



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de

Master en génie mécanique

Option : ingénierie des matériaux et surfaces

Thème :

**Etude et fabrication de revêtement durs déposés par projection
thermique**

Proposé et dirigé par :

- **Mr : Pr. BACHA Nacer Eddine**

Réalisé par :

- **NAIT SIDI AHMED
Koceila**
- **MORSLI Mohamed Islam**

Dédicaces

A ma très chère mère au monde Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur...

mon père Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être .Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation....

A ma future femme

A mes frères et ma sœur...

Remerciement

Je tiens à remercier Monsieur le professeur Bacha Nacer E, qui a bien voulu diriger nos travail ,qu'il veuille trouver ici l'assurance de ma profonde gratitude pour son aide précieuse qu'il m'a apportée tout au long de ce travail.

Nous prions , Madame , Monsieur ,membre du jury d'accepter nos sentiments respectueux et nos gratitudes pour faire partie du jury.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements, nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin,ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Nous voudrions remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous nos enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre période d'études.

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cet humble travail ,un grand merci.

RESUME

Les revêtements obtenus par projection thermique sont utilisés afin de satisfaire des exigences industrielles de plus en plus sévères, dans des domaines d'application de plus en plus étendus.

Le plus souvent utilisés à l'origine comme barrières thermiques, les revêtements sont maintenant utilisés pour assurer des fonctionnalités de surface à des substrats de faible coût et/ou de faible poids volumique. En dehors de leur coût de mise en œuvre, de leur inapplicabilité aux surfaces de forme complexe, les revêtements voient leurs performances limitées lorsque le chargement mécanique en service est tel que des contraintes de cisaillement au voisinage de l'interface revêtement/substrat sont suffisantes pour produire des décohésions locales entre substrat et revêtement.

Dans notre étude, des revêtements de rechargement durs sont essayés pour résoudre un problème d'usure posé par une industrie locale. Le substrat à base d'acier inoxydable fait de tôle mince s'use rapidement. La tôle est sollicitée en usure abrasive et aux impacts de pierres et de terre.

La technique choisie pour résoudre ce problème est l'emploi de la torche SuperJet type S qui permet de déposer des revêtements durs de différentes compositions chimiques. Les essais de dureté et microdureté avec la microscopie optique ont été utilisés pour caractériser la microstructure et les propriétés mécaniques des revêtements durs.

Les résultats ont montré que les revêtements à base de NiCrBSiFeC + 60% WC-W₂C possèdent la meilleure tenue à l'usure érosive. Des essais complémentaires sont toutefois nécessaires pour optimiser les paramètres opératoires de cette poudre ainsi que celles à base de Ni + 5% BSiFe.

ABSTRACT

The coatings obtained by thermal spraying are used in order to satisfy increasingly severe industrial requirements, in increasingly wide fields of application. Most often originally used as thermal barriers, coatings are now used to provide surface functionality to low cost and / or low density substrates. Apart from their implementation cost, their inapplicability to surfaces of complex shape, coatings see their performance limited when the mechanical loading in service is such that shear stresses in the vicinity of the coating / substrate interface are sufficient for produce local decohesions between substrate and coating.

In our study, hardfacing coatings are tried to solve a wear problem posed by a local industry. The thin sheet stainless steel substrate wears out quickly. The sheet metal is subjected to abrasive wear and to stone and earth impacts.

The technique chosen to solve this problem is the use of the SuperJet S type torch which makes it possible to deposit hard coatings of different chemical compositions. Hardness and microhardness tests with optical microscopy have been used to characterize the microstructure and mechanical properties of hard coatings.

The results showed that coatings based on NiCrBSiFeC + 60% WC-W₂C have the best resistance to erosive wear. Additional tests are however necessary to optimize the operating parameters of this powder as well as those based on Ni + 5% BSiFe.

ملخص

يتم استخدام الطلاءات التي يتم الحصول عليها عن طريق الرش الحراري من أجل تلبية المتطلبات الصناعية المتزايدة الشدة ، في مجالات التطبيق الواسعة بشكل متزايد . غالبًا ما تستخدم الطلاءات في الأصل كحاجز حراري ، وتستخدم الآن لتوفير وظائف السطح إلى ركائز منخفضة التكلفة و / أو منخفضة الكثافة. بصرف النظر عن تكلفة تنفيذها ، وعدم قابليتها للتطبيق على الأسطح ذات الشكل المعقد ، ترى الطلاءات أن أدائها محدود عندما يكون التحميل الميكانيكي في الخدمة بحيث تكون ضغوط القص في المنطقة المجاورة لواجهة الطلاء / الركيزة كافية لإنتاج فك التصاق موضعي بين الركيزة والطلاء . في دراستنا ، تمت تجربة الطلاءات الصلبة لحل مشكلة التآكل التي تطرحها الصناعة المحلية. الركيزة الرقيقة المصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ تبلى بسرعة. تتعرض الصفائح المعدنية للتآكل الكاشطة وتأثيرات الحجر والأرض .التقنية المختارة لحل هذه المشكلة هي استخدام شعلة SuperJet S التي تجعل من الممكن ترسيب طلاءات صلبة من تركيبات كيميائية مختلفة. تم استخدام اختبارات الصلابة والصلابة الدقيقة باستخدام الفحص المجهرى البصري لتوصيف البنية المجهرية والخواص الميكانيكية للطلاء الصلب .أظهرت النتائج أن الطلاءات القائمة على $NiCrBSiFeC + 60\% WC-W2C$ لديها أفضل مقاومة للتآكل. ومع ذلك ، يلزم إجراء اختبارات إضافية لتحسين معلمات التشغيل لهذا المسحوق وكذلك تلك القائمة على

INTRODUCTION GENERALE

En matière de protection des matériaux, on demande le plus souvent aux pièces de résister à des sollicitations impliquant simultanément plusieurs phénomènes, par exemple : abrasion, érosion, frottement, chocs, corrosion, stabilité chimique, ...etc. pour l'amélioration du comportement des matériaux la tendance est donc, d'une part, d'adapter des solutions faisant intervenir des techniques de traitements de surface adéquat et d'autre part, de recourir à la protection des matériaux par des revêtements durs et réfractaires.

Les traitements de surface répondent à des besoins réels d'amélioration des performances des matériaux . Leur fonction étant d'améliorer la tenue du matériau vis-à-vis des sollicitations externes, tout en préservant ses propriétés volumiques.

Les revêtements obtenus par projection thermiques ont largement employés pour modifier les propriétés physiques ,chimiques et mécaniques des surfaces des pièces industrielles .Les sollicitations supportées par les revêtements peu vent être mécaniques ,thermiques, chimiques ou une combinaison de celles-ci. Outre leurs propriétés intrinsèques, les propriétés d'application des revêtements reposent aussi sur celles de leur substrat et, bien entendu, tout au long de leur vie.

Les revêtements obtenus par projection thermique sont utilisés afin de satisfaire des exigences industrielles de plus en plus sévères, dans des domaines d'application de plus en plus étendus.

Le plus souvent utilisés à l'origine comme barrières thermiques, les revêtements sont maintenant utilisés pour assurer des fonctionnalités de surface à des substrats de faible coût et/ou de faible poids volumique. En dehors de leur coût de mise en œuvre, de leur inapplicabilité aux surfaces de forme complexe, les revêtements voient leurs performances limitées lorsque le chargement mécanique en service est tel que des contraintes de cisaillement au voisinage de l'interface revêtement/substrat sont suffisantes pour produire des décohésions locales entre substrat et revêtement.

Dans la pratique, des revêtements à base de poudre employés pour recouvrir les surfaces pour les protéger à l'érosion et l'abrasion , tel que la pièce à revêtir qui est une pièce aéronautique pour fabriquer par un acier inoxydable, dans notre étude, une projection de trois poudres est faite pour avoir un revêtement lisse est résistant à l'érosion et l'abrasion.

Hormis l'introduction, en amont, et la conclusion, en aval, notre travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est réservé à une brève étude bibliographique sur la projection thermique.

Le deuxième chapitre est réservé aux matériaux utilisés, les différents appareils et machines utilisés dans notre recherche ,et les procédées de la préparation de surfaces.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation, analyse, discussion, et interprétation des résultats de notre recherche. Ce chapitre constitue le coeur de notre travail de mémoire, parce que c'est dans cette partie que nous avons analysé scientifiquement et interprété attentivement les résultats obtenus.

Listes des Tableaux

Tableau 1.1 Caractéristiques des différents procédés de projection thermique	03
Tableau 1.2 : composition chimique	16
Tableau 1.3 Propriétés mécaniques	17
Tableau 1.3 : donne technique	19
Tableau 3.1 : paramètre des poudre à projeter.....	28
Tableau 3.2 paramètre des échantillon après la projection	32
Tableau 3.3 résultat d'érosion 30 s	35
Tableau 3.4 résultat d'érosion 120 s	35
Tableau 3.5 résultat d'érosion 60 s	35
Tableau 3.6 Δm de masse	35
Tableau 3.7 résultat d'érosion 30 s	36
Tableau 3.8 : résultat d'érosion 60 s	36
Tableau 3.9 résultat d'érosion 120 s	37
Tableau 3.10 résultat de Δm de masse	37

Listes des figures

Figure 1.1 : Schéma simplifié du principe de projection thermique	02
Figure 1.2 : Principe de la projection Flamme	04
Figure 1.3 : Principe de la projection par canon à détonation	05
Figure 1.4 : Principe de la projection selon le procédé HVOF	06
Figure 1.5 : Principe de la projection par arc électrique.....	07
Figure 1.6 : Principe de la projection par plasma	07
Figure 1.7 : Principe de la projection par Cold Spray	08
Figure 8 : Schéma d'une installation de projection thermique par flamme ou arc électrique	09
Figure 2.1 : substrat.....	12
Figure 2.2 : Guillotine.....	18
Figure 2.3 :Grenailleuse.....	18
Figure 2.4 :LE KIT SUPERJET -S- EUTALLOY.....	19
Figure 2.5 : bouteilles oxygène acétylène et gaz.....	19
Figure 2.6 :Torche Super Jet –S-Eutalloy.....	20
Figure 2.7 : torchecastodynds8000.....	20
Figure 2.8 :Tronçonneuse.....	22
Figure 2.9 : durcisseur et résigne.....	22
Figure 2.10 : Polisseuse.....	23
Figure 2.11 : Polisseuse de finition	23
Figure 2.12 : Microscope optique	25
Figure 2.13 : Duromètres Innova test Falcon 400.....	25
Figure 2.14 : Balance	26
Figure 2.15 : support de variation des angles.....	26
Figure 2.16 : microscope digital camera.....	27
Figure 2.17 : casque et gants et blouson chaussure de sécurité.....	27
Figure 3.1 : échantillon obtenu après le découpage.....	29

Figure 3.2 : échantillon après le grenouillage.....	30
Figure 3.3 préchauffage.....	30
Figure 3.4 la flexion des échantillon.....	30
Figure 3.5: substrat et support	31
Figure 3.6 : revêtement des 3 poudres 1009, 10112 ,10680	31
Figure 3.6 : échenillons obtenus après le coulage.....	32
Figure 3.7 : la microstructure de BroTec 10009	32
Figure 3.8 : la microstructure de ChromTec10680	32
Figure 3.9 aspect des surface des échantillons projeter de la poudre BroTec 10009.....	32
Figure 3.10 aspect des surface des échantillon projeter de la poudre Chrome Tec 10680	34
Figure 3.11 aspect des échantillons projeter de la poudre Teng Tec 10112	35
Figure3.12 la variation de poids Δm par rapport au angles des test	37
Figure 3.13 la viration de poids Δm par rapport au angles des test.....	38

Sommaire

CHAPITRE I PROJECTION THERMIQUE

1.1 TRAITEMENT DE SURFACE	1
1.2 PROJECTION THERMIQUE.....	1
1.2.1 PRINCIPE	2
1.2.2 PROJECTION FLAMME	4
1.2.3 PROJECTION PAR ARC ELECTRIQUE.....	6
1.2.4 PROJECTION PAR PLASMA.....	7
1.2.5 PROJECTION COLD SPRAY.....	8
1.2.6 INSTALLATIONS DE PROJECTION THERMIQUE.....	8
1.3 PREPARATION DE LA SURFACE A REVETIR.....	9
1.4 LES TECHNIQUES DE PREPARATION.....	10
1.4.1 LE GRENAILLAGE OU SABLAGE	10
1.4.2 LE BROSSAGE ET POLISSAGE	10
1.4.3 FILETAGES GROSSIERS.....	10
1.4.4 LE PRECHAUFFAGE.....	11
1.5 STRUCTURE ET CARACTERISTIQUES DES DEPOTS	11
1.6.1 TRAITEMENT DES DEPOTS APRES LA PROJECTION	12
1.6.2 CONTROLES DES DEPOTS	12
1.7 ADHERENCE.....	13
1.8 CONDITIONS POUR L'OBTENTION D'UN BON DEPOT	14
CONCLUSION	14

CHAPITRE II PROJECTION THERMIQUE

2.1 INTRODUCTION.....	16
2.2 SUBSTRATS	16
2.2.1 COMPOSITION CHIMIQUE	16
2.2.2 PROPRIETES MECANIQUES	17
TABLEAU 1.3 PROPRIETES MECANIQUES.....	17
2.3 PREPARATION DES ECHANTILLONS	17
2.3.2 PREPARATIONS DES SURFACES	18
2.4 PROJECTION THERMIQUE.....	19
2.4.1 LE KIT SUPERJET -S- EUTALLOY®	19
2.4.2 PROJECTIONS THERMIQUE AVEC TORCHE CASTODYNDS 8000	20
2.5 LES POUDDRE UTILISER DANS LA PROJECTION	21

<i>Données Techniques</i>	21
2.6 ETUDE METALLOGRAPHIQUE	22
2.6.1 TRONÇONNEUSE	22
2.6.2 ENROBAGE DES ECHANTILLONS	22
2.6.3 POLISSEUSE	23
2.6.4 POLISSEUSE DE FINITION	23
2.6.5 MICROSCOPE OPTIQUE	24
2.6 L'ESSAI DE MICRO DURETE	25
2.6.1 MACHINE DE DURETE ET MICRO DURETE VICKERS/KNOOP/BRINELL FALCON 400	25
2.7 TEST DE L'ABRASION	26
SUPPORT POUR LE TEST D'ABRASION POUR LA VARIATION DES ANGLES	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2.8 MICROSCOPE DIGITAL CAMERA	27
2.9 MATERIEL DE SECURITE UTILISER DURANT LA PROJECTION THERMIQUE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

CHAPITRE III RESULTAS ET DISCUSSION

INTRODUCTIONS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
PROJECTIONS THERMIQUE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
DECOUPAGES DES ECHANTILLONS	29
PREPARATION DE SURFACE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
PROJECTION THERMIQUE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ETUDE METALLOGRAPHIQUE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ESSAIS D'ABRASION	34
ESSAIS DE MICRO-DURETE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

1.1 Traitement de surface

La projection thermique fait partie de la famille de traitement de surface parmi les quelsse trouvent [1] :

- Les procédés de transformation structurale tels que fusion , la trempe superficielle les traitements mécanique , les procédés de diffusion de métaux ou de métalloïdes ;
- Les procédés de conversion tels que l'oxydation anodique , la sulfuration ou la phosphatation
- Les procédés par voie sèche tels que la peinture les dépôts électrolytiques chimique ou par immersion dans un métal fondu
- Les procédés par voie humide tels que le picage , le rechargement par soudure , les dépôts chimique ou physiques en phase vapeur (CVD OU PVD) et la projection thermique .

1.2 Projection thermique

Le Docteur Max Ulrich Schoop inventa le procédé de projection thermique, appelé shoopage (du nom de son inventeur) au début du 20^e siècle. Les premiers systèmes étaient composés de creusets dans lesquels le métal était maintenu à l'état liquide par chauffage et de système de projection à l'air réchauffé. Il améliora le procédé en remplaçant le métal liquide par de la poudre métallique qui était mise en fusion en traversant un chalumeau oxy-acétylénique. La métallisation n'était cependant pas parfaite. Shoop remplaça alors la poudre par un fil métallique, améliorant ainsi la qualité des dépôts. Il remplaça également le chalumeau par un arc électrique. Depuis cette période, les procédés ont évolué pour aboutir aux techniques actuelles.

Jusqu'aux années 60, le procédé de projection à partir d'un fil était appelé « Shoopage » et le procédé de projection de poudre était appelé « Schori » du nom du chercheur qui a fait évoluer le procédé [1].

1.2.1 PRINCIPE

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 1). En s'agglomérant, les particules forment le revêtement. Les liaisons sont purement mécaniques. L'épaisseur du revêtement est comprise entre 50 microns et quelques millimètres.

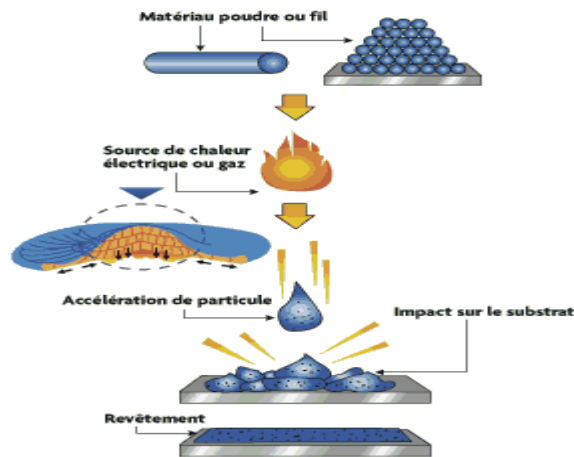


Figure 1.1 : Schéma simplifié du principe de projection thermique [2]

Les procédés de projection thermique peuvent être classés en 2 catégories :

- Les procédés dont la source de chaleur est un chalumeau oxyacétylénique :

Procédé flamme-poudre (FP), procédé flamme-fil ou cordon (FF), procédé HVOF (HV) et procédé par canon à détonation (CD) ;

- Les procédés dont la source de chaleur est un arc électrique : procédé à l'arc Électrique (AE) et procédé plasma (PS).

Tableau 1.1 : Caractéristiques des différents procédés de projection thermique [3]

Caractéristique	Projection Flamme Poudre	Projection flamme fil	Projection HVIF	Projection par canon a détonation	Projection Arc Electrique	Projection Plasma
Source de chaleur	Flamme oxyacétyléniques	Flamme oxyacétyléniques	Flamme oxyacétyléniques	Flamme oxyacétyléniques	Arc Electrique	Plasma
Temperature de flamme (°C)	3 000	3 000	3 000	3 000	6 000	12 000
Trepsport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz flamme	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz plasma (ar/h)
Vitesse des particules (m/s)	40	150	700	950	250	200
Forme du matériaux d'apport	Poudre	Fil ou cordon	Poudre	Poudre	Fil	Poudre
Rendement moyen (%)	50	70	70	70	80	70
Epaisseur (mm)	0,1à1,5	0,1à1,5	0.05à1	0.05à1	0.2à3	0.05à1.5
Exemple de matériaux matériaux d'apport	-Métaux -Céramique -Carbure dans matrice métallique	-Métaux -Céramique -Carbure dans matrice métallique	-Métaux -Carbures	-Métaux -céramiques	-Métaux	-métaux -Céramique -Carbures

1.2.2 PROJECTION FLAMME

Il s'agit du procédé le plus ancien, à l'origine de la projection thermique. Elle est communément appelée « métallisation ». Elle est particulièrement adaptée aux matériaux à bas point de fusion. Elle fait appel à une flamme oxyacétylénique comme source de chaleur. La température à l'intérieur de la flamme peut atteindre 3 000°C. Le matériau d'apport est véhiculé par l'énergie cinétique transmise par les gaz de combustion (Figure 2).

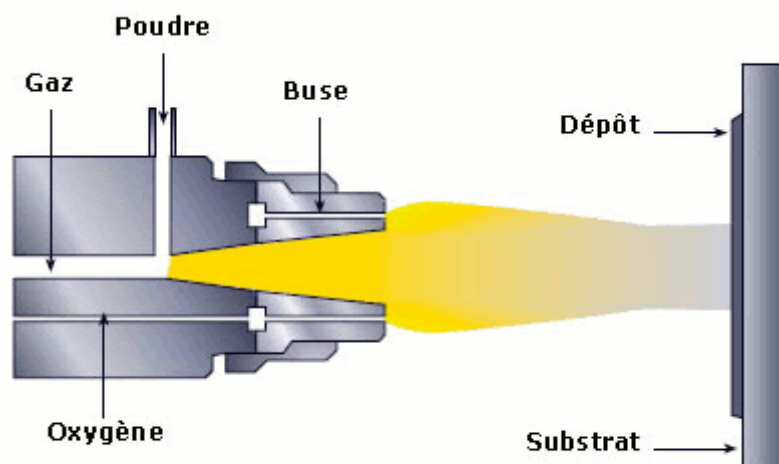


Figure 1.2 : Principe de la projection Flamme [4]

Cette technique se décline en plusieurs procédés :

- Dans la **projection flamme-poudre**, le matériau d'apport se présente sous forme de poudre. La température des particules atteint 2 000°C au sein de la flamme. La vitesse des particules est faible et la distance entre la buse et le support ne doit être que de quelques millimètres. Les matériaux d'apport les plus fréquemment utilisés sont les alliages autofusibles à base de nickel et de cobalt. Ce procédé est très répandu dans la plupart des industries pour résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique.

- Dans la **projection flamme-fil**, le matériau d'apport se présente sous forme de fil,

de cordon, de baguette ou de fil fourré. La flamme ne sert, dans ce cas, qu'à la fonte du matériau. Les particules obtenues seront véhiculées par un flux d'air comprimé. Les matériaux d'apport les plus fréquemment utilisés sont les métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo), les aciers inoxydables ou non, les alliages à base de zinc, de cuivre, de nickel ou d'étain, les céramiques (NiAl, NiCrBSi, Al₂O₃, Al₂O₃-TiO₂, Cr₂O₃, ZrO₂-CaO). Ces dernières se présentent sous forme de cordon ou de baguettes exclusivement. Ce procédé peut être mis en œuvre dans tous les domaines – aéronautique, automobile, papeterie, aciérie, sidérurgie, construction d'infrastructures – pour résoudre des problèmes d'abrasion, de corrosion, d'usure, d'isolation thermique ou électrique.

- Dans le cas de **la projection au canon à détonation**, le matériau d'apport se présente sous forme de poudre et est chargé dans un tube – le canon à détonation – en même temps que le gaz. La détonation est provoquée par l'explosion de ce mélange sous l'action d'une étincelle (Figure 3). Les matériaux utilisés sont principalement les carbures de chrome ou de tungstène avec un liant métallique de nickel ou de cobalt, l'alumine et l'oxyde de chrome. Ce procédé n'est utilisé qu'en sous-traitance, du fait du bruit émis lors de la détonation et des contraintes de mise en œuvre. Les principaux domaines d'utilisation sont le textile, la sidérurgie, l'aéronautique et la chimie.

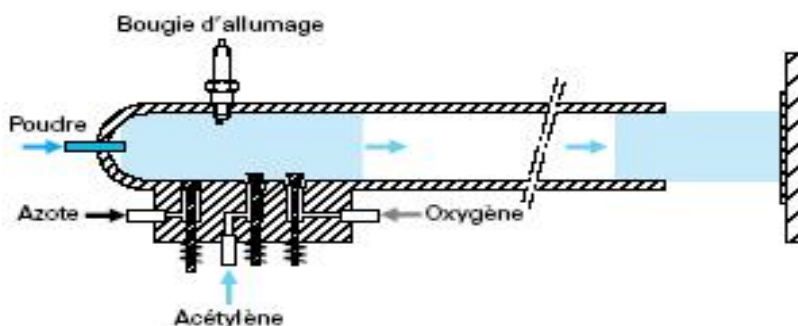


Figure 1.3 : Principe de la projection par canon à détonation [2]

- Dans le cas de **la projection à tir continu**, deux procédés peuvent être mis en

œuvre : le procédé HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) et le procédé HVAF (High Velocity Air-Fuel) (Figure 4). Le choix entre ces deux procédés se fait pour des raisons économiques. Les matériaux d'apport utilisés sont les métaux et les alliages à base de nickel et de cobalt. Les carbures à base de chrome ou de tungstène sont également des matériaux projetables par cette technique. Par contre, les oxydes sont très rarement utilisés. Ce procédé est principalement utilisé dans le traitement anticorrosion dans les secteurs de l'aéronautique, l'aciérie et la papeterie.

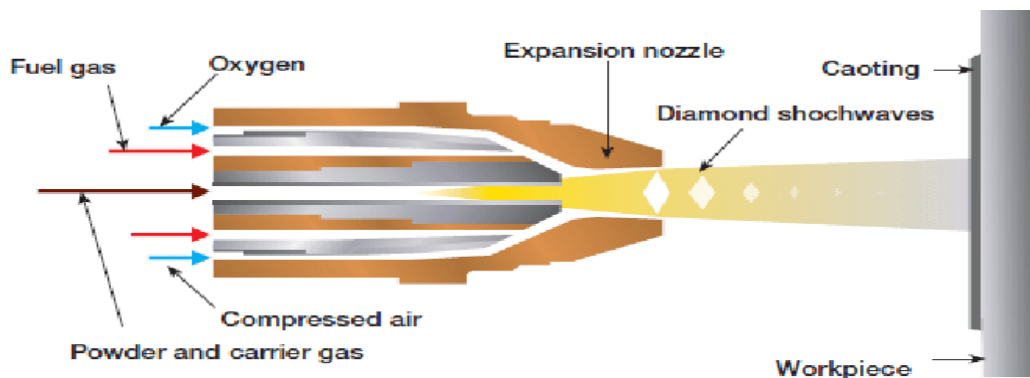


Figure 1.4 : Principe de la projection selon le procédé HVOF [4]

- **Le procédé de projection flamme avec refusion** consiste à projeter le matériau d'apport à l'aide d'une flamme (procédé flamme classique). Lorsque le dépôt est créé, celui-ci est de nouveau fondu en utilisant la flamme du pistolet de projection comme source de chaleur. Cette technique permet d'améliorer le niveau d'adhérence, mais également de diminuer la porosité. Les matériaux d'apport sont principalement des autofusibles (NiCrBSi, NiCrBSiFe ou du carbure de tungstène avec une matrice NiCrBSiFe). Ce procédé est principalement utilisé sur des pièces subissant de l'oxydation à chaud, par voie humide, de la fissuration, de l'abrasion.

1.2.3 PROJECTION PAR ARC ELECTRIQUE

Le principe de ce procédé consiste à créer un arc électrique entre deux fils de matériau d'apport afin de le fondre. Il sera ensuite projeté grâce à un flux d'air sur le support (Figure 5) [4]. Dans ce cas, la température de fusion peut atteindre 6 000°C. L'épaisseur du dépôt est alors comprise entre 0,2 et 3 mm avec une porosité de 5 à 10 %.

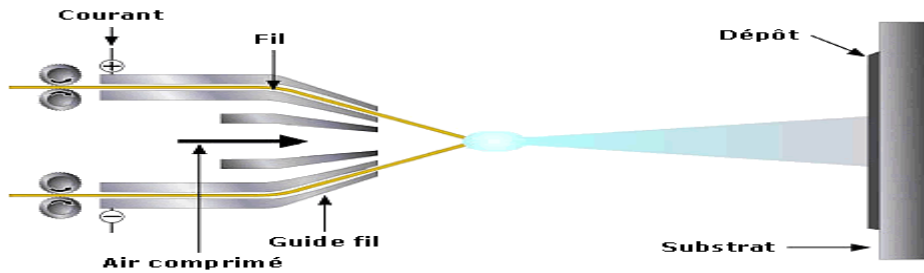


Figure 1.5 : Principe de la projection par arc électrique [4]

Les matériaux d’apport doivent d’être conducteurs. Il s’agit du zinc, de l’aluminium, du cuivre, du molybdène et des aciers. Au cours de ces dernières années, de nouveaux matériaux apparaissent sur le marché : les fils fourrés qui sont en réalité des alliages de type NiCrAl, NiMoAl, FeCrCMn, des fils à base de carbures de chrome ou de tungstène, des composites AlSi chargés en graphite.

Ce procédé est principalement utilisé dans les secteurs de l’automobile et de l’aéronautique

1.2.4 PROJECTION PAR PLASMA

Le principe de ce procédé est l’utilisation d’un arc électrique dans un plasma gazeux. Le matériau d’apport sous forme de poudre est introduit dans cette source de chaleur d’une température comprise entre 15 000 et 20 000°C (Figure 6). Ce procédé est essentiellement mis en œuvre dans l’air ambiant, mais pour obtenir des revêtements plus épais à de plus faibles températures, il peut être mis en œuvre sous atmosphère contrôlée ou sous vide. L’épaisseur des dépôts est variable en fonction des demandes et la porosité est inférieure à 10 %.

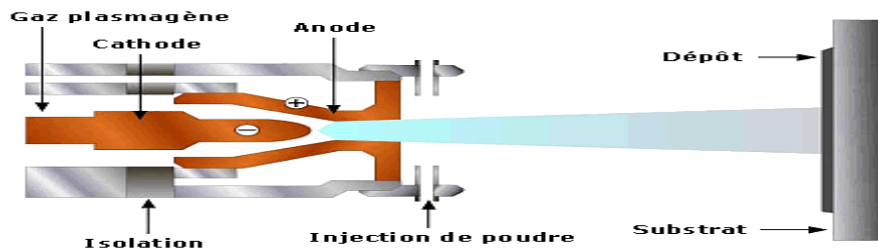


Figure 1.6 : Principe de la projection par plasma [4]

Les matériaux d’apport ont une granulométrie comprise entre 2 et 120 µm. Il s’agit de métaux (Al, Zn, Mo, Ti, etc.), d’alliages (NiCr, NiAl, NiCrAlY, etc.), de céramiques (Al₂O₃, Cr₂O₃, TiO₂, ZrO₂, etc.), de carbures (WC, Cr₃C₂, etc.) ou de cermets (Cr₃C₂/NiCr, WC/Co, ZrO₂/NiAl, etc.)

Ce procédé peut être facilement mis en œuvre et permet de résoudre des problèmes d’usure, de corrosion, de barrière thermique, de frottement ou d’oxydation, notamment dans les secteurs de l’aéronautique et de l’automobile.

1.2.5 PROJECTION COLD SPRAY

Ce type de projection a été mis au point en Russie et s’est développé par la suite aux USA et en Allemagne. Les particules d’une taille comprise entre 10 et 40 µm sont chauffées dans un gaz, le plus souvent neutre (azote ou hélium) à une température comprise entre 100°C et 800°C. Elles sont ensuite projetées sur le support à l’aide d’une buse de Laval permettant de transformer un jet subsonique en un jet supersonique, afin d’obtenir une déformation suffisante à l’impact sur le substrat. La distance entre la buse et le support est faible et comprise entre 12,7 mm et 50 mm (Figure 7). [2]

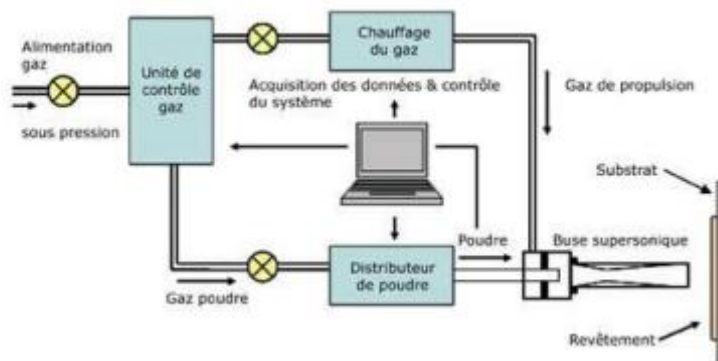


Figure 1.7 : Principe de la projection par Cold Spray [2]

Cette technique est particulièrement adaptée au traitement localisé de pièces de grandes dimensions. Elle est également caractérisée par un faible rejet de poussières et une grande souplesse d’utilisation. Un autre avantage à cette technique est la non-modification de la structure des poudres projetées, produisant ainsi des revêtements ne contenant que peu d’impuretés, tels que les oxydes formés lors de l’élévation de température.

La principale propriété des métaux et des alliages utilisés est la ductibilité. Le zinc, le cuivre, l’étain, l’argent, l’aluminium, le titane, les alliages nickel-chrome et cuivre-aluminium, ainsi que des polymères et des céramiques sont projetés à l’aide de cette technique

Cette technique est mise en œuvre pour résoudre des problèmes de corrosion, d’usure, ou de conductivité électrique, dans des secteurs d’activité tels que le biomédical, l’aérospatiale, la chimie et l’électronique.

Certains professionnels de la projection thermique ne considèrent pas ce nouveau procédé comme appartenant réellement à la famille des procédés de projection thermique. En effet, les particules métalliques sont chauffées à une température le plus souvent inférieure à la température de fusion. L’accrochage des particules se fait exclusivement par des liaisons mécaniques dues aux chocs des particules sur le support.

1.2.6 INSTALLATIONS DE PROJECTION THERMIQUE

Les installations de projection thermique se divisent en 2 catégories :

- Les installations portatives : il s’agit essentiellement des procédés flamme poudre, flamme-fil et par arc électrique. Le principe est décrit Figure 8
- Les cabines sont divisées en 2 catégories : les cabines ouvertes et les cabines fermées le plus souvent confinées. L’utilisation de cabines permet, contrairement à l’utilisation d’un matériel portatif hors cabine, de capter les émissions de particules au cours de la projection. Par contre pour les cabines ouvertes, les opérateurs et les salariés se trouvant à proximité devront être équipés de protection auditive.

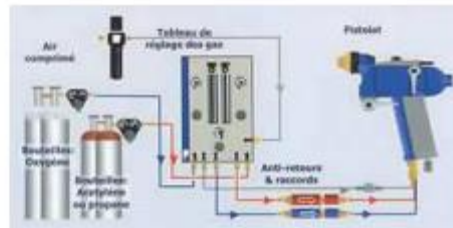


Figure 1.8 : Schéma d’une installation de projection thermique par flamme ou arc électrique [4]

Les installations de projection thermique par canon à détonation sont isolées dans une enceinte résistant aux explosions et isolée phonétiquement. Les commandes sont situées à l’extérieur de l’enceinte.

Les installations de projection par plasma sont placées dans une enceinte protégeant ainsi les opérateurs de la chaleur émise par le procédé. Comme pour les installations de projection par canon à détonation, les commandes sont situées à l’extérieur de la cabine de projection.

1.3 Préparation de la surface à revêtir

La préparation de surface comprend trois étapes principal

- Le nettoyage de la pièce traitée qui est nécessaire pour l’élimination de toute matière contaminant (graisse ,huile, poussières ,polymères) réalisée par immersion par pulvérisation , par ultrasons voir par élévation de température. Les nettoyants peuvent être des solvants
- Les création de rugosité en surface de la pièce traitée afin de permettre aux particules de s’ancrer dans les irrégularités de surface ainsi créés et d’assurer un bon accrochage mécanique . C’est un facteur prépondérant dans la bonne tenue de dépôt . Cette création de rugosité peut être effectuée de deux manières :
 - ❖ Par sablage (au cordon ou a la grenaille métallique) permettent un nettoyage complémentaire de la pièce (enlèvement de peinture d’oxydes ...)et l’obtention d’une rugosité de surface comprise entre 6à10 mm environ (qualité SA3)
 - ❖ Par tournage avec création d’un profil rainuré de profondeur 0.5mm environ cette méthode est réservée en général aux dépôt les plus épais , le tournage étant suivi d’un sablage complètement . il convient de noter qu’une attention particulière doit être

portée aux raccordement [partie rechargée / partie non traitée] qui son généralement réalisera l'aide de profil chanfreinés ou rayonnés

- **Le masquage des zones non rechargées** les produit les plus courants sont des adhésifs ou des cache métalliques (engénéralréservés aux pièces de série). Les élastomères souples présentent l'avantage de pouvoir servir à la fois au sablage et à la projection et permettre un masquage précis

1.4 Les techniques de préparation

Les technique de préparation mécanique sont les plus utilisées en projection thermique elles son généralement les plus simples à mettre en œuvre . Donc parmi ses techniques utilisées on peut citer :

1.4.1 Le grenailage ou sablage

Le sablage es le terme impropre donne 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 a induire des modification physiques , chimiques ou mécanique au subjectile . La technique employée consiste à utiliser , soit un vecteur gazeux (généralement l'ai comprimé) , soit une force centrifugé (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 extrêmes variés , différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres qui influencent le résultat . il reste à ce jour la seul solution efficace

1.4.2Le brossage et polissage

Les techniques de brossage et de polissage . Ces techniques sont pas mal adaptées à la projection thermique . En effet , le brossage ne procure pas un état de surfaces suffisamment propre et une rugosité suffisamment élevée . le polissage , permet une décontamination de la surface et la création d'une rugosité contrôlée Cependant . les surfaces polies son très réactives notamment vis à vide l'oxygène et se couvents d'une couche de passivation qui limite l'adhérence De plus , des pièces à revêtir de grande taille se prêtent mal au polissage de leur surface

1.4.3Filetages grossiers

Il est utilisé généralement pour les surfaces cylindriques pour mettre en œuvre le procédé de projection à froid après l'usinage de préparation. Il faut augmenter la surface décrochage en usinant une passe à avancé rapidement avec de 0.7 mm par tour et une profondeur de coupe de 0.35 mm on obtient un état de surface adéquat ne pas utiliser de lubrifiant cette technique n'est pas recommandée pour des revêtements minces

1.4.4 Le préchauffage

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

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.

1.5 Structure et caractéristiques des dépôts

Les dépôts formés par projection thermiques ont obtenu par empilements successifs de gouttelettes de matériau fondu ou à l'état pâteux. La structure ainsi formée est du type la malaise. Afin de réaliser un bon accrochage mécanique, la surface des pièces à revêtir est préalablement préparée pour en augmenter la rugosité et permettre aux particules de s'ancrer dans les irrégularités de surface. La formation du dépôt présente deux étapes caractéristiques :

- L'écrasement de chaque gouttelette
- La formation d'une couche de matériau, résultant de la cinématique liée au processus (mouvements relatifs 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). Les expérimentations récentes montrent qu'en dessous d'une température appelée température de transition la structure obtenue est du type « fragmentée ». Ce phénomène est attribué à un temps de germination plus important quand l'interface particule/substrat est maintenue à une certaine température.

L'état liquide est ainsi conservé pendant toute la durée de l'impact. D'autres facteurs, tels que la mouillabilité et la conductibilité thermique du matériau de base,

influent également sur cette structure. La vitesse de refroidissement des particules au contact du métal de base est généralement supérieure à 106K/s, le temps de solidification étant compris entre 0,5 et 2, 5ms .La formation d'un dépôt résulte de la combinaison du phénomène d'écrasement et de solidification rapide de particules fondues sur le substrat et du balayage de la surface à traiter. La réaction chimique des particules avec les gaz environnants et les transferts de chaleur avec le substrat (ou la couche précédemment déposée) vont affecter la qualité du dépôt, et en particulier le taux de porosité, le taux d'impuretés, les contraintes résiduelles et la structure métallurgique

1.6 .1 Traitement des dépôts après la projection

Les dépôts projetés thermiquement ont beaucoup de défauts (porosité, faible adhérence, phases métastables, rugosité de surface...) qui peuvent être améliorés par des post traitements :

- Traitement thermique qui inclut le chauffage au four, traitement laser et qui sert surtout à éliminer les phases métastables et améliorer les propriétés mécaniques
- Traitement mécanique, rectification et finition de la surface des dépôts.
- Imprégnation avec les composés organiques et inorganiques.

1.6.2 Contrôles des dépôts

Les contrôles des dépôts, hormis les contrôles dimensionnels, sont tous des tests destructifs. Ils peuvent être réalisés sur prélèvement d'échantillons de production ou sur éprouvette témoin, traitée simultanément aux pièces de production. Les contrôles sont de deux types :

- Les contrôles métallurgiques, effectués sur coupes micrographiques (structure des dépôts, porosité, dureté...) ou sur éprouvettes (essais d'adhérence, de pliage...).
- Les contrôles fonctionnels effectués sur machines de test (frottement, corrosion, résistance à l'usure, tenue aux chocs thermiques...). Le tableau 8 regroupe les différents contrôles réalisés en projection thermique et les normes correspondantes

1.7 Adhérence

L'adhésion assure la formation et la cohésion de l'interface entre deux solides (le dépôt et le substrat). Elle est induite par les forces d'attraction entre les matériaux. Les mécanismes d'adhésion peuvent être de plusieurs types :

- **1.7.2 Mécanique** : l'adhésion est assurée par un ancrage mécanique du matériau qui pénètre dans les microcavités et irrégularités de surface du substrat avant la solidification. Il a été prouvé expérimentalement par un exemple simple qu'un matériau poli présente un degré plus faible d'adhésion qu'un matériau sablé. Un bon ancrage mécanique nécessite un choix judicieux de la rugosité de surface et dépend à la fois de l'adhésif et de la mouillabilité du substrat ainsi que de la surface de contact entre le substrat et l'adhésif. Une bonne affinité dépôt/surface du substrat limite donc la formation de défauts liés à de l'air piégé et la propagation des fissures ;
- **1.7.3 Chimique** : il s'agit d'une adhésion "chimique" allant jusqu'à la formation de véritables liaisons résultant d'interactions intermoléculaires ou interatomiques (par exemple de type covalente ou ionique) à l'interface. Toutes ces différentes formes de liaisons contribuent à la bonne adhérence du système substrat/ dépôt. Ce mécanisme est également observé dans le cas d'un traitement thermique à haute température lors de l'élaboration du revêtement ou dans le cas d'une réaction exothermique qui peut favoriser la formation de liaisons métallurgiques à l'interface. Néanmoins, l'accrochage avec le substrat peut être favorisé si celui-ci a été préalablement préparé. Une préparation non satisfaisante peut être pénalisante pour l'adhésion du revêtement sur son substrat. En effet, la nature, la température et la préparation de surface du substrat agissent notamment sur les transferts thermiques à travers une modification des propriétés mécaniques du substrat...etc.

Le substrat doit donc être préalablement traité pour adapter sa rugosité, de façon à créer des points d'ancrage mécanique pour les particules projetées. Il est néanmoins nécessaire de ne pas créer une rugosité trop importante, qui diminuerait les vitesses de refroidissement et d'étalement des particules en augmentant localement la résistance thermique de contact.

1.8 Conditions pour l'obtention d'un bon dépôt

L'obtention d'un revêtement dense et adhérent exige que

- Une fraction importante des particules injectées soient dans un état liquide ou semi pâteux lorsqu'elles atteignent le substrat ou les particules précédemment déposées ;
- Les particules fondues aient une vitesse suffisante pour s'étaler et couler sur les irrégularités du substrat ou sur les particules précédemment déposées
- Une forte adhérence inter particules et particule-substrat soit établie
- Une sous-couche d'accrochage est souvent projetée avant la projection du dépôt pour permettre une adhésion du revêtement sur le substrat

Une attention toute particulière doit évidemment être portée à la fusion des particules. Cette fusion dépendra :

- Du niveau de température de la flamme, fonction du mélange de gaz employé
 - De la quantité de chaleur disponible dans cette flamme
 - Du point d'injection de la poudre dans la flamme de la vitesse d'injection des particules

Conclusion

La projection thermique est une technique de revêtement de surface offrant une très grande flexibilité au niveau des types de matériaux appliqués. Ceci permet d'accroître les propriétés de surface de différentes façons ,et d'adresser une multitude de problématiques industrielles. Il est également possible de combiné divers types de matériaux ensemble pour obtenir des propriétés complémentaires ,comme ,par exemple ,un revêtement anti usure et autolubrifiant.

Les applications de la projection thermiques ont très varié revêtement contre l'usure, protection contre la corrosion et la chaleur, revêtement à propriétés électriques, réparation de surfaces endommagées... Et ces procédés sont utilisés dans de nombreux secteurs : mécanique(rouleaux de laminoirs, guide-fils, pompes, pistons...),aéronautique (aubes de turbine, blindage, barrière thermique...), biomédical (prothèses, couches biocompatibles...), industrie nucléaire (protection contre la corrosion et l'usure, réacteurs chimiques...).

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie expérimentale de notre travail, les étapes de la réalisation de ce travail sont bien détaillé tel, que le découpage des éprouvettes et la préparation de leurs surfaces, la préparation des poudres ainsi que la technique de réalisation des revêtements par projection thermique.

Les différents moyens et techniques expérimentaux utilisés dans ces études ont décrits

2.2Substrats

Le matériau utilisé dans cette étude comme substrat est un Alliage 310S présente une excellente résistance à l'oxydation dans de faibles conditions cycliques. Il possède également une bonne résistance à la sulfuration et aux autres formes de corrosion thermique grâce à sa forte teneur en chrome et en nickel.

L'Alliage 310S est largement utilisé dans des atmosphères à cémentation modérée semblables à celles rencontrées dans les environnements pétrochimiques. Les atmosphères de cémentation plus agressives des fours industriels de traitement chimique nécessitent le RA330® ou le RA333®. Le 310S n'est pas recommandé pour les chocs thermiques importants liés aux hypertrempe répétées. La taille du grain et la teneur en carbone sont conformes aux exigences du 310S et du 310H. L'Alliage 310S est souvent utilisé à des températures cryogéniques grâce à son excellente ténacité et à sa faible perméabilité magnétique. Il possède également de bonnes propriétés d'usinabilité et de fabrication. Veuillez nous contacter dès aujourd'hui pour plus d'informations., ou obtenez un devis à l'aide du formulaire ci-dessous.

2.2.1Composition chimique

La composition chimique des substrats utilisées pour déposer nos revêtements est montrée au tableau 2.1. Elle se caractérise par un haut pourcentage de chrome et de nickel.

Le pourcentage de carbone est maintenu inférieur à 0.08%

%	Cr	Ni	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cu	Fe
Min	24	19								
Max	26	22	0.08	0.75	2	0.045	0.03	0.75	0.5	Solde

Tableau 1.2 : composition chimique [5]

La pièce réelle est une plaque d'environ 40 cm de long et à une courbure d'environ 10 cm. Comme et montrer dans la figure



Figure 2.1 substrat

Propriétés mécanique et physique	21.1°C	537.8°C	648.9°C	760°C	871.1°C	982°C	1093°C
Résistance à la traction ultime / MPa	551.6	467.5	373	242	131.7	-	-
Limite d'élasticité à 0.2%/ MPa		143.4	142.7	133.1	84.1	-	-
Allongement (%)	52	47	43	46	48	-	-
Fluage minimal 0.0001 % par h/ MPa	-	-	102.7	22.8	7.6	1.9	-
Force de rupture à 10 000 h	-	-	99.3	31	10.3	4.6	-
Coefficient de dilatation thermique / $\mu\text{m}/\text{m}.\text{°C}$	-	17.1	17.6	18.1	18.3	18.5	19.1
Conductivité / kcal/(h.m.°C)	11.3	20.2	22.6	25	27.4	29.8	-
Module d'élasticité / $\times 10^5\text{MPa}$	2	1.59	1.5	1.41	1.32	-	-

2.2.2 Propriétés mécaniques

Tableau 1.3 Propriétés mécaniques[5]

2.2.3 APPLICATIONS

- Becs de torches de brûlage
- Fours au charbon à lit fluidisé
- Tubes radiants
- Supports de tubes des raffineries de pétrole et des chaudières à vapeur
- Composants internes de gazogène à charbon
- Puits thermométriques et boulons d'ancrage réfractaires
- Becs de gaz, chambres de combustion
- Autoclaves, moufles, couvercles de recuit
- Structures cryogéniques

2.3 Préparation des échantillons

Découpage d'une tôle a des petits échantillons de carré avec une machine de découpage (une cisaille Guillotine)

2.3.1 Guillotine

La guillotine est une machine de découpage, elle nous a servi à régler les angles de notre échantillon, la figure est une guillotine qui se trouve dans notre atelier



Figure 2.2 : Guillotine mécanique

2.3.2 Préparations des surfaces

Afin de préparer les surfaces des échantillons on a utilisé :

2.3.2.1 Grenailleuse

La grenailleuse est une machine qui permet de souffler avec de l'air comprimé à 8 bars un abrasif, dans notre cas de l'alumine, sur une surface métallique d'un substrat afin d'augmenter sa rugosité. Elle permet en outre de nettoyer sa surface de toute souillure ou tâche d'huile, impureté, etc.

Le principe est simple. Il suffit d'entre l'échantillon ou substrat dans la cabine de projection, de diriger le souffle d'abrasif sa surface en tenant la buse à environ 10 cm et de balayer l'aire complètement pour obtenir un état rugueux prêt pour la projection .



Figure 2.3 Grenailleuse

2.4 Projection thermique

La torche super-jet S est utilisée lors de la projection thermique, la figure montre le kit Eutalloy



Figure 2.4 LE KIT SUPERJET -S- EUTALLOY

2.4.1 LE KIT SUPERJET -S- EUTALLOY®

Le kit de base Superjet - S Eutalloy est fourni dans une mallette facilement portée/stockée contenant les accessoires nécessaires pour l'assemblage rapide et facile du Superjet S. Selon les besoins et les applications spécifiques, le kit de base peut être complété avec un choix approprié de lances et d'alliages Eutalloy. La figure 2.5 détaille la composition de la torche SuperJet S de Castolin Eutectic.

2.4.1.1 Donne technique

No ° lance	Débit oxygène 1/h	Débit acétylène 1/h
A0 S	90	80
A1 S	120	110
A2 S	280	245
B3 S	440	400
B4 S	600	550
C5 S	950	860

Tableau 1.3 : donne technique

- A. Buse de projection
- B. Lance orientable et interchangeable
- C. Mélangeur de gaz
- D. Aspiration de l'alliage
- E. Valve d'alimentation
- F. Eco-Pak
- G. Levier de débit de l'alliage
- H. Levier d'arrêt rapide
- I. Vanne de réglage acétylène
- J. Vanne de réglage oxygène
- K. Bouclier antithermique orientable
- L. Dispositif de protection

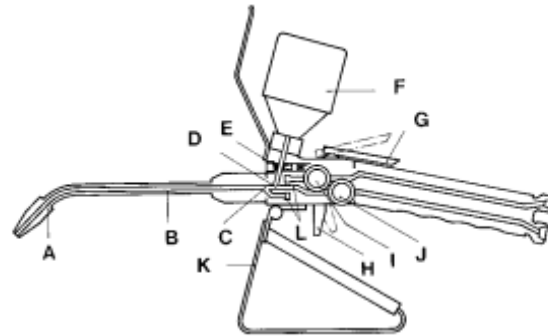


Figure 2.6 Torche Super Jet –S-Eutalloy

2.4.2 Projections thermique avec torche castodynDS 8000



Figure2.7 torche castodynds8000

L'équipement de projection thermique oxyacétylénique castodynds 8000 il est conçu pour l'utilisation simple et rationnelle il permet de projeter grands catégorie d'alliages métalliques des cermet, des céramique et des plastiques.

Avantages

- Le pistole test léger ,robuste ,mise en œuvre très pratique
- Las écurité et la facilité de réglage

Les essais préliminaires avaient été faite avec une poudre 19300. Il s'agissait plutôt de nous familiariser à la technique de projection été même temps de vérifier si on

Les essais préliminaires avaient été faite avec une poudre 19300. Il s’agissait plutôt de nous familiariser à la technique de projection et en même temps de vérifier si nous pouvions déposer un revêtement sur une pièce cylindrique.

Avant le montage de la pièce l’endroit de travail a été bien nettoyé ainsi que tous les équipements utilisés lors de la projection d’abord à l’air comprimé puis avec un solvant de nettoyage.

Il est clair que le procédé de déposition lui-même n’aide pas à déposer facilement un revêtement uniforme sans déformation des éprouvettes, pour éviter ces derniers nous avons utilisé une pointe de centrage.

2.5 Les poudre utiliser dans la projection

Eutalloy® 10680

Description

- Faible coefficient de frottement
- Bonne résistance à l’impact et à la pression
- Convient aussi pour des assemblages
- Revêtements épais possibles
- Appliquée par projection-fusion, en utilisant la torche SuperJet Eutalloy S®

Données Techniques

Dureté de Dépôt	~240 HV30
Température de service (max.)	~600°C

Eutalloy® 10009 (BoroTec)

Description

- Faible coefficient de frottement
- Excellente résistance à l’abrasion à basse pression et à l’érosion
- Bonne résistance à la corrosion
- Facile à utiliser
- Appliqué par projection-fusion, en utilisant la torche SuperJet Eutalloy S®

Données Techniques

Dureté de Dépôt	~58 HRC
Température de service (max.)	~700°C

Eutalloy® 10112 TungTec

Description

Excellente résistance aux températures élevées
 Très facile à utiliser

Very easy to use

Appliquée par projection-fusion, en utilisant les torches DS 8000 CastoDyn

Données Techniques

Température de service (max)	~700°C
Hardness (matrix)	~64 HRC
Dureté (phases dures)	~1900 HV

2.6 Etude métallographique

L'étude métallographique sert à préparer nos échantillons a fin de voir la microstructure au microscope optique.

2.6.1 Tronçonneuse

Pour faire les tests de microdureté le découpage des échantillons en petits morceaux, nous avons utilisé une tronçonneuse. L'utilisation de la guillotine n'est pas approprié pour l'usage que l'on voudrait avoir. Les échantillons, étant minces, deviennent très coupants et trop déformés.



Figure2.8 : Tronçonneuse

2.6.2 Enrobage des échantillons

Nos échantillons étant minces, il était plus facile pour nous de les enrober à froid à l'aide d'une résine et d'un durcisseur plutôt que l'emploi d'une enrobeuse à chaud avec de la bakélite.

En vas faire not échantillons avec de la résine pour permet aux échantillons d'où les dimensions sont petites de les agrandir et pouvoir les tenir normalement, pour faire l'étude métallographique

Pour ce si on a utilisé un durcisseur et une résine



Figure 2.9 résine d'enrobage

2.6.3 Polisseuse

La polisseuse, montrée à la figure 2.10, a pour but d'éliminer l'irrégularité créée par l'enrobage et donner une surface lisse qui sera attaquée par un réactif chimique et observée au microscope optique.



Figure 2.10 Polisseuse

2.6.4 Polisseuse de finition

Afin de donner à nos échantillons un effet miroir on utilise une polisseuse de finition avec un tapis en feutre de granulométrie d'un micromètre, la figure 2.13 montre la polisseuse de finition utilisée dans notre laboratoire.



Figure 2.11 Polisseuse de finition

2.6.5 Microscope optique

Le microscope optique, montré à la figure 2.12 qui se trouve au laboratoire LTSM, est équipé de quatre objectifs d'agrandissement de 20X jusqu'à 100X, un oculaire de 10X.

Le microscope optique est équipé d'un appareil photo numérique afin de photographier les microstructures obtenues.



Figure 2.12 Microscope optique Du LTSM

2.6 L'essai de micro dureté

Les mesures ont été effectuées au niveau de laboratoire de recherche du LTSM de mécanique. L'essai de la micro dureté permet de mesurer la dureté des couches minces ou superficielles, les couches déposées par projection thermique. Dans notre cas les profils de la micro dureté sont pris sur une coupe transversale sous une charge

2.6.1 Machine de dureté et micro dureté Vickers/Knoop/Brinell FALCON 400

Le FALCON 400 améliore les méthodes d'essai de dureté conventionnelles, en s'efforçant d'éliminer l'influence de l'utilisateur sur les résultats des essais. La technologie avancée des capteurs de force utilise un système en boucle fermée de cellules de charge à commande électronique avec retour de force, afin d'obtenir une précision, une fiabilité et une répétabilité absolues, indépendamment de la force utilisée pour un essai.

Les fonctions logicielles innovantes du contrôle du flux de travail I-TOUCH™ permettent le stockage de fichiers, le réglage et le stockage de programmes d'essais, le réglage des limites, les conversions vers d'autres échelles de dureté, la configuration du système et les réglages d'échantillons convexes et concaves qui contribuent à la répétabilité et à la reproductibilité exceptionnelles des résultats des essais.

Échelles : Duromètres Micro Vickers, Vickers, Knoop, Brinell

Forces d'essai : 5gf – 31.25kgf (cellule de charge multiple, boucle fermée)

Microscope de mesure : Oculaire grossissant 15X

Objectifs : 5X, 10X, 20X, 50X, 100X

Tourelle à 6 positions : 2 pénétrateurs, 4 objectifs

Éclairage : LED d'alimentation

Commande.: Écran tactile couleur I-TOUCH™

Axe Z : Fonctionnement manuel, réglage fin sur le côté

Table XY : Manuelle, 100mm X 100mm, course 25mm X 25mm

Disposition des pièces : 150mm (H) X 170mm (P)

Sortie : USB

Caméra & automatisation : En option, logiciels d'automatisation IMPRESSIONS™, caméra dissimulée sous le couvercle supérieur, tables xy motorisées.



Figure 2.13Duromètres Innovatest Falcon 400

2.7 Essais d'érosion

Les essais d'érosion ont été réalisés à l'aide de la machine de grenailage. Pour les besoins de nos essais, nous avons conçu un porte échantillon, montré à la figure 2.14, qui permet de maintenir en place les plaques d'acier inox durant l'essai d'érosion. Ce porte échantillon était pivotant de tel sorte que l'on pouvait modifier l'angle que présentait la surface de l'échantillon par rapport à la buse d'abrasif. Cette buse était maintenue à une position fixe et disposée horizontalement par rapport à la surface de l'échantillon. L'angle d'attaque de l'abrasif et le temps étaient nos paramètres opératoires de l'essai d'érosion.



Figure 2.14: Porte échantillon des éprouvettes d'essai d'érosion.

Perte de poids

La mesure de la perte de poids de l'essai d'érosion a été effectuée à l'aide d'une balance de marque OHAUS et de précision de 0.1 mg. La balance de précision est montrée à la figure 2.16.



Figure 2.15: Balance de précision

2.8 Mesure d'épaisseur des revêtements

Pour mesurer l'épaisseur de revêtement, nous avons utilisé le microscope AmScope, muni d'une caméra numérique, est fourni avec un logiciel qui permettait de mesurer les épaisseurs des revêtements déposés par la projection thermique.

La figure 2.17 montre la photo du microscope AmScope utilisé.



Figure 2.16 : microscope digital camera

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les principaux résultats obtenus dans cette étude. Les commentaires et les interprétations seront donnés pour chaque étape.

3.2 Découpage des échantillons

Après plusieurs essais préliminaires, nous avons réussi à projeter des dépôts des alliages de trois poudres Chromtec (10680), Borotec (10009); Tungtec (10112) sur des échantillons. La figure 3.1 la forme de l'échantillon après découpage. On remarque que, comme la tôle utilisée est très mince, l'échantillon a tendance à se déformer facilement, ce qui compliquera notre tâche lors de la déposition. Un redressement est systématiquement effectué pour tous les échantillons avant déposition. Les échantillons ont une dimension de 70 x 50 mm.



Figure 3.1: Echantillon obtenu après le découpage

Après le découpage, les échantillons ont ensuite grenillés à l'abrasif d'alumine (corrindon) et ensuite soumis immédiatement à la projection thermique. La figure 3.2 montre l'aspect de la surface après grenailage.



Figure 3.2: Echantillon grenailé.

3.3 Projection thermique

Les paramètres opératoires de la projection thermique utilisés pour la torche SuperJet S sont présentés dans le tableau 3.1 ci-dessous. Ces paramètres varient selon les poudres utilisées et tel que recommandé par Castolin Eutectic.

Tableau 3.1 : Paramètres opératoires de la projection thermique avec torche SuperJet S

Paramètre	Poudre 10680	Poudre 10009	Poudre 10112
La torche utiliser	Torche Super Jet –S	Torche Super Jet –S	Torche Castodyn DS 8000
Oxygène	1.5 bar	1.5 bar	0.4bar
Acétylène	0.5 bar	0.5 bar	0.7bar
Distance de projections	10 cm	10 cm	10cm

Parmi les recommandations faites par Castolin Eutectic, il faut faire un préchauffage du substrat jusqu'à environ 300 °C, ensuite on dépose à 'froid' la poudre et enfin on termine cette opération de déposition par une refusion du revêtement ainsi formé. Cependant, nous avons constaté que le préchauffage des substrats minces déformait ces derniers. Il fallait donc trouver une autre solution pour palier à ce problème. Ce préchauffage est illustré dans la figure 3.3.

Parmi les solutions qui peuvent s'offrir à nous: éliminer tout simplement cette opération pour nos

substrats minces, augmenter la distance de projection, utiliser une poudre de rechargement dur avec une sous couche d'accrochage déposée par la torche Castodyn DS 8000.

Pour la pièce réelle qui sera revêtue par une des poudres qui sera retenue dans ce projet, nous avons préparé un porte échantillon, montré à la figure 3.4, qui limitera nous l'espérons, les déformations excessives du substrat lors de la déposition.

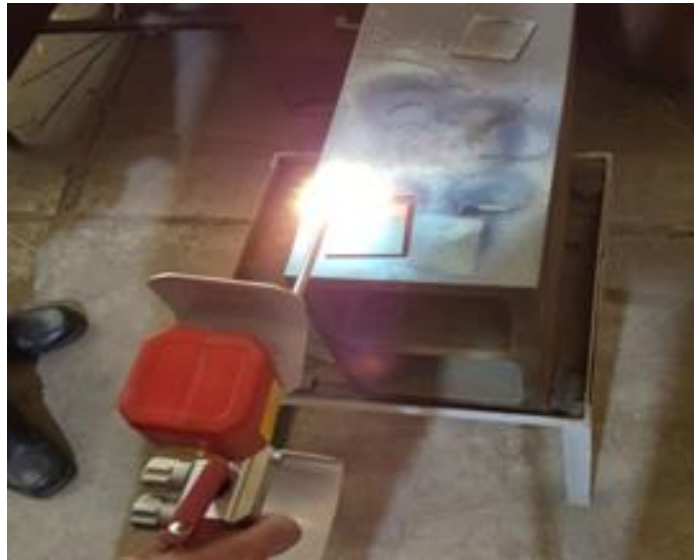


Figure 3.3 préchauffage



Figure 3.4: Porte échantillon pour substrat et support

Comme le cahier des charges du client n'était pas précis qu'au à l'épaisseur qu'il fallait atteindre, nous avons réalisé nos expériences avec plusieurs passes donc en prolongeant le temps de déposition. En pratique, pour faire simple, nous avons réalisé des dépositions de 4 et 6 passes pour chaque type de

poudre sans préchauffage avec une distance de déposition de 60 mm.

Les résultats de ces expériences sont montrés à la figure 3.5. L'aspect des surfaces varie selon le type de poudre utilisée. L'aspect très lisse est obtenu avec la poudre Borotec. Ensuite, la surface devient légèrement rugueuse à rugueuse pour respectivement des poudres de Chromtec et Tungtec.



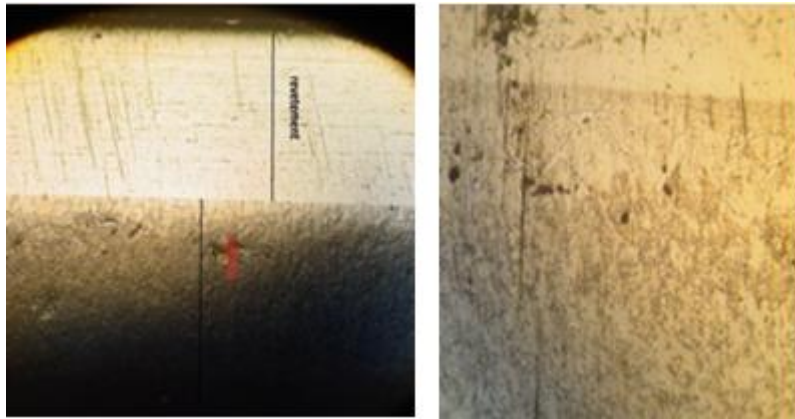
Figure 3.5: Aspects des revêtements déposés à l'aide de la torche SuperJet S

Nous avons découpé les substrats minces transversalement et nous les avons noyés dans une résine à froid pour assurer une observation aisée de leur surface. La figure 3.6 montre un exemple de cette préparation.



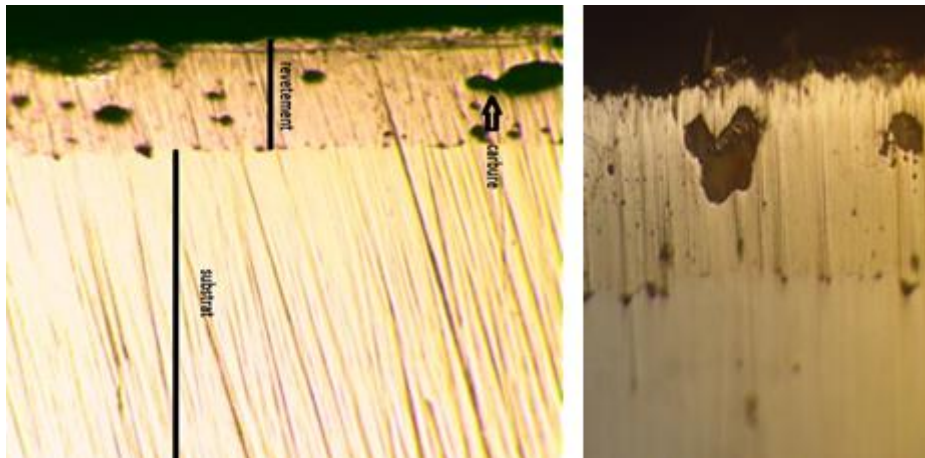
Figure 3.6 : Coupe transversale d'un revêtement avec son substrat (résine 'froide')

L'observation au microscope optique des trois types de substrats avec les différentes poudres déposées est montrée à la figure 3.7 et 3.8. Cette observation n'a pas concerné les revêtements Tungtec car ils sont trop rugueux.



400 X

800 X

Figure 3.7 : Coupe transversale du revêtement Borotec

400 X

800 X

Figure 3.8 : Coupe transversale du revêtement ChromTec

Il est évident, étant donné la technique de déposition, nous avons une très bonne adhérence du revêtement sur son substrat. En principe, nous avons une liaison métallurgique entre le revêtement et le substrat. En tout cas, la découpe des substrats avec une tronçonneuse n'a pas décollé le revêtement de son support.

Les revêtements sont denses et uniformes. Il y a des parties noires que nous assimilons aux carbures de chrome, de bore ou de tungstène selon la poudre déposée.

On note toutefois la présence de quelques oxydes liés aux conditions de projection, notamment à cause des distances un peu éloignées de celles recommandés par le fabricant.

Nous avons mesuré les épaisseurs de dépôts avec le microscope optique AmScope muni de sa caméra numérique et de son logiciel pour la mesure des distances micrométriques. Les résultats sont donnés au tableau 3.2. Au vu des résultats de déposition de la poudre Tungtec, qui a présenté une surface trop rugueuse, ce dépôt a été éliminé des essais d'érosion. Cependant, son épaisseur pour six passes était autour de 400 µm.

Tableau 3.2 Epaisseurs des revêtements

Eprouvette	Borotec 10009	Chromtec 10680	Substrat
Nombre de passe	6 passes	6 passes	
Epaisseur	1.57 mm	360 µm	0.8

Nous remarquons que pour la poudre Borotec, l'épaisseur déposée est presque 4.5 plus grande que celle de la Chromtec ou la Tungtec. Le rendement de déposition est donc meilleur alors que les poudres ont des prix d'achat équivalents. Sur la base du prix et du rendement, la poudre Borotec semble pour l'instant beaucoup plus rentable que les deux autres poudres.

3.4 Essais de microdureté

Les mesures de microdureté ont été effectuées avec un appareil de marque Innovatest Falcon 400, équipé d'un écran digital. Les mesures de microdureté Vickers HV ont été effectuées sur une coupe transversale sous une charge de 500 kg de force. Pour avoir un bon profil de la microdureté, nous avons pris 10 points. La moyenne de la dureté pour les deux revêtements Borotec et Chromtec est donné au tableau 3.3.

Tableau 3.3: Microdureté de revêtements déposés

Revêtement	HRC
Borotec	66.3
Chromtec	31

Ces valeurs sont environ équivalentes à celles proposées par le fabricant. Ceci nous indique que les paramètres opératoires arrêtés pour la projection thermique sont correctes quand bien même que nous les avons adaptés pour les tôles minces.

3.5 Essais d'érosion

L'essai d'usure de type érosive consiste à placer l'échantillon dans l'appareil de grenailage à une distance de 10 cm de la buse de projection sur lequel on projette à grande vitesse des particules de Corundum à l'aide d'air comprimé sous une pression de 4.8 bars. L'angle d'attaque des particules abrasives est varié de 30°, 45°, 60° et 90°. La masse initiale de l'éprouvette est mesurée à l'aide de la balance de précision à 0.1 mg. L'échantillon est placé dans la grenailleuse et l'essai est démarré pour un angle d'attaque donné. Les temps d'essai étaient de 30, 60 et 120 secondes pour chaque angle d'attaque. A chaque temps d'arrêt, l'échantillon est enlevé et sa nouvelle masse est mesurée. On change l'angle d'attaque, et l'opération est répétée.

L'expression de la perte de masse Δm est calculée par:

$$\Delta m = m_i - m_f \text{ Avec}$$

m_i : la masse initiale de l'échantillon (mg)

m_f : la masse finale (mg) de l'échantillon.

Des essais préliminaires ont été réalisés pour déterminer le temps optimal d'essai qui correspondait pour nous à une usure mesurable sans perforation du revêtement.

Pour les revêtements de Tungtec, nous avons quand réalisé quelques essais pour confirmer ou infirmer notre décision d'écarter cette poudre. Les revêtements avec leur support sont montrés sur la figure 3.9. Après 30 secondes de durée d'essai, les revêtements à base de Tungtec étaient déjà perforés. Ceci nous conforte dans notre décision de les écarter à cause des paramètres opératoires que nous avons choisi pour les substrats mince.

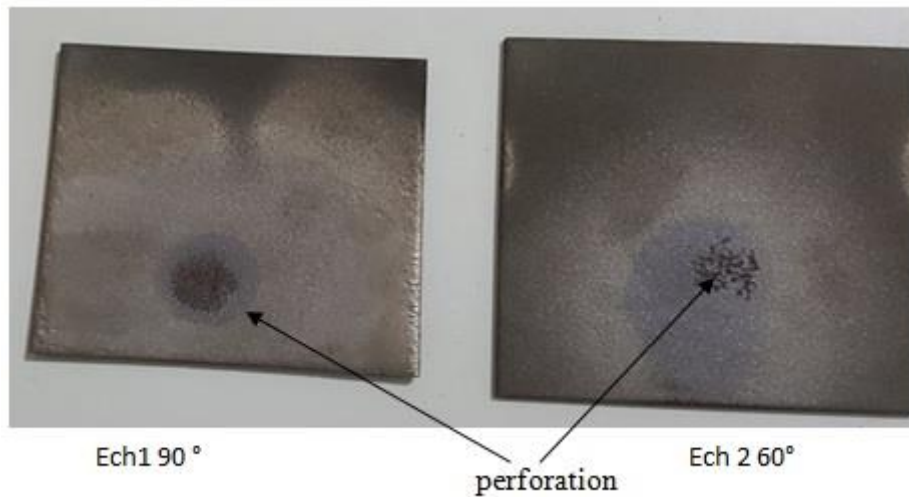


Figure 3.9: Echantillons revêtus de Tungtec après essais d'érosion.

Les aspects des surfaces des échantillons revêtus respectivement de Borotec et de Chromtec, après essai d'érosion, sont montrés aux figures 3.10 et 3.11.

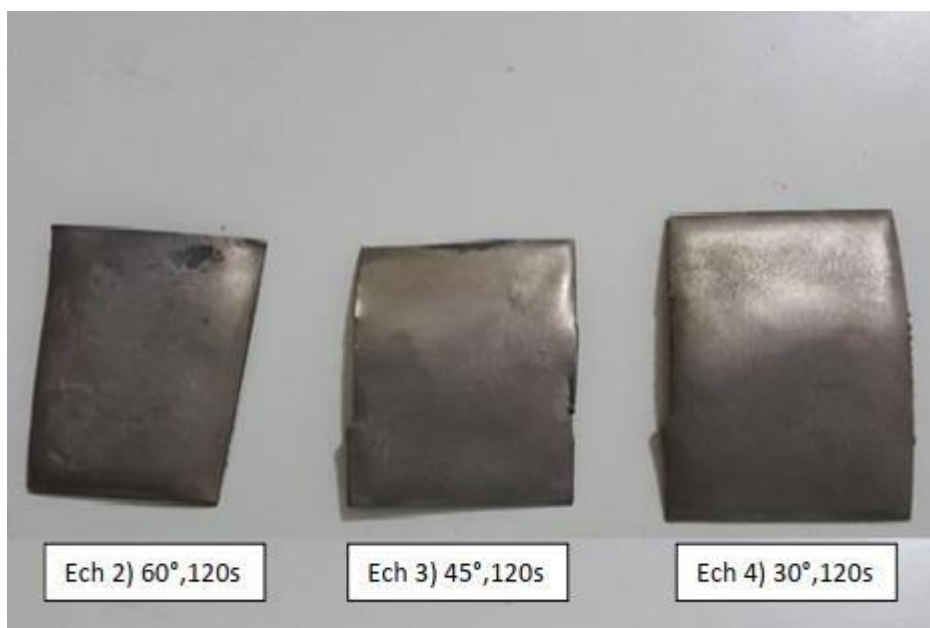


Figure 3.10: Echantillons revêtus de Borotec après essais d'érosion.

Pour le revêtement poudre Chromtec les figures 3.10. montrent l'aspect des surface des échantillons à la fin des essais d'érosion.

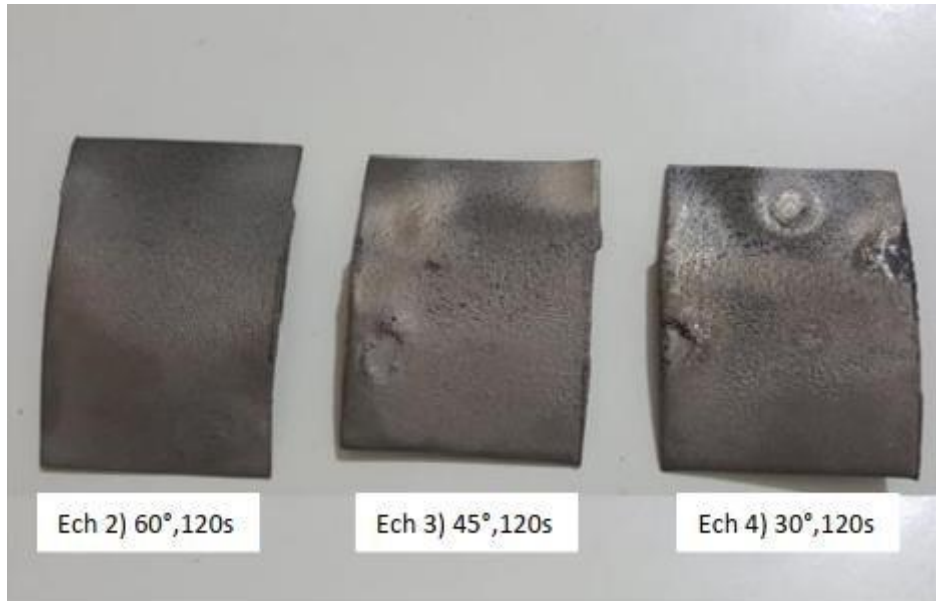


Figure 3.11: Echantillons revêtus de Chromtec après essais d'érosion.

Nous remarquons que les éprouvettes ayant reçues un revêtement ou dépôt à base de Chromtec ont beaucoup plus souffert de l'usure érosive comparativement aux revêtements de Borotec. Les tableaux 3.4 et 3.5 regroupant les résultats des essais d'usure érosive à 30, 45, 60 et 90° pour les temps de 30, 60 et 120 secondes des revêtements de Chromtec et Borotec sont montrés ci-dessous. Les figures 3.12 et 3.13 traduisent les résultats des tableaux 3.4 et 3.5.

La figure 3.6 ne regroupe que les données obtenus à partir des essais des revêtements Borotec et Chromtec testés à différents angles d'attaque durant 120 secondes. Ces deux courbes résument les essais d'usure érosive mieux les comparaisons des deux revêtements soumis aux mêmes sollicitations d'usure. L'allure des deux courbes respectent la théorie de l'usure érosive.

En général, pour les matériaux ductiles, nous observons une usure maximale entre 30° et 45° car dans ce cas le labourage de la surface prédomine et l'enlèvement de la matière se fait facilement. Lorsque nous avons un matériau fragile, l'usure érosive est maximale autour de 60° et 90°, selon la nature du matériau, car l'impact provoque d'abord une fissuration puis un enlèvement de la matière. Cette théorie générale de l'érosion est bien explicitée dans la figure 3.7.

Tableau 3.4: Résultats des essais d'érosion pour les éprouvettes revêtues de Chromtec.

Durée de l'essai: 30 s			
Echantillon / angle	Avant essai	Fin essai	Δm
	Poids (g)		
Ech1 / 90°	30.7828	30.6395	0.1433
Ech2 / 60°	34.9519	34.7368	0.2151
Ech3 / 45°	32.3437	32.1147	0.229
Ech4 / 30°	29.8476	29.6712	0.1764
Durée de l'essai: 60 s			
Echantillon / angle	Avant essai	Fin essai	Δm
	Masse		
Ech1 / 90°	30.6395	30.3193	0.3202
Ech2 / 60°	34.7368	34.5463	0.1905
Ech3 / 45°	32.1147	31.9188	0.1159
Ech4 / 30°	29.6712	29.4768	0.1944
Durée de l'essai: 120 s			
Echantillon / angle	Avant essai	Fin essai	Δm
	Masse		
Ech1 / 90°	30.3193	29.9073	0.412
Ech2 / 60°	34.5463	34.2147	0.3316
Ech3 / 45°	31.9188	31.4684	0.4504
Ech4 / 30°	29.4768	29.3145	0.1623

Figure 3.12: Essais d'érosion du revêtement Chromtec en fonction de l'angle d'attaque.

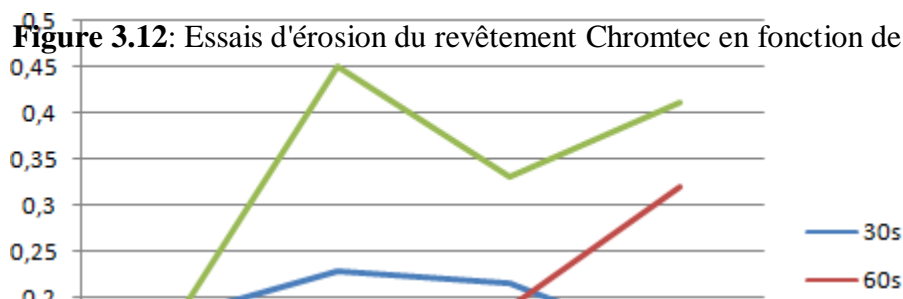


Tableau 3.5: Résultats des essais d'érosion pour les éprouvettes revêtues de Borotec.

Durée de l'essai: 30 s			
Echantillon / angle	Avant essai	Fin essai	Δm
	Poids (g)		
Ech1 / 90°	45.8113	45.4855	0.3258
Ech2 / 60°	36.8387	36.6140	0.2247
Ech3 / 45°	31.0305	30.8679	0.1626
Ech4 / 30°	53.0091	52.8835	0.1256
Durée de l'essai: 60 s			
Echantillon / angle	Avant essai	Fin essai	Δm
	Masse		
Ech1 / 90°	45.4855	45.2169	0.2686
Ech2 / 60°	36.6140	36.1002	0.5138
Ech3 / 45°	30.8679	30.5412	0.3267
Ech4 / 30°	52.8835	52.6882	0.1953
Durée de l'essai: 120 s			
Echantillon / angle	Avant essai	Fin essai	Δm
	Masse		
Ech1 / 90°	45.2169	44.7517	0.4652
Ech2 / 60°	36.1002	35.5240	0.5762
Ech3 / 45°	30.5412	30.3198	0.2214
Ech4 / 30°	52.6882	52.5092	0.1790

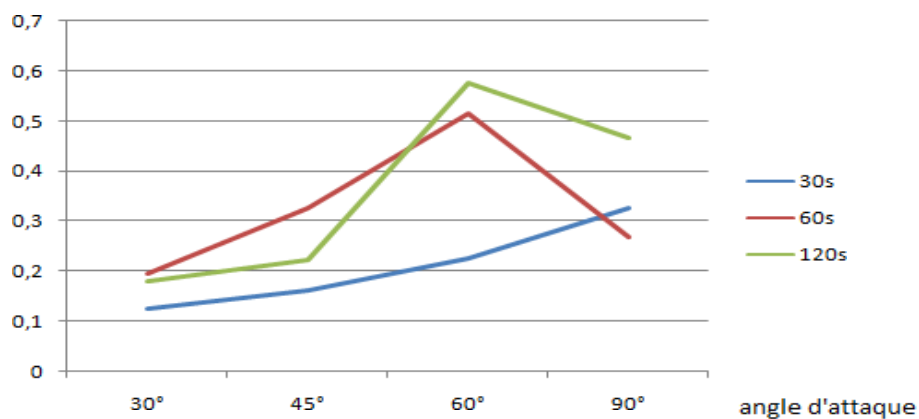


Figure 3.13: Essais d'érosion du revêtement Borotec en fonction de l'angle d'attaque.

Aux angles d'impact verticaux, le revêtement dur a tendance à se fracturer plus facilement que le revêtement ductile. Cette tendance de l'usure érosive vis à vis de la dureté du revêtement s'inverse lorsque l'angle d'attaque est autour de 45° comme le confirment les essais d'érosion pour une durée de 120 secondes. Le revêtement à base NiCrBSiFeC présente une meilleure tenue à l'usure érosive notamment entre 45° et 90° qui sont les angles de sollicitations des éprouvettes sur site réel. Le revêtement Chromtec présente quand même une bonne résistance à l'usure érosive et plus apte à supporter les impacts que le Borotec. Une optimisation des paramètres opératoires de déposition doit être faite dans les études futures et devrait confirmer une très bonne tenue à l'usure érosive. Tous ces essais devraient être complétés par des essais sur site pour le choix définitif de la composition chimique du revêtement à retenir pour cette application.

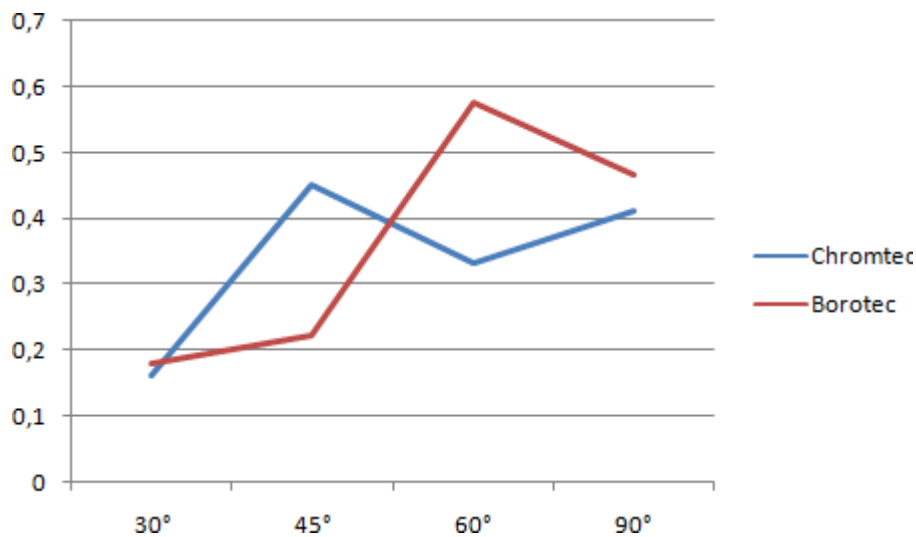
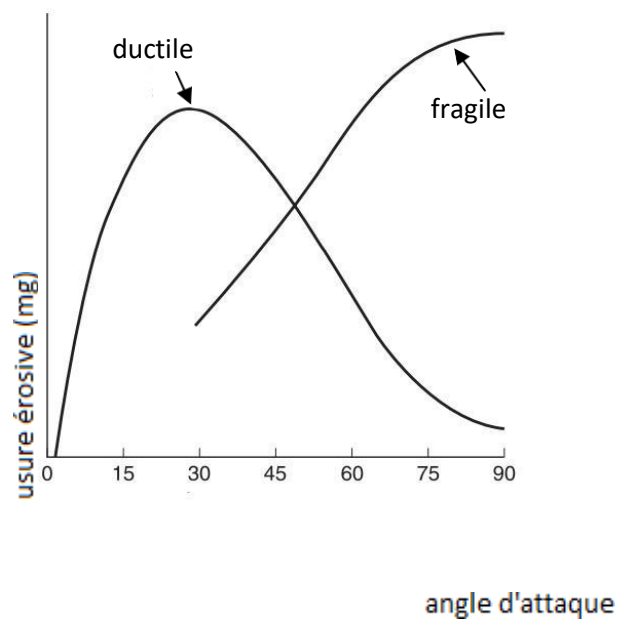


Figure 3.6: Usure érosive des revêtements Borotec et Chromtec durant 120s.

Ce qui est important à retenir ici, c'est que à ce stade des essais, le revêtement Borotec semble plus approprié pour l'application que l'on s'était fixée.



3.7 Conclusion

L'objectif de ce travail est de déposer des revêtements durs sur des tôles minces en acier inoxydable qui doivent résister à l'usure et à l'impact. L'importance de l'aire de la surface du substrat risquait de poser des problèmes au niveau des déformations qu'il pouvait subir. La projection thermique à froid était la mieux adaptée pour résoudre ce problème. Différentes poudres ont été testées et une optimisation des paramètres opératoires de la projection a été effectuée. Des essais de microdureté et d'érosion ont été réalisés sur les dépôts préparés. Les résultats ont montré que:

- Le suivi du protocole de déposition n'était pas adapté pour notre application. Les paramètres opératoires de déposition ainsi fixés déformaient trop les tôles et leur montage devenait impossible en situation réelle.
- Seules deux poudres ont été qualifiées pour ce type d'application.
- La poudre Borotec présentait un très bon rendement de déposition. Le revêtement était épais, dense et uniforme. La poudre Chromtec s'est étalée moins facilement que celle de la Borotec. Il faudra à l'avenir optimiser davantage ses paramètres de déposition.
- Le revêtement Borotec a une usure érosive beaucoup moins importante que le revêtement Chromtec. Cependant, les comportements en usure érosive sont très proches entre les deux revêtements malgré une dureté du revêtement double de celle du revêtement Chromtec.
- Une des raisons de ce comportement est que le revêtement Chromtec est beaucoup plus ductile que le revêtement Borotec. Aux angles d'impact verticaux, le revêtement dur a tendance à se fracturer plus facilement que le revêtement ductile.

Le revêtement Borotec semble plus adapté pour l'application que l'on s'était fixée. Des essais sur site avec les deux échantillons, Borotec et Chromtec, pourront confirmer définitivement cette tendance

Référence bibliographique

- [1] Levêque, R. : Traitements et revêtements de surface des métaux. Paris: Dunod,2007.
- [2] Advanced Coating – <http://www.advanced-coating.com/projection.htm> - consulté le09/01/2014.
- [3] Proner, A. : M 1645 - Revêtements par projection thermique. Paris : Techniques de l'ingénieur,1999.
- [4] Surfatec - <http://www.surfatec.org/> - consulté le 09/01/2014
- [5] <http://www.yiehunited.com/fr/portfolio-view/310s-stainless-steel-plate>
- [6] Ricaud, M. : Les fumées de soudage et des techniques connexes. INRS – Aide Mémoire Technique – ED6132. Juin 2012.
- [7] Chadwick, J.K., H.K. Wilson, and M.A.: White: An investigation of occupational metal exposure in thermal spraying processes. The Science of the Total Environment 199(1-2): 115-124 (1997).
- [8] Heriaud-Kraemer, H., G. Montavon, S. Hertert, H. Robin, and C. Coddet : Harmful risks for workers in thermal spraying: A review completed by a survey in a french company. Journal of Thermal Spray Technology 12(4): 542-554 (2003).
- [9] Petsas, N., G. Kouzilos, M. Vardavoulias, and A. Moutsatsou : Worker exposure monitoring of suspended particules in a thermal spray industry. Journal of Thermal Spray Technology 16(2): 214-219 (2007).
- [10] Schaller, K., G. Csanady, J. Filser, B. Jüngert, and H. Drexler : Elimination kinetics of metals after an accidental exposure to welding fumes. Int. Arch. Occup. Environ. Health 80(7): 635-641 (2007).
- [11] Bemer, D., R. Regnier, I. Subra, B. Sutter, M.T. Lecler, and Y. Morele : Ultrafine particles emitted by flame and electric arc guns for thermal spraying of metals. The Annals of Occupational Environment 54(6): 607-614 (2010).

[12] Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (2008) : Nomenclature des activités françaises NAF rev.2

[13] Pôle emploi – <http://www.pole-emploi.org/statistiques/selectionstatistique> - consulté le 09/09/2013

[14] SIRENE – <http://www.sirene.fr/sirene/public/accueil> - consulté le 8/11/2011

[15] Rao, P.S.R.S: Sampling Methodologies with applications. Editions Chapman and Hall (2000)

[16] <https://www.castolin.com/fr-FR/product/superjet-s-kits>

