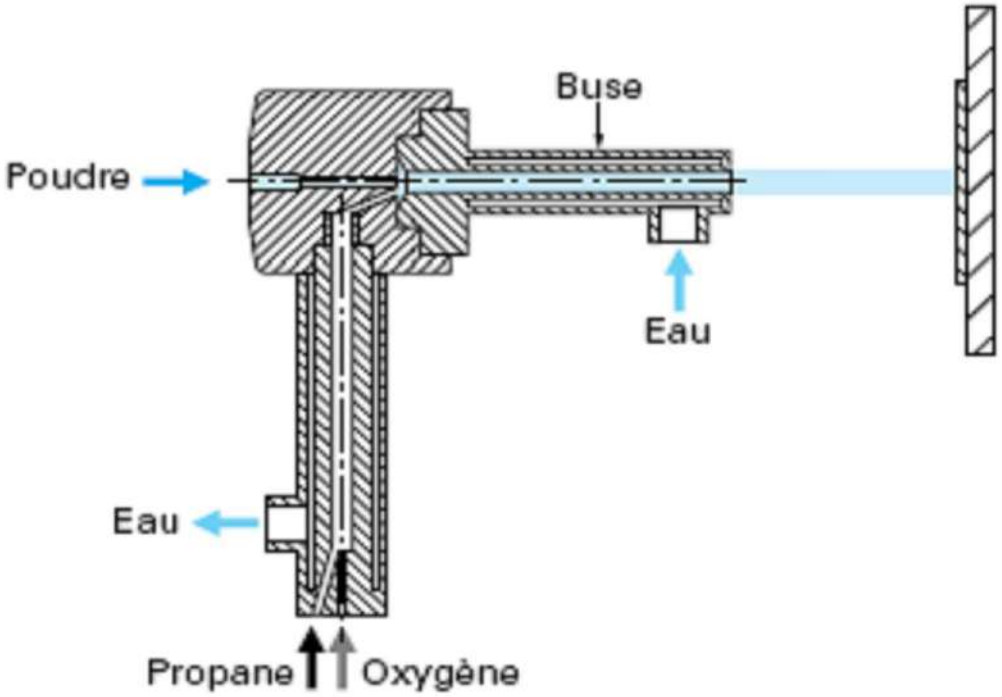


Figure 1.5 : Principe de fonctionnement procédé HVOF. [1]

1.1.3.7 Projections par arc électrique entre deux fils :

La projection à l'arc est le premier procédé ayant utilisé l'énergie d'une décharge électrique. Il consiste en un arc électrique créé entre deux fils consommables et un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat. **[3]** L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible). **[1]** Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant. L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à10% et une adhérence de 20 à 40 MPa. La technique est simple et peu coûteuse et permet de déposer la matière avec un débit important (de 5 à 30 kg/h). L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt. Des modifications du pistolet et l'emploi d'un second jet de gaz ont permis de concentrer le flux de matière atomisée et de diminuer la porosité des couches. **[2]**

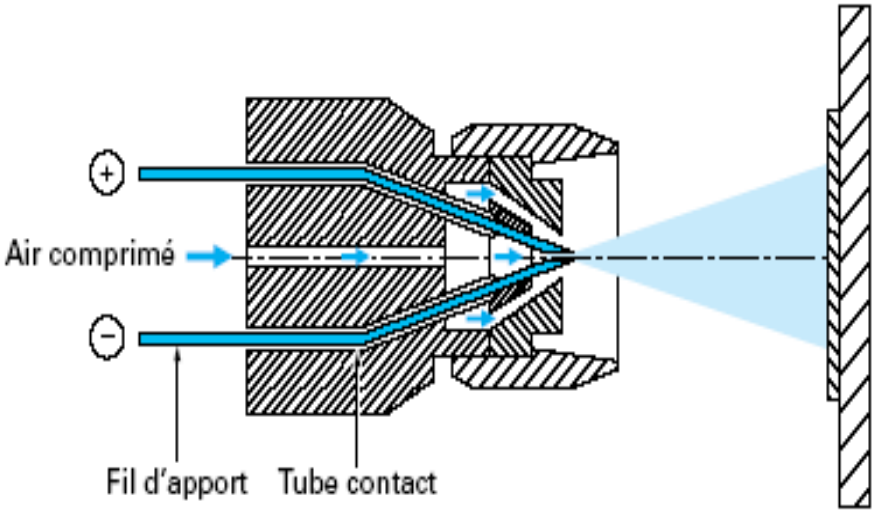


Figure I.6 : Principe de fonctionnement de projection arc-fil. [1]

1.1.3.8 Procédé par principe de la projection plasma :

C'est cette technique qui a été utilisée pour déposer nos échantillons, elle utilise comme source thermique un arc électrique de forte intensité (plusieurs centaines d'ampères) éclatant entre deux électrodes, dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général. Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (15000 à 20 000 °C), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée de 1000 à 1500 m /s. [15] C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur, généralement de l'argon. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz sur le substrat. **[1, 2, 9]**

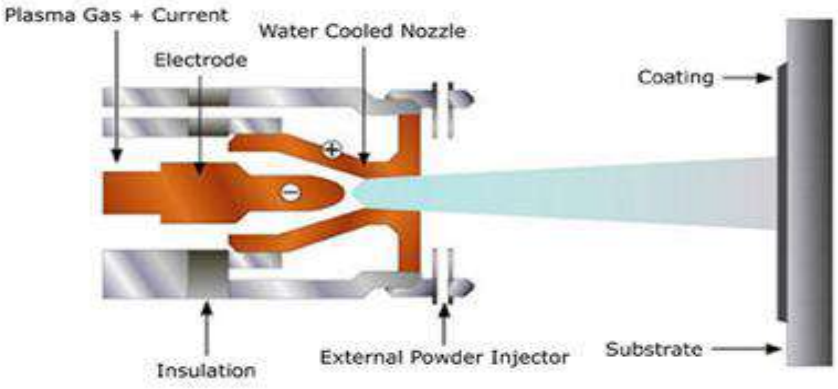


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement de projection plasma. [1]

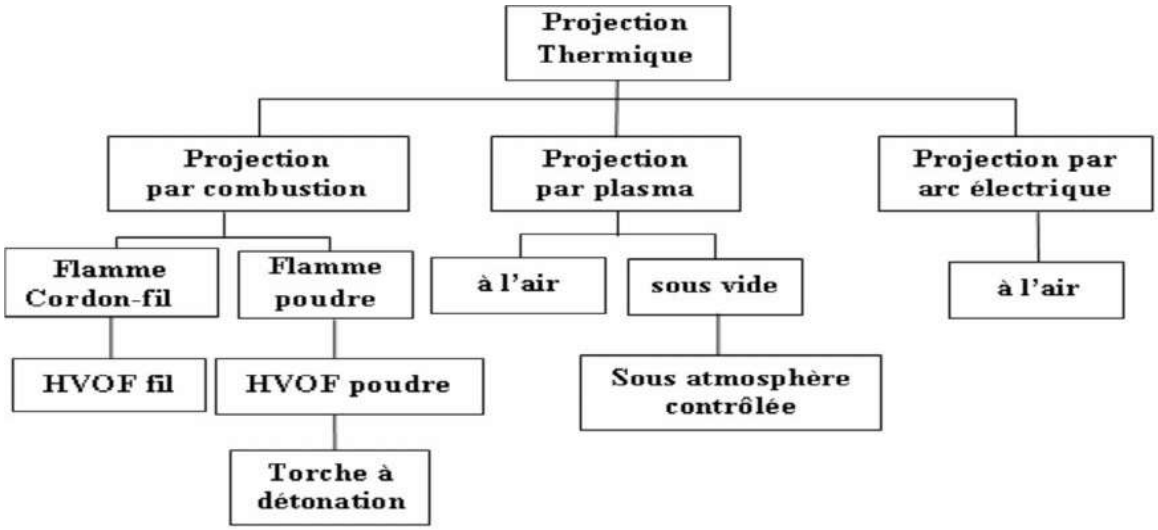


Figure 1.8 : Classification des différentes technologies de projection thermique. [1]

Matériaux pour la projection :

On distingue trois types de dépôts qui peuvent être utilisés :

Matériaux monophasés, tels que des métaux, alliages, intermétalliques, céramique, et polymères. **[5]**

Matériaux composites, telles que les cermets, métaux renforcés, et polymères renforcés. **[5]**
Matériaux multicouches, désignés sous le nom de matériaux à gradient fonctionnel. **[5]**

1.3 Application de la projection :

La projection thermique est appliquée dans plusieurs domaines. En premier lieu, ce procédé assure une très bonne résistance à l'usure jugée supérieure à celle des matériaux massifs. Pour un exemple de dépôt de chrome appliqué sur des rouleaux d'imprimerie, cela attribue une bonne résistance à l'usure abrasive. **[6]**

Une des utilisations de la projection thermique est La protection contre la corrosion : Cette application permet d'obtenir des protections cathodiques utilisant de l'aluminium ou du zinc, des protections anodiques ou neutres. **[5]**

1.4 Construction du dépôt :

La formation du revêtement est obtenue par l'impact, la déformation, la solidification rapide et l'empilement successif des gouttelettes fondues ou à semi-fondues comportant éventuellement des oxydes, de microporosités, des fissurations, des zones de contact entre lamelles et avec le substrat plus ou moins parfaites. **[10]** La manière dont les gouttelettes s'étalent et se solidifient influe sur les caractéristiques du dépôt et notamment sur sa porosité. Les mécanismes d'étalement et de solidification des particules sont relativement complexes, car ils dépendent de l'énergie cinétique et thermique des gouttelettes, de leur viscosité et de

leur mouillabilité vis à vis du matériau substrat, de la nature et de l'état de surface du substrat ainsi que de sa température. **[8]**

.

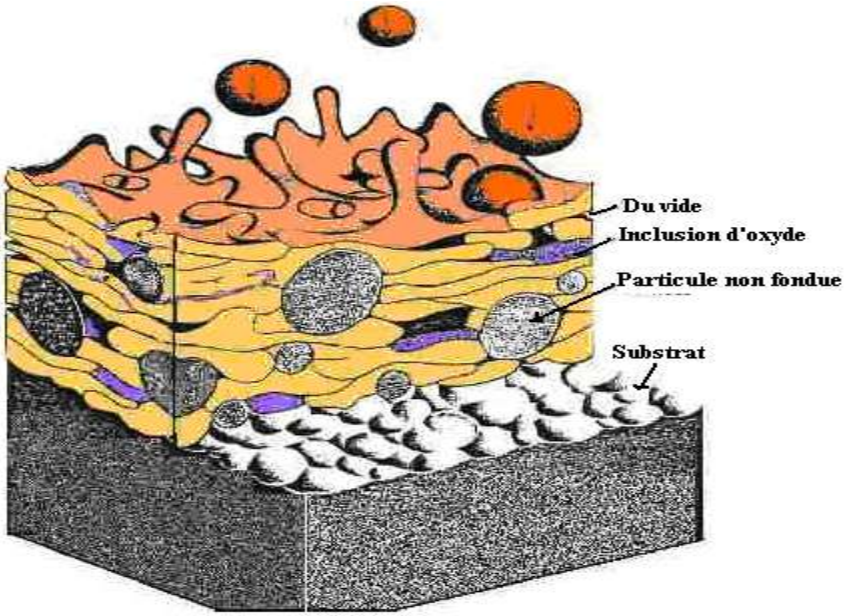


Figure 1.9 : Illustration schématique de la coupe d'un dépôt en croissance réalisé par projection thermique. [1]

CHAPITRE N° 02

Chapitre 2 :

2-1 L'adhésion et les sous-couches d'accrochages:

2.1.1 L'adhésion et L'adhérence :

2.1.1.1 Définition :

L adhésions et l'adhérence sont deux termes différents mais chaque un termine le rôle de l'autre L'adhésion en général est définie comme un état ou deux surfaces sont maintenue ensemble par une force et des liaisons physique ou chimique et parfois des liaisons physico-chimique ensemble, l'énergie d'adhésions a une origine thermodynamique.

Par contre l'adhérence : c'est la résistance mécanique a la décohésion de l'interface, elle est dû au mécanisme de l'adhésion c'est à dire la force d'adhésion qui assemblé les deux surfaces lors d'un essai mécanique pour séparer les deux interfaces. Donc selon les définitions l'énergie d'adhérence doit être toujours supérieure à celle d'adhésion pour faire séparer les deux surfaces. **[2]**

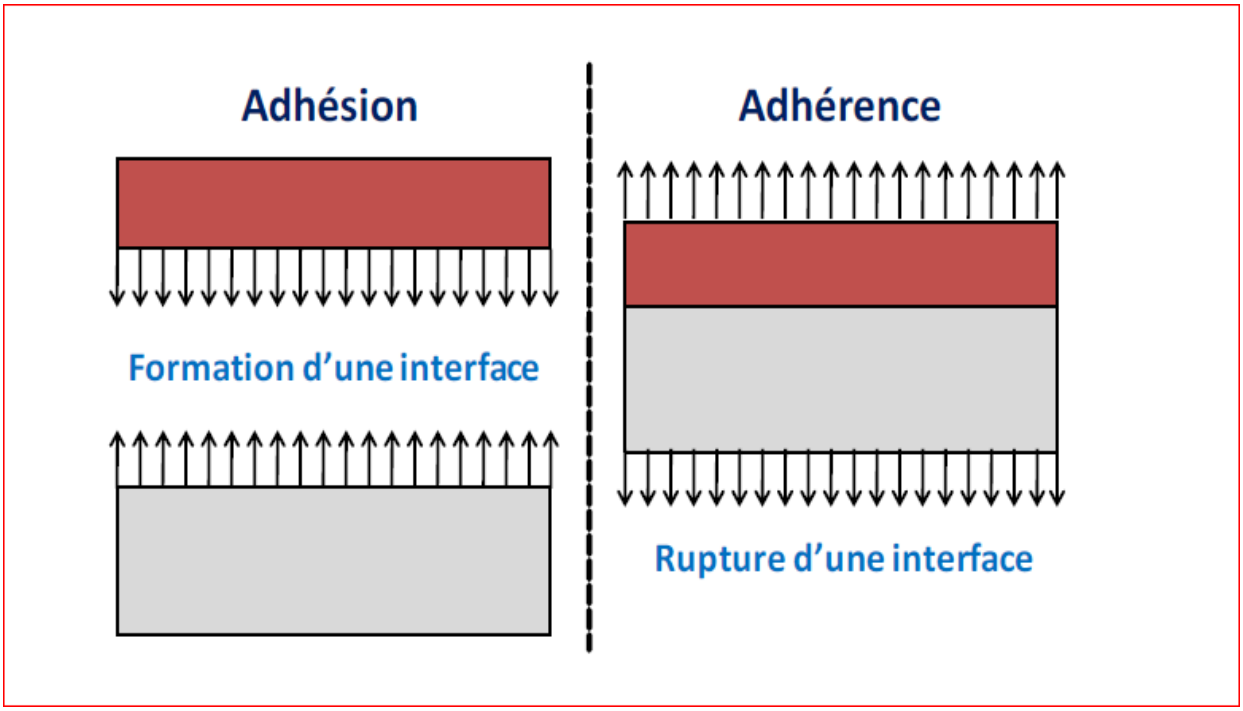


Figure 2.1 : différence entre l'adhésion et l'adhérence. [10]

2.1.1.2 Mécanisme d'adhérence :

Les différents types de liaisons formée de nature interatomique sur l'interface est favorisent une adhérence des revêtements. Les forces d'attraction sont applicable juste sur une distance très proche entre les deux surfaces pour avoir un phénomène d'adhérence efficace est fiable. L'impact des particules sur le substrat ou bien l'étalement crée un mouillage qui un rôle très importants sur la qualité du revêtement ils du a des paramètres essentiels tel que la vitesse des particules, et l'angle de contact Avec des adhérences physique et chimique qu'elle se présente sur deux types à l'échelle microscopique : l'ancrage mécanique et la diffusion. **[10]**

2.1.1.3 Les théories d'adhésion :

2.1.1.3.1 Les liaisons interatomiques :

A- Adhérence chimique : c'est le résultat de la réaction chimique entre les particules projetées et le substrat mis en œuvre, ces réactions vont créer des nouvel composes différentes a ceux des matériaux primaire. Les liaisons métallique sont formées d'électrons délocalise pour former un nuage d'électrons autour des ions métallique positif sont cite comme suite :

A.1 Les liaisons covalentes : est la distribution des électrons périphériques

A.2 Les liaisons ioniques : c'est le résultat de l'association des électrons positifs et les électrons négatifs non orientée car le champ d'attraction des ions à une symétrie sphérique. De nombreuses liaisons, notamment celle des oxydes, sont intermédiaires entre les liens ioniques et covalents. Ils sont dits ion-covalents. Pour les céramiques, ces liaisons mixtes sont décrites par des taux d'iconicité. L'alumine Al2O3 est ainsi considérée comme ionique à 63 %, ce type de liaison correspond à une énergie de 600 à 1000 kJ.mole1(10).**[10]**

B- Adhérences physique : Par rapport à la liaison chimique liaisons physique présente une faible adhérence mais avec une longue portée, sont appelées les liaisons de van der waals, présenté généralement dans les oxydes.**[10]**

C- La diffusion : quelque matériaux ont le caractère de diffuser plus ou moins facile, il aura une nouvelle interphase avec une transition des propriétés mécanique et métallurgique. La diffusion définie par la formation d'une nouvelle zone de transition caractérisée par le changement cristallographique de la structure formée. La diffusion nécessite une énergie suffisante sous forme d'une chaleur, l'inter-diffusion, remplacée par la zone de transition des phases intermédiaire. Donc L'adhésion résulte de l'inter-diffusion des molécules de chacun des matériaux comme ce tableau représente les forces de liaisons : **[12]**

Tableau 2.1 : Energie associée aux liaisons secondaires et aux liaisons primaires.[13]

Type de liaison		Energie associée (kJ/mol)	Portée (nm)
Liaisons secondaires	Liaisons de Van der Waals	2 - 15	≤ 1
	Liaisons hydrogènes	10 - 40	0,2
Liaisons primaires	Covalente	150 - 950	0,1 - 0,2
	Ionique	400 - 800	0,2 - 0,3
	Métallique	100 - 400	0,3 - 0,5

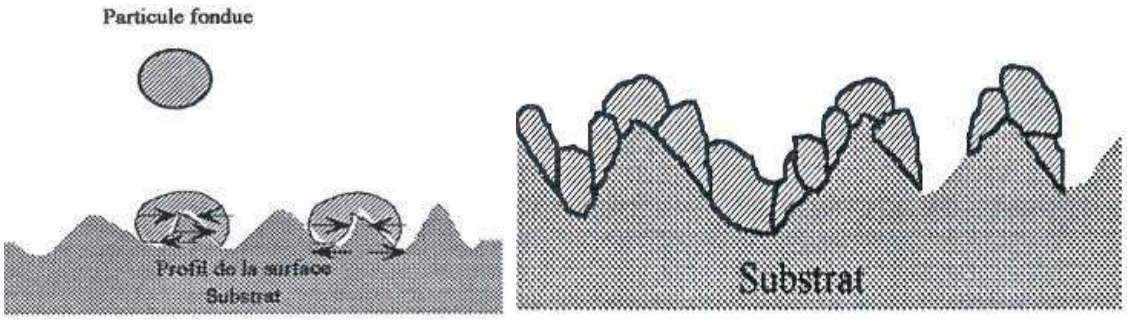
2.1.1.4 L'adhésion du revêtement par projection :

Dans le cas de la projection thermique, notamment pour la réalisation, les liaisons mises en jeu interviennent généralement entre un métal, et une céramique sont comme suit : **[13]**

- La liaison mécanique
- La liaison physique
- La liaison chimique

2.1.1.5 L'ancrage mécanique :

L'ancrage mécanique n'est pas un mécanisme d'adhésion à l'échelle moléculaire, la rugosité est un paramètre essentiel pour déterminer l'ancrage mécanique, c'est à dire la pénétration des aspérité dans un emboitement des deux matériaux, ce phénomène est permet de le développement de l'adhérence, L'adhérence par ancrage mécanique peut résulter plus précisément de l'accroissement de l'énergie mécanique il est due au retressicement des particules pendant le refroidissement **(voire fig.2)** la concentration est encore attachée à la rugosité du surface qui augmente l'aire du contacte qui forme des liaisons nouvelles à chaque contacte résulte une liaison mécanique.**[14]**



(a) (b)

Figure 2.2 : L'adhésion mécanique sur un substrat.[15]

2.1.1.6 Une liaison physique :

Peut résulter de forces de Van der Waals avec des phénomènes d'adsorption physique. Ce type de liaison entre en jeu lorsque plusieurs atomes se lient sans réaction chimique. Cependant les interactions de Van der Waals sont trop faibles pour expliquer à elles seules l'adhérence d'une particule sur un substrat. La mouillabilité entre les matériaux et l'énergie de surface (tension superficielle) peuvent également intervenir.(pour les revêtement appliqué par projection thermique). **[14]**

2.1.1.7 Une liaison chimique :

C'est conditionné par la faisabilité thermodynamique d'une réaction à l'interface, ainsi pour le couple particules/substrat la formation d'un oxyde mixte à l'interface particules/substrat. Cependant, pour qu'une telle réaction se produise il est nécessaire que la variation d'enthalpie libre associée à la réaction soit négative. Pour les matériaux généralement utilisés pour les barrières thermiques. **[14]**

2.2 Le mouillage :

L'étalement des particules fondue et projetées sur le substrat à revêtir, alors pour avoir un bon mouillage il faut avoir un bon étalement, il est caractérisé par la forme géométrique des particules l'angle du contact, la vitesse de projection température et le temps, et même aussi a la tension superficielles du substrat et les particules. **[16]**



Figure 2.3 : Goutte de liquide sur une surface lisse - Définition de l'angle de mouillage. [15]

Le mouillage total est accordé par un ange de contacte =0°,

0 <O°>45 : bon mouillage

45< O°>090 : mouillage moyen

90< O°>180 : mauvais mouillage

L'énergie d'adhérence du mouillage est donnée par la formule suivante : Wadh= γl (1+cosO).

Γ : l'énergie libre de la surface de liquide

2.2.1 Paramètre influencent le mouillage :

2.2.1.1 La température :

La température influence la mouillabilité en modifiant les paramètres physiques du substrat et du liquide projeté qui diminue la tension superficielle de liquide lorsque la température augment et donne un très bon mouillage.**[16]**

2.2.1.2 Le temps :

A l'équilibre, le système liquide-solide présente un angle de contact et une tension de surface qui ne doit pas évoluer. Pour atteindre cet état d'équilibre, un délai entre quelques dizaines de secondes à quelques minutes peut être envisagé dans le cas d'un système non réactif. **[16]**

2.3 Impact, étalement et solidification des particules sur le substrat :

2.3.1 L'étalement :

L'étalement des particules est un phénomène complexe notamment quand la solidification de lamelles commence avant l'étalement complet. Les phénomènes intervenant dans cette étape est liée par plusieurs facteurs qui peuvent être classes en deux groupes : les propriétés des particules a l'impact diamètre, la morphologie, la vitesse, la température, l'état physico-chimique. Et l'état de la Surface du substrat où les particules sont déjà étalées (la rugosité, la température, les propriétés thermiques. **[17]**

2.3.2 Impact :

Lorsque l'impact de la particule sur le substrat elle peut rebondi ou s étalé selon la vitesse de l'impact et la tension superficielle du substrat. Pour cela ont déterminé 15un critère K reliant le comportement de la particule à l'impact aux nombres de Reynolds et de Weber est définie par la relation suivante :

$K=We^{0.5}.Re^{0.5}$ ouWe :le nombre de Webber et Re le nombre de Reynold avec

We= ρvd /σ , et Re=ρvd/μ dont : ρest la masse volumique de la particule en($kg.m^{-3}$)

Et ν sa vitesse ($m.s^{-1}$), d son diamètre (m), σ ; la tension de surface liquide vapeur du matériau ($J.m^{-3}$), et μ sa viscosité ($kg.m^{-1}.s^{-1}$).**[17]**

Si K est inférieur à 3 il y a rebond de la particule, si K est compris entre 3 et 57,7 il y a Étalement sans éjection de matière et pour K supérieur à 57,7 il y a « splashing »

la figure suivante montre la différence :

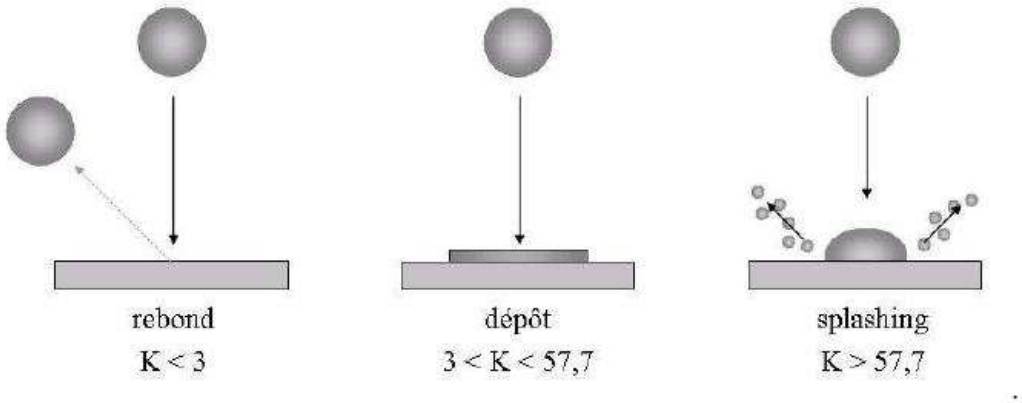


Figure 2.4: Modes impact

Formation of solid splats during thermal spray deposition. [17]

2.3.3 Solidification :

La solidification des lamelles (une étape de l'ordre de quelques microsecondes) dépend du flux de chaleur des particules vers le substrat. Ce dernier est lié au contact ou à la résistance de contact entre la lamelle et le substrat. Il dépend également des propriétés thermiques du substrat et de la particule étalée. Le contact effectif lamelle substrat varie avec la quantité des condensats et adsorbats à la surface, la porosité et la rugosité de la surface. Le refroidissement rapide de lamelle étalée favorise la nucléation hétérogène.**[17]**

2.4 Etat physico-chimique de substrat :

2.4.1 La rugosité :

Pour obtenir une bonne adhérence. 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, provoqué par l'attaque intensif de projectiles dans le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage, meulage, sablage. Dans les deux cas, le résultat a pour effet : d'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le futur revêtement, car l'adhérence est directement liée à l'étendue de la surface. De créer un maximum d'aspérités, où le matériau déposé viendra s'ancrer. **[18]**

2.4.2 Le préchauffage :

Pour quoi on préchauffe (l'intérêt du préchauffage) :

Des substrats métalliques sous atmosphère ambiante peuvent provoquer l'oxydation de leur surface. La présence d'oxydes peut modifier les propriétés thermiques, la structure cristalline et la rugosité de sa surface. Les caractéristiques de la couche d'oxyde sont liées à la nature du substrat, à son environnement, ainsi qu'à la vitesse, à la température et au temps de préchauffage.**[19]**

Le préchauffage des substrats a effets de :

Le meilleur étalement des particules, vu précédemment ;

La meilleure accroche des particules sur les aspérités des substrats ; (remplir les vallées, un bon mouillage).La formation d'oxydes de surface qui est souvent considérée comme indésirable, car, lorsqu'ils sont fragiles, ils nuisent gravement à l'adhérence des dépôts.**[19]**

2.4.3 Oxydation du substrat métallique :

L'oxydation toujours a un effet négatif sur l'adhérence du revêtement , par contre en revanche une certaine oxydation des substrats métalliques était parfois favorable à la bonne accroche des revêtements céramiques La première explication était aléatoirement prouvée et expliquée jusqu'à une étude sur le revêtement de l'acier XC38,**[20]** En effet, deux hypothèses étaient alors avancées : L'oxydation créait une rugosité de surface, qui favorisait l'ancrage mécanique La surface sur laquelle arrivaient les splats changeait de nature : de métallique elle devenait céramique, ce qui rendait possible une réaction entre phases céramiques, et donc une continuité chimique à l'interface céramique substrat/céramique projetée. En fait, le seul cas où le revêtement se révèle plus solide en utilisant la technique de peroxydation du substrat est celui où la liaison substrat-oxyde est très forte, au point de supporter les cycles thermiques. Ceci n'a été observé que lorsque l'oxyde formé par peroxydation croît par épitaxie sur le substrat métallique. **[20]**

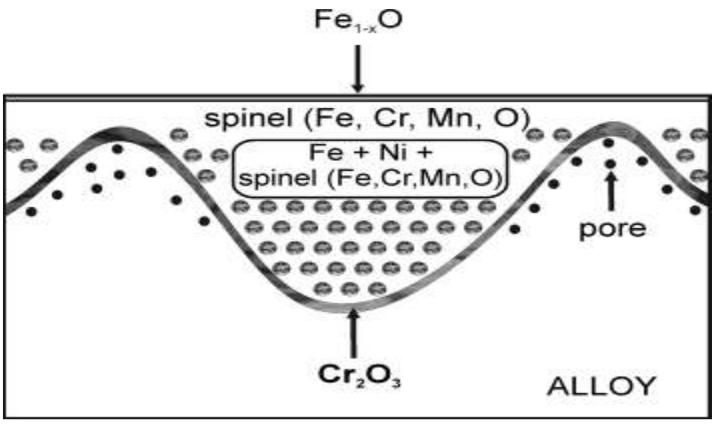


Figure 2.5 : représente la surface oxydée. [21]

2.4.4 Température de transition :

Comme dans le paragraphe précédent on a constaté que la température joue un rôle très important pour l'étalement, mais selon différent température des particules la forme de l'impact change d'une forme des lamelles à une forme cylindrique. **[22]**

La température ou passe le changement morphologique des particules s'appelle la température de transition elle caractérise le couple particule/substrat, beaucoup d'explication accompagnée cette définition avec l'amélioration de la mouillabilité du substrat selon la nature du liquide et la désorption et évaporation des adsorbats et condensats. **[22]**

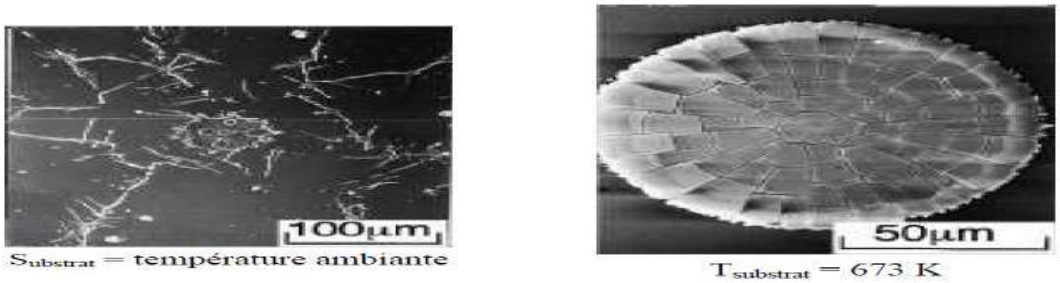


Figure 2.6 : Morphologie d'un splat en fonction de la température du substrat.[17]

2.5 Etat physico-chimique des particules :

La poudre de métal est souvent un élément fragile, que ce soit d'un point de vue morphologique que chimique. Sa plus grande surface spécifique facilite les transformations chimiques par rapport à un matériau massif. Les propriétés des poudres risquent d'être modifiées et altérées lors du transport et de la conservation du fait d'une mise au contact de l'air et de divers polluants, de chocs et de vibrations. Tout cela peut

conduire à de l'adsorption de gaz ou d'humidité sur les particules, leur érosion, d'une ségrégation des constituants, de l'agglomération ou dés agglomération des particules, Les poudres métalliques s'oxydent à l'air ambiant à une vitesse plus ou moins rapide et la teneur en oxygène d'une particule dépendra de sa nature mais aussi de sa taille. D'autre part, on sait que la modification des énergies de, et la rugosité des poudres altèrent la coulabilité des particules dans le réservoir de poudre. Or les films d'oxydes formés sur les particules modifient ces deux paramètres et peuvent donc potentiellement aboutir aux mêmes conséquences. Il a ainsi été démontré que la présence d'un film d'oxyde naturellement formé à la surface d'une particule métallique diminuait le frottement entre les particules. Des essais de compression dynamique sur des poudres comprimées par pression plasma (plasma pressure compaction. Les essais dynamiques réalisés sont de type barres de Hopkinson et les vitesses de déformations sont comprises entre 10^2 et 104 s-1, soient des taux équivalents à ceux rencontrés aux interfaces des splats lors d'une projection cold spray. Dans l'étude, les nanoparticules, plus oxydées que les particules microniques, voient leur ductilité augmenter. Selon les auteurs, ce résultat serait plus dû à la diminution de la taille des grains qu'à l'oxydation.**[23]**

2.5.1 Vitesse de particules :

La vitesse d'une particule, projetée à l'aide d'un procédé de projection thermique, dépend principalement de la taille de la particule, de sa densité et la distance de projection, comme le montre la figure pour des poudres d'alumine.**[24]**

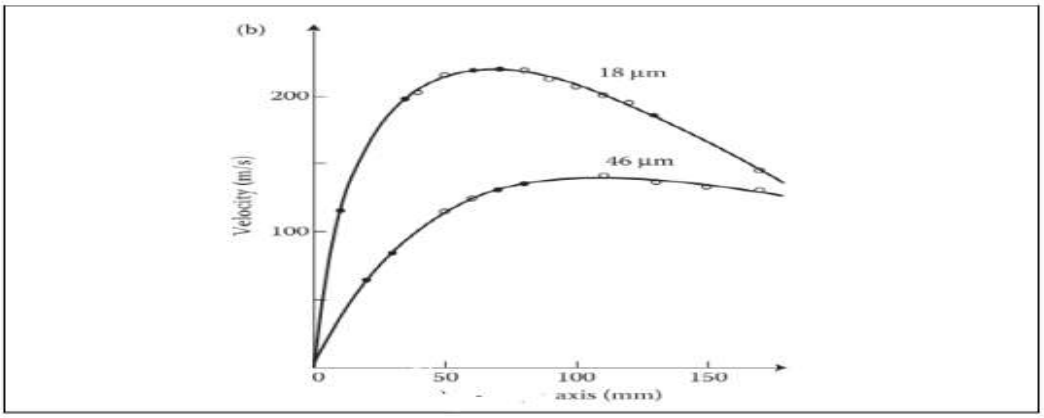


Figure 2.7 : Effet de la taille de particule (18 µm et 46 µm) sur l'évaluation de la vitesse d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma.. [24]

2.5.2 Température de particules :

Comme dans le cas de la vitesse, la taille des particules et la distance de projection ont un impact sur la température des particules pendant la projection thermique pour des poudres métallique (figure 1.). Selon cette figure, les particules qui sont plus petites (18 µm) deviennent plus chaudes que les plus grosses particules (46 µm) pour les courtes distances de projection entre (50 et 80 mm). Par contre, lorsque les particules parcourent des distances plus grandes, la température des petites particules tend à diminuer plus rapidement que celles de plus grosses particules à cause de la plus grande friction de l'air (les petites particules ont plus de surface pour une masse thermique donnée). **[24]**

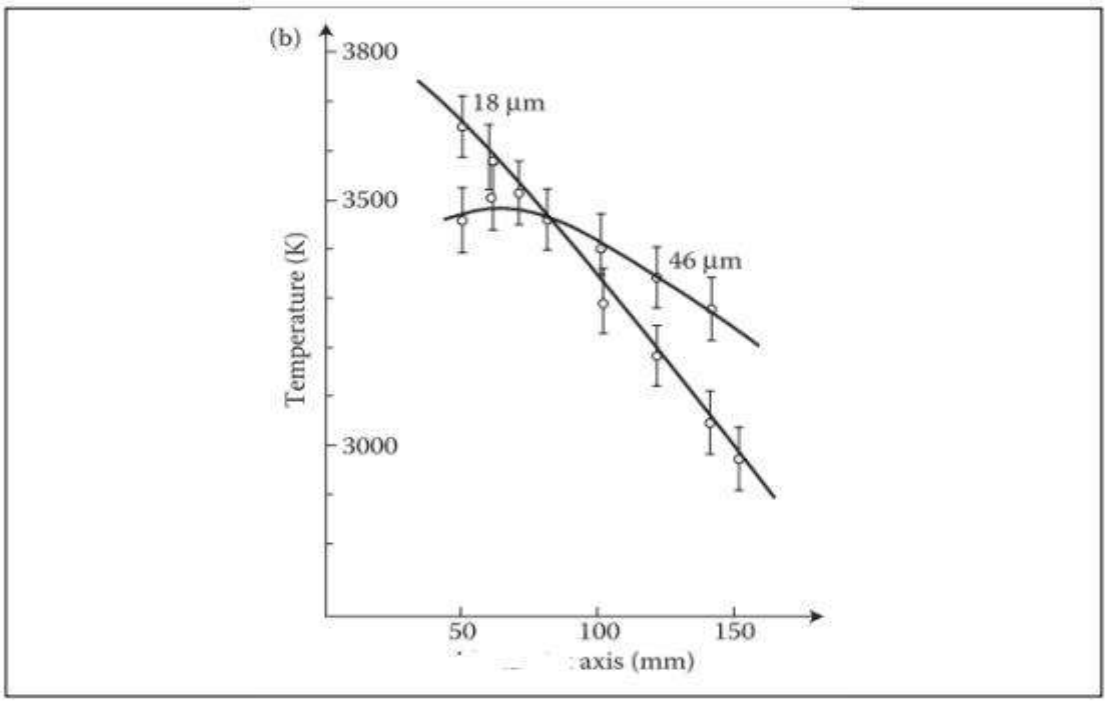


Figure 2.8 : Effet de la température des particules (18 µm et 46 µm) sur l'évaluation de la température d'une particule en fonction de la distance de projection d'une poudre d'alumine obtenue avec la projection au plasma. [24]

Comme se trouve en dessus dans le diagramme la température des particules influe la porosité ainsi que la dureté des revêtements de produits Dans ces travaux, le système de projection qui a été utilisé pour leurs résultats est la poudre employée a été de type WC-CoCr avec une taille de particules de 11 + 45 µm. Il a été constaté que le pourcentage de porosité diminue lorsque la température des particules augmente.

2.6 L'Adhésion céramique/métal :

L'adhérence de la céramique sur le métal est le facteur le plus important de la liaison céramo-métallique. En règle générale, cette adhésion est le résultat d'une chémisorption par diffusion entre les oxydes sur la surface de l'alliage et dans la céramique. Ces oxydes sont formés au moment du mouillage de l'alliage par la céramique et lors du frittage de la céramique. Les échecs d'origine mécanique les plus fréquents sont liés à cette rupture de la liaison céramo-métallique.

Plusieurs facteurs contrôlent l'adhésion métal-céramique :

• la formation d'une liaison chimique forte

• l'interpénétration mécanique des deux matériaux

• les contraintes résiduelles,

• l'absence de vides ou défauts de mouillage de la céramique sur le métal.

2.6.1 Les sous-couches d'accrochage :

En projection thermique les revêtements sont utilisés dans le but de protection du substrat.

Un revêtement sur substrat ne vaut rien s'il n'adhère pas, alors il peut se décoller facilement lors du service. L'utilisation d'une sous couche intermédiaire entre le substrat et le revêtement pour assure une bonne adhésion. Généralement le problème d'adhésion se manifeste dans le couple céramique/métal. Alor la recherche d'une sous couche d'accrochage est nécessaire.

Ce système est largement utilise dans la haute température comme les moteurs a combustion, les navettes aérospatiale, les turboréacteurs…etc. **[25]**

2.6.2 Les sous-couches de liaison utilisées :

La couche de liaison augmente l'adhésion entre le substrat métallique et le revêtement en céramique. Comme montre la figure.

La sous couche la plus utilisé est Ni-Al elle présente un équilibre thermique une résistance au fluage élevée et donne une durabilité importante au revêtement. Le revêtement formant de l'alumine peut être utilisé comme une sous couche d'accrochage lors de température de l'oxydation est très élevée. **[26]**

La formation de couche d'alumine pendant la revêtement est très important sur la qualité du revêtement car elle présente une haute résistance a l'oxydation et de même l'alumine a une stabilité thermodynamique importante.

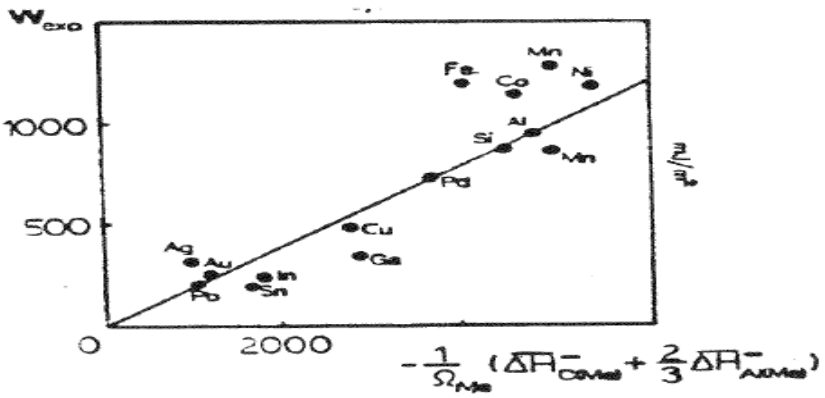


Figure 2. 9 : Valeurs expérimentales du travail d'adhesion Wexp de différents métaux purs sur l'alumine en fonction de valeurs correspondantes du facteur thermodynamique [26].

La sous couche Ni-Al a un point de fusion très élevé environ 1639°, et son module de Young très élevé, bonne résistance à l'oxydation et une conductivité thermique élevée dans le super alliage à base de nickel, même sa résistance à la corrosion. Généralement ce type de couche de liaison sont appelés MCrAIY ou M=Ni ou Co ou Fe. La formation de Al_2O_3 par le pré oxydation donne une compatibilité chimique au plusieurs milieu d'activité. Les aluminures de Nickel formé à des températures de fusion différente comme monté dans le tableau suivant :

Tableau 2-2 : Les différentes températures de fusion des aluminures de nickel.

Intermétallique	point de fusion (°C)
NiAl	1639
Ni_3Al	1395
NiAl3	854
Ni_2Al_3	1133

C'est le dépôt en acier inoxydable réalisé avec sous couche qui est le plus résistant à l'usure abrasif car il représente le taux d'usure le plus faible obtenu pour les deux vitesses de

glissement. S'expliquer par la présence de la sous couche d'accrochage en NiAl qui améliore les caractéristiques tribologique de l'acier.

Quelque autres résultats obtenue sur l'influence de la sous couche d accrochage :

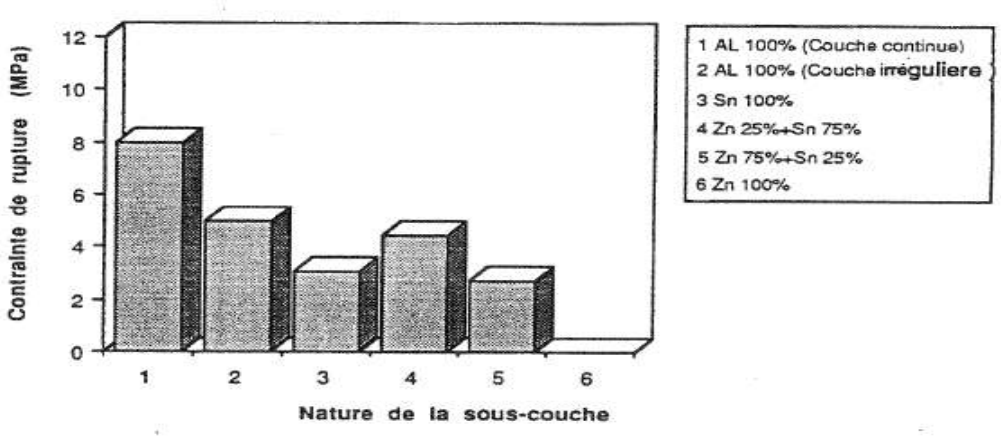


Figure2. 10 : Contrainte de rupture d'un dépôt de zircone projeté sur XC38

Durée de vie d'un revêtement du zircon sur différentes sous couches d'accrochage

les sous-couches d'accrochage influent directement sur la qualité d'adhérence du revêtement et la qualité de revêtement varie selon la nature de la sous couche d'accrochage qui augmente la qualité d'adhérence et la durée de vie des revêtements s'applique.[27]

CHAPITRE N° 03

3. Expérimental et matériaux :

Dance ce chapitre on va realiser un revetement par projection thermique(flamme poudre. Voir CH1) on utilise des poudres metallique et une poudre en ceramique pour le realiser, puis on va tester la valeur d adherence du revetement obteune et donne une conclusion generale sur les resultats obtenu.

3.1 Les appareils et les matériaux utilises :

3.1.1 Tamiseuse :

Dans le but d'avoir des informations sur la distribution granulométrique des poudres produites. La machine utilisée un tamiseur de marque RETSCH, est utilisée pour séparer les déférentes granulométries des poudre. La machine est constituée de tamis qui sont superposés par ordre décroissant de la taille (150µm jusqu'à une taille inférieure à 20µm). L'opération est de mettre la poudre dans le tamis 150µm, des mailles du plus haut au plus bas de la colonne. Les tamis sont séparés par des joints en caoutchouc assurant l'étanchéité. L'opération de tamisage consiste à verser la poudre dans le tamis situé en haut de la colonne dont la pile de tamis est serrée par des boulons. Une fois que tout est mis en place, l'opération de tamisage est lancée en sélectionnant le mode de vibration, son amplitude et son temps de tamisage.



Figure 3.1 : Un tamiseur.

3.1.2 La balance :

Pour peser le poids des poudres utilisées



Figure 3.2 : Une balance.

3.1.3Le décapage et polissage :

Le polissage permet d'éliminer les contaminations de surface et de créer une rugosité pour améliorer l'accrochage on le fait par une meule.



Figure 3.3 : Une meule.

3.1.4Pistolet flamme-poudre ROTOTEC 80 :

Pour projeter la sous couche d'accrochage en métal et la céramique.

3.1.4.1 Principe de fonctionnement :

Pistolet de projection thermique oxyacétylénique il a le même principe avec **CastoDyn DS 8000**

3.1.4.2 Donnée techniques :

Taux de dépôt : 3-6 kg/h

Débit d'oxygène : 800 l/h.

Pression d'oxygène : 4,0 bar

Pression d'acétylène : 0.7 bar



Figure 3.4 : ROTOTEC 80.

3.1.5 Microscope optique :

Le but d'avoir des informations sur la forme et la taille des particules de poudre. Le microscope métallographique de type ZEISS permet l'observation des échantillons, avec un grandissement qui varie de 100 à 1000. Ce microscope s'accompagne d'une caméra SONY. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.



Figure 3.5 : Un microscope métallographique ZEISS.

3.1.6 Posi-test :

Pour mesurer l'adhérence des poudres projeter sur le substrat.

3.1.6.1 Précision :

- Chaque mesureur d'adhésion Posi-Test est étalonné et certifié à ± 1% d'incertitude en utilisant une cellule de charge traçable par le NIST
- Le propre alignement du chariot permet des mesures précises sur des surfaces lisses ou irrégulières

- Capteur de pression industriel, de haute qualité, garantissant une précision constante
- Conforme aux normes ASTM D4541/D7234, ISO 4624, SSPC-CS 23.00/AWS C2.23/NACE No. 12 et autres

3.1.6.2 Caractéristiques :

- Plage de force d'arrachement : 0 - 20 MPa (0 - 3000 PSI)
- Plots en aluminium de diamètre 20 mm (10, 14 et 50 mm en option),
- Large afficheur LCD,
- Réglage du taux d'arrachement (MPa/s ou PSI/s),
- Sélection par simple bouton de la taille du plot et de l'unité de mesure, et
- Mémoire pour 200 essais : taux et force maximale d'arrachement.



Figure 3.6 : Posi_test

3.2.4 Colle :

On doit fixer un chariot sur le revêtement par une colle forte et on la laisse a collé plus 12h.



Figure 3.7 : Colle pour test d'adhésion

3.2 Matériaux utilises :

3.2.1 Les poudres utilisées :

3.2.1.1Préparation de la poudre :

Granulométrie utilisé pour les deux poudres : est comme suit poudres mtalliue (Ni Al Mo et Ni Al Cr Si)32>d>53 ,53>d>75, 75>d>150 Telle que reçu. Et la poudre en ceramique .

3.2.1.2 Les résultats après le tamisage :

La détermination de la taille des particules a projetée Ni Al Mo et Ni Al Cr Si on remarquer que chaque poudre a une masse initiale m_0 (Ni Al Mo)=0.2211g et m_0 (Ni Al Cr Si)=0.0203 et une masse maximale M_F (Ni Al Mo)=49.0416g et M_F (Ni Al Cr Si)=52,3371g.

Apres la distribution granulométrique les résultats sont présentés dans un tableau et sous forme d'un histogramme pour donner une meilleure remarque sur la distribution granulométrique des poudres utilisées dans la projection thermique :

Tableau 3.1 Représente la distribution granulométrique des poudres (Ni Al Mo et Ni Al Cr Si) :

D (µm)	NiAlMo (g)	NiAlCrSi (g)
>150	0,2211	0,0203
>125	29,3802	26,4954
>106	39,6249	44,8453
>90	43,9123	46,7222
>75	49,0416	52,3371
>63	39,0814	36,1677
>53	33,1949	26,1677
>38	47,0349	43,3439
>32	9,5623	13,0147
>20	7,6472	8,3192
<20	0,593	1,0887

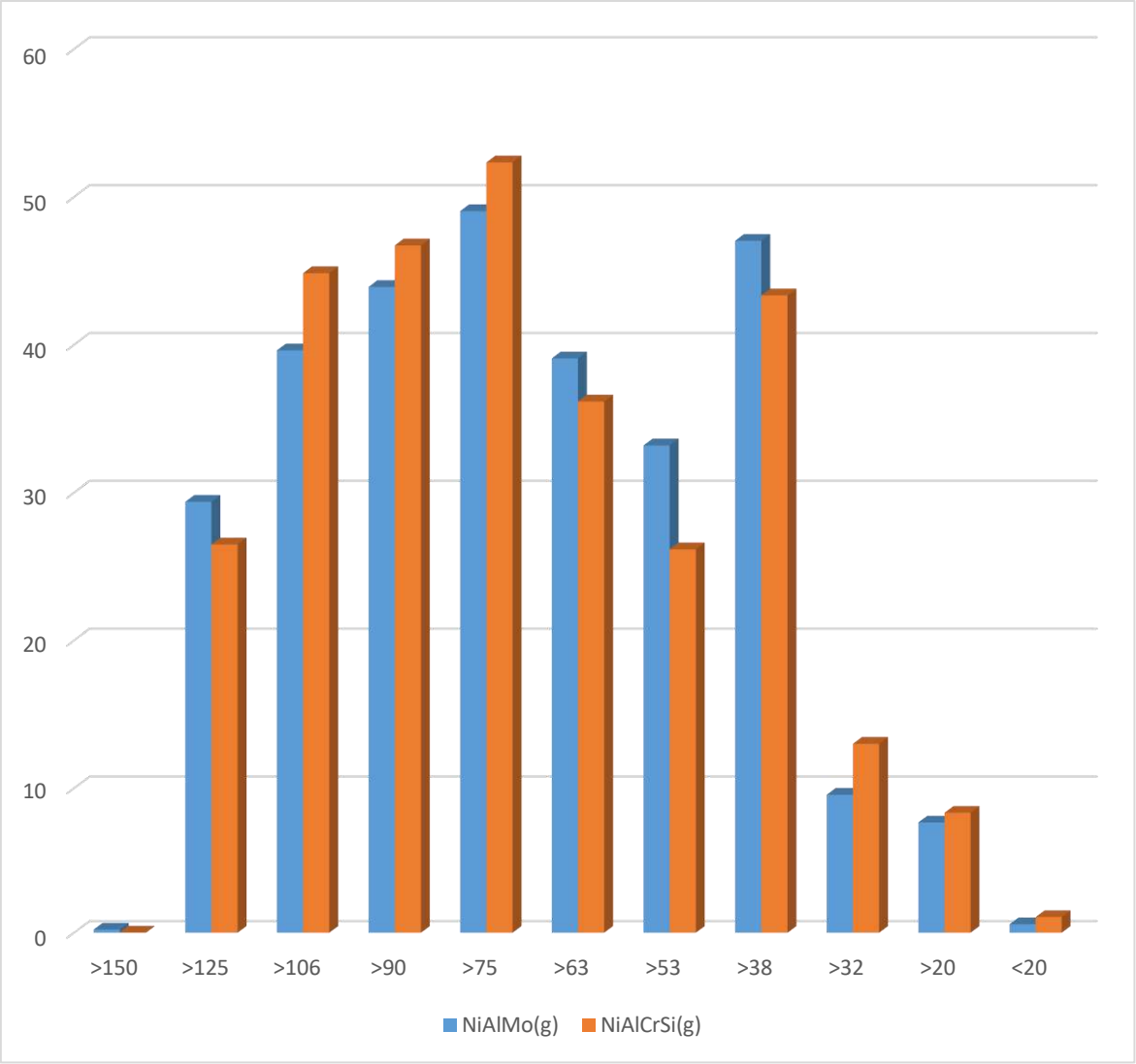


Figure 3.8 : Histogramme représente la distribution granulométrique des poudres (Ni Al Mo et Ni Al Cr Si).

3.2.1.3 analyses des résultats obtenus :

Pour la poudre **Ni Al Mo** : la masse dominante est dans le tamis >75 = 49.0416 g et tend vers le zéro dans les tamis > 150$_{\mu}$m et < 20$_{\mu}$m on peut déduire que la taille granulométrique de la poudre et comprise entre >125 et >38 $_{\mu}$m d'une valeur importante, et d'une quantité moins que ça dans les tamis >32 et >20$_{u}$m Pour la poudre Ni Al Cr Si la masse dominante est dans le tamis >75=52,3371get tend vers le zéro dans les tamis > 150 et <20$_{\mu}$m on peut déduire que la taille granulométrique de la poudre et comprise entre >125 et >38 $_{\mu}$m d'une valeur importante, et d'une quantité moins que ça dans les tamis >32 et >20$_{\mu}$m.

La poudre de revêtement Céramique : 97% oxyde de chrome 3% oxyde de titane.

3.2.2 Substrat utilisées :

On utilise un Acier ordinaire**.**



Figure 3.9 : Substrat avant et après meulage.

3.3 Expérience :

3.3.1 Application :

On applique des dépôts sur 8 substrats de même nature (acier ordinaire) Le dépôts est composé d'une sous couche d'accrochage (4 passes de projection) et une couche de céramique (avec 3 passes de projection).



Figure 3.10 : Image représente le revêtement obtenu par projection thermique

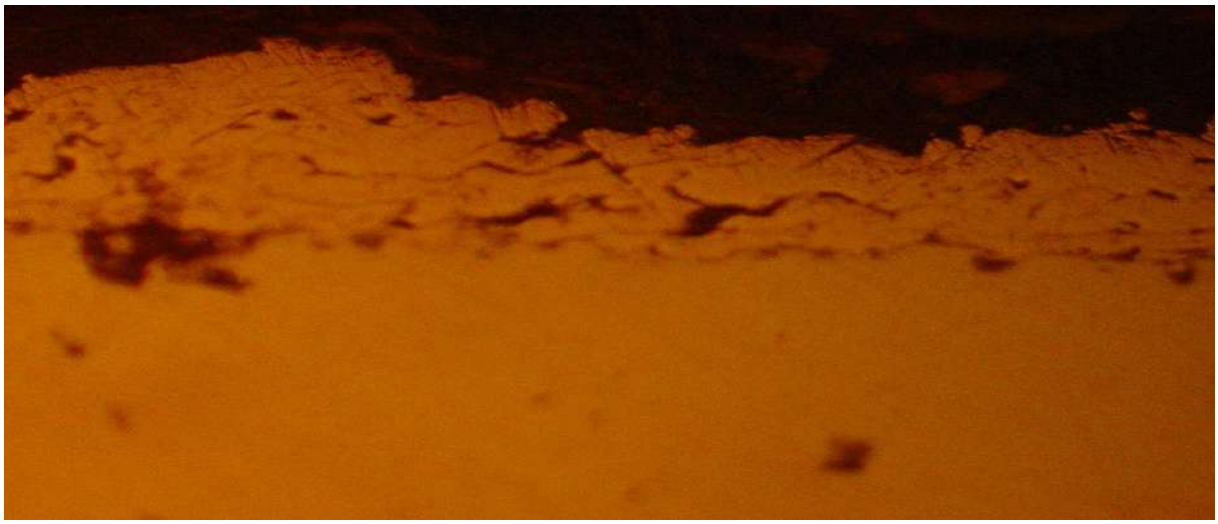


Figure 3.11 : Résultat de la métallographie (images prisent par un microscope optique).



Figure 3.12 : Chariot fixé sur le revêtement par une colle.

3.3.2 L'essai d'adhérence :

Le Contrôleur d'adhésion Posi-Test détermine l'adhérence de revêtement sur son support. Cette méthode destructrice de test d'adhésion fonctionne grâce à un petit chariot métallique collé sur le revêtement qui est ensuite tiré verticalement par la pompe hydraulique du contrôleur. Le mécanisme de traction du contrôleur d'adhésion Posi Test est auto-aligné afin de s'assurer que le chariot soit tiré parfaitement vertical dans toutes les circonstances et fournissant ainsi des mesures fiables et reproductibles. Ceci évite que le chariot égratigne le matériau et donc entraîne des erreurs de mesure. La norme du test d'adhésion notifie le taux

de traction maximal, une traction trop rapide entraîne des mesures incorrectes. Le contrôleur d'adhésion est équipé d'un indicateur du taux de traction pour éviter à l'utilisateur de tirer trop vite sur le revêtement du matériau. La pression est indiquée en MPa et PSI sur un indicateur de précision.

3.3.3 Résultats et discussion :

Les revêtements par projection sont utilisé dans différents domaines pour donne une performance et durabilité importante (voir chapitre 01).Notre expérience consiste a réalisé un revêtement bicouche. C'est à dire la première couche représente une couche intermédiaire à base de Nickel Aluminium et une couche de revêtement de type céramique la projection se fait sur différent granulométrie des particules dès la sous couche intermédiaire et une granulométrie constante de la poudre en céramique.



Figure 3.13 : la projection des poudres métallique par projection thermique.

Deuxièmes : après que le chariot est bien fixé sur le revêtement on utilise notre appareil d'arrachement (POSI TEST) pour arracher le revêtement et enregistré les résultats obtenue du chaque échantillon qui a était déterminé dans le début de ce chapitre.



Figure 3.14 : Image du chariot arraché par Posi test.



Figure 3.15 : deux photos représentent l'arrachement du revêtement avec le chariot arraché.

On remarquer que l'arrachement dans l'échantillon (a) est parfait par contre l'arrachement dans l'échantillon(b) est mauvais .due à application du la colle sur le chariot et le revêtement

Donc les résultats seront moins précis pour les cas où le revêtement n'était pas bien arraché du substrat.



Figure 3.16 : représente les revêtement arraché.

3.25 Résultats d arrachement :

Les résultats d arrachement sont rédiger sous forme un tableau et un histogramme :

Tableau 3.2 représente la force d'adhérence du revêtement pour chaque granulométrie des poudre utilise (ni al mo, ni al cr si)

granulom	F(NiAlMo)	F(NiAlCrSi)
32>D>53	2,69	4,53
53>D>75	2,25	3,19
75>D>150	1,95	1,95
Telle que reçu	1,97	0,9

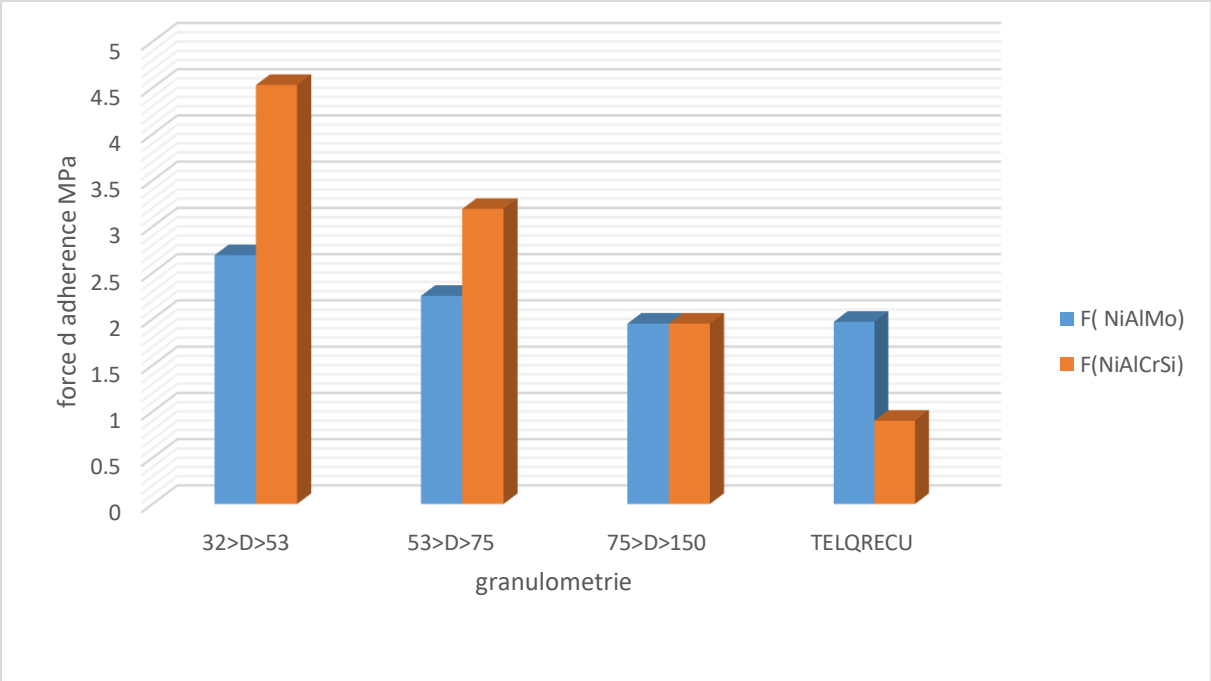


Figure 3.17 histogramme représente la force d'adhérence du revêtement pour chaque granulométrie des poudre utilise (ni al mo, ni al cr si).

3.3 DISCUTION DES RESULTATS :

A) Pour la première sous couche d'accrochage Ni Al Mo :

La granulométrie 32>d>53 présente une force d'adhérence = 2.69 MPa

La granulométrie 53>d>75 présente une force d'adhérence =2.25 MPa

La granulométrie 75>d>150 présente une force d'adhérence =1.95 MPa

La granulométrie telle que reçu présente une force d'adhérence =1.97 MPa

On remarque que la granulométrie plus fine a une force d'adhérence plus élevée.

B) pour la deuxième sous couche d'accrochage Ni Al Cr Si :

La granulométrie 32>d>53 présente une force d'adhérence = 4.53 MPa

La granulométrie 53>d>75 présente une force d'adhérence =3.19 MPa

La granulométrie 75>d>150 présente une force d'adhérence =1.95 MPa

La granulométrie telle que reçu présente une force d'adhérence =0.9 MPa

Conclusion général :

A travers ce travail, on a pu montrer que la projection thermique est d'une importance primordiale dans la réalisation des revêtements de très bonne qualité. Dans notre étude on est arrivé au résultat espéré ou la méthode d'utilisation des sous couches d'accrochage avec une granulométrie d'ordre décroissant et l'élément d'addition utilisé présente une qualité d'adhérence très forte, Donc le revêtement en céramique réalisé par une granulométrie très fine présente une qualité d'adhérence très développé. On remarque que la granulométrie plus fine a une force d'adhérence plus élevée. D'autre part dans les deux sous couches d'accrochage de même granulométrie on remarque que la sous couche NiAlCrSi présente une force d'adhérence plus forte que la sous couche d'accrochage NiAlMo (dans toute la granulométrie). Pour cela on déduire granulométrie des sous couche d'accrochage influe d'une façon désirable sur la qualité du revêtement et lorsque la granulométrie plus fine la qualité du revêtement plus acceptable. Et les éléments d'addition Chrome et Silicium (Cr Si) donnent un pouvoir d'adhérence supérieure plus forte que le Molybdène. (Mo).

Reference bibliographique

Reference :

[1] A. Prôner, Revêtements par projection thermique, technique de l'ingénieur, Vol. (MD3), 1645(1999), 1-20.

[2] S. Beauvais, Thèse doctorat : « Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés parprojection plasma », Ecole de Mines de Paris, 2003

[3] S. Audisio, M. Caillet, A. Galerie et H. Mazille, « Revêtements et Traitements de Surface », (ed.) Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1998.

[4] L. Pawloski, « The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings », (ed.) JohnWiley and Sons, Chichester, 1995.

[5] E.D. Kubel, Advance Materials and Processes, 132(1987), 69-75

[6] E. Pfender, Thermal Spray, Advances in Coatings Technology, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, (1992), 1-10

[7] P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs, J. Therm. Spray Technol. 10 (2001), 44.

[8] L. Pawloski, « The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings », (second ed.) JohnWiley and Sons, Chichester, 2008.

[9] S. Nourouzi, thèse doctorat : « Contribution à l'étude du procédé Arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive », Université de limoge.

[10]]. **S. Barradas,** « Etude, a l'aide du choc laser, des mécanismes d'adhérence aux interfaces cuivre / aluminium et cuivre / cuivre obtenues par projection thermique » Thèse de Doctorat (7 décembre 2004), Ecole des Mines de Paris

[11] Kinloch AJ Review – The science of adhesion – Part 1 Surface and interfacial aspects.Journal of Materials Science, 1980, 15, 2141-2166

[12] : **L. Pawlowski** «T Dépôts physiques: techniques, microstructures et propriétés HT_H presse polytechniques et universitaire romandes, 2003T .)

[13] Moita and A. L. N. Moreira (2002), «The dynamic behaviour of single droplets impacting onto flat surfaces», Instituto Superior Técnico – Dep. Mech. Eng, Lisbon, Portugal

[14] S. Barradas, « Etude, a l'aide du choc laser, des mécanismes d'adhérence aux interfaces cuivre / aluminium et cuivre / cuivre obtenues par projection thermique » Thèse de Doctorat (7 décembre 2004), Ecole des Mines de Paris.

[15] S. Chandra, P. Fauchais Formation of solid splats during thermal spray deposition.Journal of Thermal Spray Technology, 18 (2), 2009, pp. 148-180.

Reference bibliographique

[16] Syed Asif Ansar (Co-projection d‟alumine ET d‟acier inoxydable par plasma d‟arc, University of New York at Stony Brook, USA, 2004)

[17] Syed Asif Ansar Co-projection d‟alumine ET d‟acier inoxydable par plasma d‟arc, University of New York at Stony Brook, USA, 2004)

[18] D. Doyen, Méthodes numériques pour des problèmes dynamiques de contact et de fissuration. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France **(2010)**

[19] L. Bianchi, A.C. Leger, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, « Splat formation and cooling of plasma-sprayed zirconia»; Thin Solid Films 305 (1997) pp 35-47.

[20] J. PECH, « Pré-oxydation générée par jet de plasma d'arc soufflé. Relation entre surface, oxydation et adhérence de dépôts », Université de Rouen, 1999.)(J. PECH et B. HANNOYER, « Influence of oxide layer promoted by d.c. plasma preheating on the adhesion coating and role of the initial surface pretreatment », Surf. Interface Anal., vol. 30, no 1, p. 585-588, 2000.)

[21] S. VALETTE, G. TROLLIARD, A. DENOIRJEAN, et P. LEFORT "iron/wüstite/magnetite/alumina relationships in plasma coated steel: A TEM study », Solid State Ion., vol. 178, no 5-6, p. 429-437, 2007./ S. VALETTE, « Influence de la préoxydation d'un acier sur l'adhérence de son revêtement en alumine déposé par voie plasma thermique », Université de Limoges, 2004.

[21] Y. Tanaka, M. Fukumoto Investigation of dominating factors on flattening behavior of plasma sprayed ceramic particles.Surface and Coatings Technology, 120-121, 1999,

[23] Ko, K.H., J.O. Choi, H. Lee, et B.J. Lee. « Influence of oxide chemistry of feedstock on cold sprayed Cu coatings ». Powder Technology 218 (mars 2012)

[24] Kim, K. H, M. Watanabe, et S. Kuroda. « Bonding mechanisms of thermally softened metallic powder particles and substrates impacted at high velocity ». Surface and Coatings Technology 204, no . 14 (2010): 2175–2180]

[25] Yin, Shuo, Xiaofang Wang, Wenya Li, Hanlin Liao, et Hongen Jie. « Deformation behavior of the oxide film on the surface cold sprayed powder particle ». Applied Surface Science (juillet 2012).].

Reference bibliographique

[26] Gausseem SAIF « "mise au point et caracterisation de couches intermediere permettant l accrochage entre un alliage metllique et une ceramique projetéé. »université de Paris (décembre 1991).

[27] NF. KADIR, A.Manip2, M.satgunam3, Nurfanizian , Mohd Afandi (revue sur les proprietés de la couche de liaison a base d'aluminium et de nickel et de la performence d oxydation dans les application de revetement a barrière thermique (TBC).) institute of power ingineering(IPE), universiti Tenaga Nasional, 43000 Kajang, Selangor, Malaysia**.**