

Septembre 2005

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

P0007/05 B

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur

THEME :

*Etude du comportement en
micropercussion d'un revêtement en
acier inoxydable élaboré
par projection thermique*

Proposé et dirigé par :

Mr M.LARIBI

Etudié par :

BENELOUEZZANE
Abderrahmane

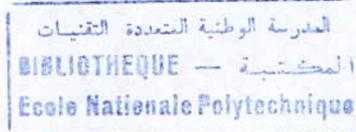
Promotion 2004-2005

Septembre 2005

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie



Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur

THEME :

*Etude du comportement en
micropercussion d'un revêtement
en acier inoxydable élaboré
par projection thermique*

Proposé et dirigé par :

Mr M.LARIBI

Etudié par :

BENELOUEZZANE
Abderrahmane

Promotion 2004-2005

ملخص:

هذه الدراسة تهدف إلى إعداد متعددة المواد عن طريق القذف الحراري بقوس كهربائي لغلاف هو من فولاذ لا يتأكسد على سبيكتين، الأولى من فولاد XC18 و الثانية من الألومنيوم AU4G .

لقد اهتمنا في دراستنا بالخواص الفيزيوكيميائية (المجهر الضوئي ، المجهر الإلكتروني) لمختلف المجموعات.

الكلمات المفتاحية:

القذف الحراري ، الفولاذ XC18 ، الفولاذ 18-8 ، الألومنيوم AU4G ، الخواص الفيزيوكيميائية.

Résumé:

Cette étude consiste à élaborer deux multimatériaux par projection thermique. Le revêtement est un acier inoxydable 18/8 et les substrats sont : l'acier XC18 et l'alliage d'aluminium AU4G. La sous-couche d'adhérence est un alliage Cu-Al.

On a procédé à une caractérisation physico-chimique et une étude du comportement en micropercussion des différents systèmes. On a étudié l'influence de plusieurs paramètres sur la micropercussion à savoir le nombre de cycles, la distance bille-échantillon, la lubrification et le traitement thermique.

Les résultats ont montré que le diamètre de l'empreinte augmente avec le nombre de cycles et avec la distance bille-échantillon. La lubrification ainsi que le post-traitement thermique diminuent la déformation du revêtement.

Mots clés: Projection thermique, Acier Inox, Acier XC18, Alliage AU4G, Micropercussion, Lubrification, Traitement thermique.

Abstract :

This study consists first in elaboration of two multimaterials using thermal spraying of an 18/8 stainless steel. The two substrates are respectively: XC18 steel and AU4G aluminium alloy. The adhesion sub-layer is consisted of a Cu-Al alloy. The second part consists in a physico-chemical characterisation and a study of the different systems behaviour under impact testing. The influence of parameters such as cycle's number, ball-specimen distance, oil lubrication and heat treatment has been studied.

The obtained results showed that spherical deformation diameter increases vs cycles number or ball-specimen distance. Lubrication and heat treatment decreased deformation of the coating.

Keywords : Thermal spraying, Stainless steel, XC18 steel, AU4G alloy, Impact test, Lubrication, Heat Treatment.

DEDICACE

A la mémoire de ma grand-mère,

*A mes chers parents pour leurs sacrifices à mon
égard, que Dieu les protège,*

A mes frères,

A mes tantes et toute ma famille,

A tout ceux qui m'aiment,

Je dédie ce travail

A. Benelouezzane

Remerciements

Je tiens à exprimer ma sincère et profonde gratitude à tout ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

Je remercie Mr Mercak Laribi pour avoir proposé ce sujet, de m'avoir conseillé et encadré.

Mes remerciements vont aussi à Mr Nadir Mesrati pour m'avoir donné l'occasion de réaliser mes travaux de caractérisation en France.

Je remercie Mr Daniel Tréheux directeur du laboratoire STMS de m'avoir accueilli dans son labo.

Ma reconnaissance à tout le personnel du laboratoire STMS pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Mes plus vifs remerciements vont à Mr Bernard Beaugiraud pour sa disponibilité et son aide précieuse.

Je remercie Mr M.E. Dheghlal d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Je remercie Mrs Yousfi et Mesrati d'avoir accepté de juger mon travail.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Place de la projection thermique parmi les traitements de surface

A. Traitements de surface	06
--	-----------

B. La projection thermique	09
---	-----------

I.1. L'invention	09
-------------------------------	-----------

I.2. Principe de fonctionnement	11
--	-----------

I.3. Types de projection thermique	13
---	-----------

I.3.1. Projection thermique a la flamme	13
--	-----------

I.3.1.1. Projection flamme-poudre

I.3.1.2. Projection flamme-fil

I.3.1.3. Projection flamme avec refusion

I.3.1.4. Projection hypersonique

I.3.1.5. Les gaz de projection

I.3.2. Projection par arc électrique entre deux fils	22
---	-----------

I.3.3. Projection plasma	24
---------------------------------------	-----------

I.4. Caractéristiques générales des dépôts

I.4.1. Structure métallurgique	28
--------------------------------------	----

I.5.2. Méthodes non-destructrice et destructrice de caractérisation des revêtements	28
---	----

I.5.3. Adhérence	29
------------------------	----

Chapitre II : Le micropercuteur

II.1. Introduction	32
---------------------------------	-----------

II.2. Description du micropercuteur	32
--	-----------

II.3. Etude du mode de propulsion	35
--	-----------

II.3.1. Stylet électromagnétique	35
--	----

II.3.2. Stylet pneumatique	38
----------------------------------	----

II.3.3. Propriétés des pointes 39

Chapitre III : Etude expérimentale

A. Techniques expérimentales 42

III.1. Choix des matériaux 42
 III.2. Préparation des échantillons 45
 III.3. Métallisation des éprouvettes 46
 III.4. Post traitement thermique 48

B. Techniques d'analyse et de caractérisation 50

III.5. Analyse métallographique 50
 III.6. Etude de microdureté 54
 III.7. Micropercussion 59
 III.7.1. Conditions expérimentales 59
 III.7.2. Analyse des impacts par microscopie optique 60
 III.7.3. Interprétation des courbes 66
 III.7.4. Analyse des impacts par microscopie électronique à balayage 67
 III.7.5. Interprétation des microscopies 76

Conclusion et perspectives 79

Références bibliographiques 83

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

Dans la compétitivité industrielle d'aujourd'hui, c'est un atout considérable que de pouvoir réaliser des produits qui ne s'usent pas, qui résistent à la corrosion et qui conservent dans le temps leurs propriétés générales.

Grâce aux réponses toujours plus précises qu'ils apportent à des situations industrielles toujours plus diversifiées et exigeantes, les traitements de surface sont devenus incontournables.

Les matériaux revêtus sont depuis quelques années l'objet d'une extraordinaire évolution. Des secteurs industriels de plus en plus nombreux comme la mécanique, l'électronique, ou la chimie sont concernés par des applications de plus en plus variées et performantes.

Les raisons d'utilisation sont diverses. On peut citer la diminution des phénomènes de corrosion, une meilleure résistance à la friction, au frottement, à la fatigue et au vieillissement, l'obtention de surfaces lisses, même si la raison la plus importante reste l'abaissement des coûts de fabrication. Néanmoins, il faut savoir que la protection contre la corrosion et l'usure représente 70% des besoins. Reste que, quelque soit le but du revêtement, le problème qui se pose est souvent le même, et il concerne les propriétés d'utilisation et les performances des systèmes revêtus qui dépendent beaucoup de l'adhérence entre le substrat et le revêtement.

Pour cela le choix du revêtement et du type de traitement s'avère très important et conditionne la durée de vie du système. Il doit être choisi suivant des critères très précis selon les sollicitations auxquelles il sera soumis, que ce soit des sollicitations internes (contraintes mécaniques, fatigue, fluage ...); sollicitations externes (frottement, abrasion, température, érosion, fretting, ...), ou bien sollicitations environnementales (corrosion, oxydation, attaque chimique, chaleur ...).

Parmi la diversité des traitements de surface utilisés, la technique de projection thermique a pour objectif la mise en place de couches protectrices ou le rechargement des matériaux endommagés.

La projection thermique va permettre de conférer à chaque zone la propriété de surface nécessaire à son fonctionnement, tout en autorisant des choix de matériaux de base compatibles avec les propriétés à cœur recherchées.

Notre travail portera sur l'étude du comportement en micropercussion d'un revêtement d'acier inoxydable que l'on a déposé séparément sur deux substrats ayant des propriétés différentes mais très recherchées. Le premier substrat est un acier de nuance commerciale XC18. Le second substrat est un alliage d'aluminium, en l'occurrence le AU4G.

Cette étude consiste principalement à soumettre les différents multimatériaux à des chocs mécaniques à l'aide d'un perceur. On étudiera l'effet de :

- La variation de la distance bille – échantillon,
- Le diamètre (de la bille) du perceur,.
- Le nombre de cycles,
- La lubrification (huile)...

Pour cela notre travail sera divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre portera sur les différents types de traitements de surface, leur principe, caractéristiques et domaines d'utilisation. Ensuite sera développée la projection thermique ainsi que son principe général de fonctionnement, les différents équipements et procédés utilisés et les différents domaines d'utilisation. Nous donnerons également un petit aperçu sur les différents dépôts pouvant être obtenus, leur formation et leur structure ainsi que quelques caractéristiques générales (adhérence, dureté, matériaux projetables et gaz de projection...).

Le dispositif industriel de marquage ayant permis de réaliser les chocs mécaniques cycliques, à savoir le microperceur, sera présenté dans le chapitre 3. Seront décrits aussi dans ce chapitre le fonctionnement du dispositif et les différents modes de propulsion dont est pourvu la machine ainsi que les différents stylets et pointes et autres accessoires composant la machine.

Le quatrième chapitre est réservé à la présentation des résultats expérimentaux. On présentera tout d'abord l'étude métallographique qui mettra en évidence les micrographies de l'interface des différents multimatériaux.

La filiation de microdureté HV sera présentée en deuxième étape.

La troisième partie de ce chapitre concerne le vif de l'étude, à savoir la résistance à la percussion du revêtement d'acier inoxydable.

Ce comportement est basé sur l'interprétation des graphes présentant l'évolution du diamètre des empreintes en fonction du nombre de cycles pour les différents multimatériaux.

L'influence du type de substrat (acier ou alliage d'aluminium) ainsi que la présence ou pas de la sous-couche et aussi l'effet du post-traitement seront mis en évidence.

Cette partie de l'étude est complétée par les observations des fonds de calottes au microscope électronique à balayage et bien sûr la mise en évidence de phénomènes susceptibles de se produire.

Ce travail sera finalement clôturé par une conclusion générale ainsi que des recommandations.



Chapitre



Place de la projection parmi
Les traitements de surface

Dans ce premier chapitre nous tâcherons de donner un aperçu sur les différents types de traitements de surface, leur principe et caractéristique ainsi que les principales techniques utilisées en traitement de surface.

Sera présentée principalement la projection thermique ainsi que son principe général de fonctionnement, les différents équipements et procédés utilisés et les différents domaines d'utilisation.

Nous donnerons un aperçu sur les différents dépôts pouvant être obtenus, leur formation et leur structure ainsi que quelques caractéristiques générales (adhérence, dureté, matériaux projetables et gaz de projection ...).

A. TRAITEMENT DE SURFACE

On entend par traitement de surface toutes les opérations mécaniques, chimiques, électroniques ou physiques qui ont pour conséquence de modifier l'aspect ou la structure de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données.

La but des traitements de surface est fort variable : ils peuvent tendre à améliorer les propriétés optiques (ou l'aspect esthétique) la résistance à la corrosion sèche ou humide, la tenue de surface soudée, les conductivités, les propriétés mécaniques, la résistance au frottement et à l'usure [1].

Les techniques de traitement de surface se répartissent en quatre familles :

- les revêtements par voie sèche ou humide ;
- les traitements de conversion (réaction superficielle entre le matériau d'apport et le substrat) ;
- les traitements de diffusion (le matériau d'apport diffuse dans le substrat) ;
- les transformations structurales (modification de la structure métallurgique du substrat) [2].

Le choix d'un procédé est directement issu d'un certain nombre de facteurs, parmi lesquels on peut citer :

- les conditions en service de la pièce traitée ;
- la forme de la pièce ;
- la nature du matériau de base ;
- la nature du matériau d'apport le plus performant [3].

Le tableau I-1 présente les principales techniques utilisées en traitement de surface. Le tableau I-2 donne les propriétés et caractéristiques des revêtements.

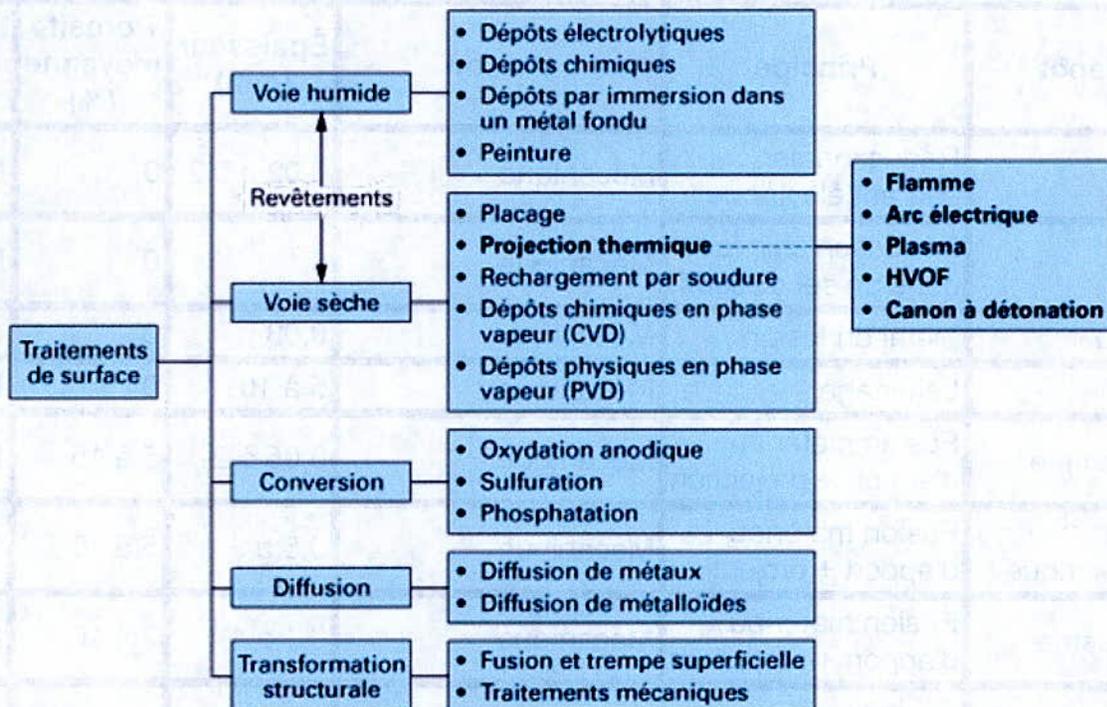


Tableau I-1 : Principales techniques utilisées en traitement de surface [2].

Type de dépôt	Principe	Liaison	Épaisseur (mm)	Porosité moyenne (%)	Interaction avec le substrat	
Électrolytique	Réduction par courant électrique	Mécanique	0,02 à 0,2	0	Non	
Chimique	Réduction chimique dans un sel dissous	Mécanique	0,1	0	Non	
Par immersion	Métal en fusion	Mécanique	0,03	0	Non	
Placage	Laminage	Mécanique	5 à 10	0	Non	
Projection thermique	Flamme	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,05 à 2	5 à 15	Non
	Arc électrique	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,5 à 3	5 à 15	Non
	Plasma	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,1 à 1	2 à 10	Non
	HVOF	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,1 à 1	< 3	Non
	Canon à détonation	Fusion matériau d'apport + projection	Mécanique	0,1 à 1	< 3	Non
	Projection avec refusion	Refusion sur support après projection	Mécanique + diffusion	0,5 à 1,5	< 2	Diffusion
Soudage	Flamme	Fusion métal apport	Métallurgique	1 à 2	0	Fusion
	Arc, atmosphère réductrice	Fusion métal apport	Métallurgique	2 à 7	0	Fusion
	Arc, atmosphère inerte	Fusion métal apport	Métallurgique	2 à 7	0	Fusion
	Plasma, arc transféré	Fusion métal apport	Métallurgique	1 à 5	0	Fusion
Phase vapeur	PVD	Évaporation métal d'apport	Diffusion	0,01	0	Non
	CVD	Évaporation métal d'apport	Diffusion	0,005	0	Non

Tableau I-2 – Propriétés des principaux types de rechargement [2].

B. La projection THERMIQUE

I.1. L'invention:

L'apparition des revêtements par projection thermique date de 1909 avec l'invention du Dr Schoop. Ce dernier a eut l'idée d'utiliser un chalumeau oxyacétylénique pour projeter un métal en fusion; ceci après avoir examiné les traces laissées sur un mur par des balles de plomb d'une carabine. En effet grâce à son bas point de fusion (327°C), le plomb pouvait fondre localement lors de l'impact, d'où l'idée de projeter des métaux liquides. Le premier appareil à métalliser fut basé sur ce principe.

A partir de 1914 cette technique se développe sous le nom de SHOOPAGE et consiste principalement à projeter du zinc et de l'aluminium, matériaux aisément fusibles, pour assurer la protection de l'acier. Les premières applications industrielles sont aussi apparues en 1914 dans le domaine militaire (projection d'étain sur la face arrière d'obus), dans celui de l'anticorrosion (dépôts d'aluminium), ou encore en décoration (dépôts de bronze). Dès 1914 également, des essais de projection par arc électrique furent réalisés.

C'est après la Seconde Guerre mondiale que le domaine d'application de la projection thermique s'est élargi à l'industrie mécanique (apport de revêtement d'acier dans le cadre de la rénovation de pièces usagées), puis à l'industrie aéronautique.

Depuis l'invention d'origine de Schoop, de nombreuses évolutions ont permis une diversification et un large accroissement des potentialités de la technique. La recherche de propriétés de surface spécifiques sur les pièces en service, dont les conditions d'emploi sont de plus en plus sévères, a permis le développement de nouveaux procédés [plasma, canon à détonation, HVOF High Velocity Oxygene Fuel...] (figure I-1) et de nouveaux matériaux associés (céramiques, carbures, composites, superalliages...).

Aujourd'hui, les objectifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs vont dans le sens de la réduction des coûts et de l'amélioration des

performances. Les pièces constitutives de machines ou d'équipements de dimensions de plus en plus réduites, doivent résister à des sollicitations nombreuses :

- Sollicitations internes : contraintes mécaniques, fatigue, fluage... ;
- Sollicitations externes : frottement, abrasion, température, érosion, fretting... ;
- Sollicitations environnementales : corrosion, oxydation, attaque chimique, chaleur...

Les revêtements par projection thermique sont appliqués à un substrat pour donner à une surface spécifique une qualité qu'elle n'a pas à l'origine. Ainsi, la résistance apparente d'une pièce est garantie par le substrat, et le revêtement offre des qualités de surface supérieures telles que la résistance à la corrosion, à l'usure ou à la chaleur.

La projection thermique va permettre de conférer à chaque zone la propriété de surface nécessaire à son fonctionnement, tout en autorisant des choix de matériaux de base compatibles avec les propriétés à cœur recherchées.

La technique des revêtements par projection thermique est largement exploitée dans l'industrie aérospatiale et l'industrie de production d'énergie électrique pour les sections neuves et réusinées ainsi que pour les pièces des moteurs d'avion et des turbines à gaz, des compresseurs et des pompes. Les propriétés de certains revêtements ne peuvent être "fabriquées" que par projection thermique, en utilisant principalement les métaux, céramiques, carbures et composites ainsi que les mélanges de divers matériaux.

Si la protection anticorrosion reste le cas d'application le plus fréquent (voir figure I-2), certains secteurs comme l'automobile présentent des applications multiples, parmi lesquelles on peut citer à titre d'exemples : soupapes, segments de piston, anneaux de synchro, disques d'embrayage, sondes lambda, cylindres, pompes, platines d'alternateurs, plaquettes de freins... [2] [4] [5] [6].

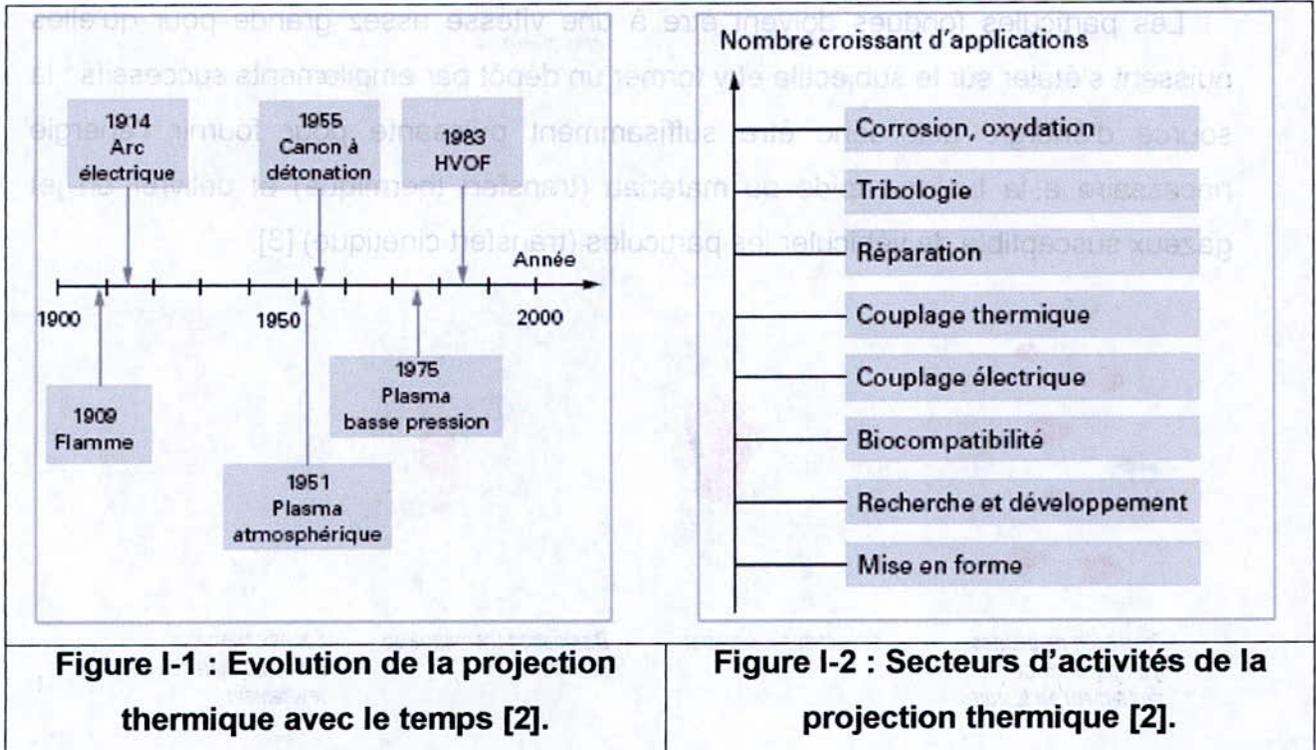


Figure I-1 : Evolution de la projection thermique avec le temps [2].

Figure I-2 : Secteurs d'activités de la projection thermique [2].

I.2. Principe de fonctionnement :

Le matériau d'apport solide sous forme de poudre ou de fil est porté à l'état liquide ou pâteux au moyen d'une source de chaleur appropriée (flamme ou arc). Il est pulvérisé sous forme de gouttelettes au moyen d'un courant gazeux. Ce courant gazeux peut être constitué soit par un gaz auxiliaire qui est généralement de l'air, parfois de l'argon ou de l'azote, mélangé aux gaz provenant de la combustion (flamme oxy-gaz) ou de l'ionisation des gaz de ceux-ci (plasma d'arc).

Les particules provenant de la pulvérisation sont véhiculées à grande vitesse :

- Environ 100 à 200 m/s pour les pistolets à gaz.
- De l'ordre de la vitesse du son pour les pistolets à plasma d'arc [4].

Les particules vont s'écraser sur le support placé à une distance convenable. Au moment de l'impact sur le substrat les particules se présentent à l'état pâteux, au moins en périphérie.

Les particules fondues doivent être à une vitesse assez grande pour qu'elles puissent s'étaler sur le substrat et y former un dépôt par empilements successifs ; la source d'énergie doit donc être suffisamment puissante pour fournir l'énergie nécessaire à la fusion rapide du matériau (transfert thermique) et délivrer un jet gazeux susceptible de véhiculer les particules (transfert cinétique) [3].

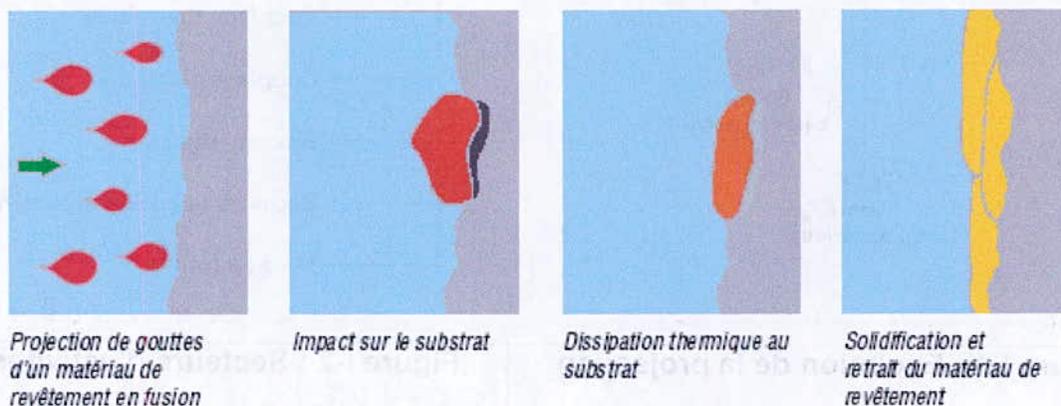


Figure I-3 : Principe de formation des couches [6].

Deux sources d'énergie sont employées pour déposer les matériaux suivant la technique de projection thermique : *la flamme ou le courant électrique*.

La figure I-4 regroupe les différentes sources d'énergie en projection thermique.

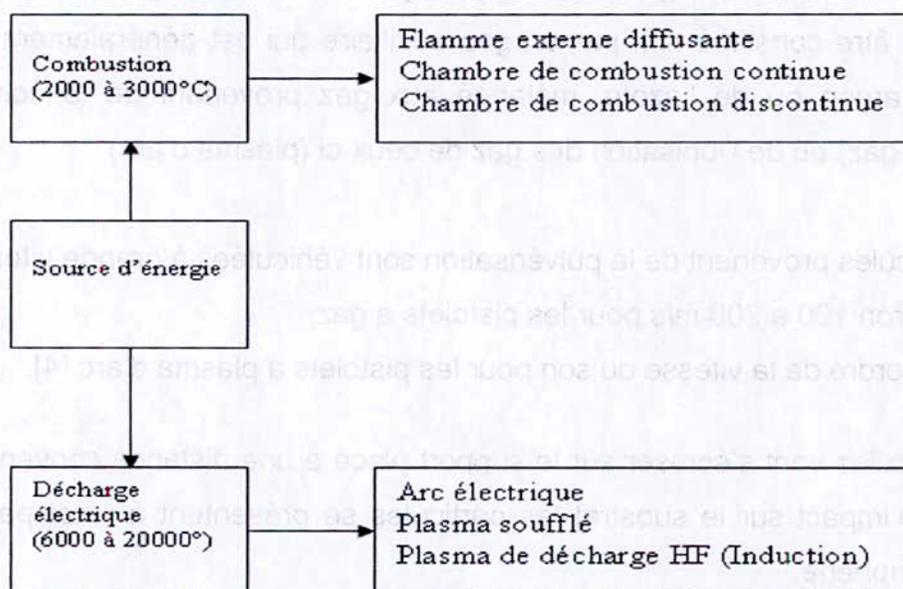


Figure I-4 : Les différentes sources d'énergie en projection thermique.

➤ **Propriétés d'emploi :**

La grande variété des matériaux projetables confère à la projection thermique un large domaine d'utilisation ; que ce soit l'amélioration des propriétés mécaniques des surfaces, la résolution des problèmes de corrosion ou encore la résolution de problèmes d'isolation ou de conduction qu'elle soit électrique ou thermique.

Dans la plupart des cas le revêtement assure plusieurs fonctions à la fois. Par exemple, une bonne résistance au frottement devra être associée à une bonne conductibilité thermique ou une bonne résistance à la corrosion.

I.3. Types de projection thermique

Selon la nature du matériau projeté (poudre ou fil), le type de source d'énergie (flamme ou électricité) ainsi que la technologie utilisée, les processus de projection thermique sont généralement scindés en trois classes : la projection à la flamme, la projection à l'arc électrique et la projection plasma soufflé.

I.3.1. Projection thermique à la flamme

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de projection flamme. La température d'une flamme oxycombustible varie de 2 800 °C (oxypropane) à 3 150 °C (oxyacétylène). Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2 800 °C, et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme.

La projection à la flamme est la méthode la plus ancienne d'application des revêtements par projection thermique. Le matériau de revêtement est soit un fil, soit une poudre qui est passée dans une flamme au gaz d'oxygène-fuel. Les particules en fusion et atomisées sont éjectées dans un jet dirigé par la buse d'un pistolet de projection. En raison de la vitesse relativement basse des particules, l'exposition à l'oxygène est augmentée et donc le contenu en oxydes de ces revêtements est relativement élevé (fig I-5) ; l'adhésion et la densité sont modérées (une fusion subséquente pour augmenter la densité est possible).

Les matériaux revêtus à la flamme sont utilisés pour une protection contre la corrosion et/ou pour la protection contre l'usure des structures et composants, un

renforcement de la surface et la réparation des axes usés pour le revêtement des petites pièces et des joints.

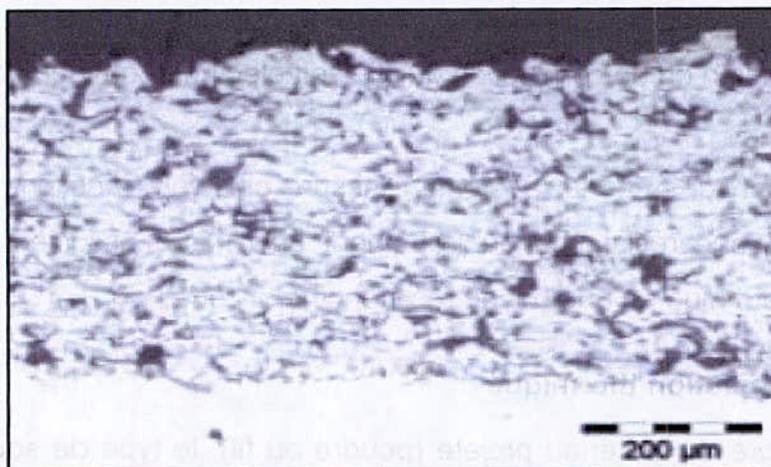


Figure I-5 : Exemple de revêtement par projection à la flamme; Ni5Al [6].

I.3.1.1. Projection flamme-poudre

a. Torches à gaz :

Ces torches sont des chalumeaux oxy-gaz équipées d'un récipient contenant la poudre. Celle-ci tombe par gravité et est entraînée par les gaz de combustion, pour être introduite dans la flamme. La vitesse de projection est très faible. La distance de la buse au support est très courte (quelques millimètres). La flamme sert à chauffer le substrat et à assurer la fusion de la poudre. Une liaison de type brasure est ainsi réalisée.

Ces chalumeaux sont peu onéreux et sont très appréciés pour leur facilité d'emploi. Ils restent un outil privilégié des services maintenance et des petites entreprises pour résoudre des problèmes de rattrapage de côtes, d'abrasion ou de corrosion par exemple.

Les matériaux d'apport sont des alliages dits « autofusibles » à base Ni ou Co (alliés à des éléments tels que Cr, B, Si) et chargés éventuellement en carbures.

b. Pistolets flamme-poudre :

Ces pistolets se différencient des précédents par leur puissance calorifique et par le fait que le substrat n'est pas chauffé par la flamme.

Les pistolets flamme-poudre sont de deux types :

- à réservoir de poudre intégré, la poudre tombant par gravité puis étant aspirée par un des gaz de combustion ;
- à réservoir séparé, relié au pistolet par un flexible, la poudre étant véhiculée par un gaz porteur (gaz neutre, air...).

La vitesse des particules projetées est faible (30 m/s) et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm (afin que la poudre ait un temps de séjour suffisamment long pour être fondue). Ce procédé permet des dépôts de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur, à des taux horaires de dépôt d'environ 2 à 3 kg/h, sans échauffement important du substrat. Les matériaux les plus utilisés restent les alliages autofusibles, la refusion après projection permettant d'améliorer l'adhérence et de diminuer la porosité. La projection d'aciers, d'alliages à bas point de fusion, de céramiques ou de polymères est également possible. Ce matériel est plus répandu que le précédent, et reste d'un coût très abordable. Il est apprécié pour son niveau sonore faible et est utilisé dans tout type d'industrie pour des applications telles que isolation thermique ou électrique, usure, corrosion sur pièces neuves ou usagées.

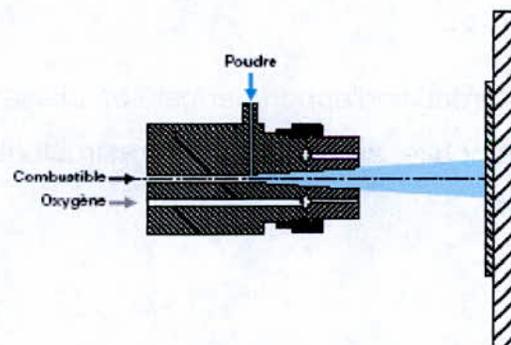


Figure I-6 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre [2].

I.3.1.2. Projection flamme-fil

Contrairement au procédé flamme-poudre, la flamme ne sert en projection flamme-fil qu'à fondre le métal d'apport, introduit sous forme de fil, de cordon, ou de

baguette, en son centre. Une fois fondu, le matériau d'apport est projeté sur le substrat par un courant d'air comprimé.

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

- Une partie chalumeau dans laquelle le matériau d'apport est fondu et pulvérisé ;
- Une partie d'entraînement du fil.

La vitesse des particules est d'environ 150 m/s et la distance entre buse et substrat est comprise entre 100 et 200 mm. Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres, à des taux horaires très variables suivant les matériaux, les diamètres de fil utilisés et les propriétés de dépôts recherchées : de 1 kg/h, pour certaines céramiques préparées sous forme de cordon souple ou de baguette, à plus de 30 kg/h pour des fils anticorrosion tels que le zinc.

Cette technique de projection permet de réaliser les grandes familles de dépôts suivantes :

- Métaux : Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo, aciers ordinaires, aciers inoxydables ;
- Alliages de base Zn, Cu, Ni ou Sn ;
- Céramiques sous forme de cordon ou de baguette : NiAl, NiCrBSi, Al_2O_3 - TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 -CaO.

La grande diversité des produits d'apport permet son utilisation dans tous les domaines industriels : automobile, aéronautique, infrastructure, sidérurgie, fonderie, papeterie, etc.

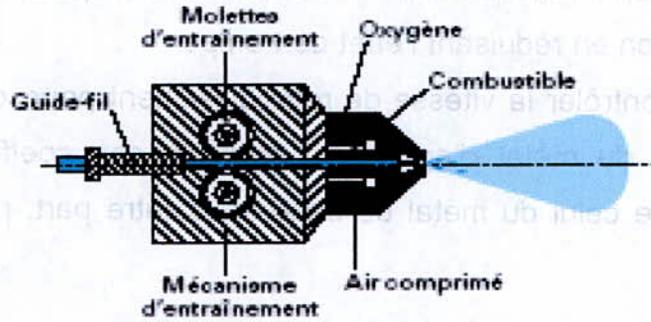


Figure I-7 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [2].

I.3.1.3. Projection flamme avec refusion

Les revêtements réalisés par projection thermique sont poreux et leur liaison avec le substrat est purement mécanique. Pour des problèmes de corrosion et/ou d'adhérence insuffisante, un traitement de refusion peut compléter la gamme opératoire de manière à densifier le dépôt (la porosité ouverte disparaît) et à assurer une liaison du type brasage.

Les alliages utilisés pour ces dépôts sont des alliages dits « autofusibles », généralement des alliages à base Ni ou Co contenant des éléments d'addition tels que B (> 1 %), Si (2 à 5 %), Cr (10 à 20 %), et pouvant être chargés en carbures (jusqu'à 70 %).

Les matériels utilisés sont les torches à gaz avec lesquelles les opérations de projection et de refusion sont réalisées simultanément, ou les pistolets flamme-poudre ou flamme-fil. La refusion est alors réalisée soit à l'aide d'une torche oxyacétylénique ou oxypropane, soit à l'aide d'un dispositif à induction.

La mise en œuvre de ce procédé est relativement simple, mais nécessite de prendre un certain nombre de précautions :

- veiller à ce que l'écart solidus/liquidus des matériaux d'apport soit suffisant (au moins 30°C), afin de permettre une refusion régulière de la surface traitée (c'est-à-dire sans que le métal coule) ;
- veiller à ce que la température de fusion du matériau d'apport soit inférieure à celle du substrat ;
- respecter les règles classiques du soudage du matériau de base, en

particulier en ce qui concerne la température de préchauffage afin d'éviter la fissuration en réduisant l'effet de trempe ;

- veiller à contrôler la vitesse de refroidissement pour, d'une part, éviter la fissuration du métal d'apport eu égard à son coefficient de dilatation différent de celui du métal de base et, d'autre part, réduire les tensions internes.

1.3.1.4. Projection hypersonique

Ce type de projection tient son nom de la vitesse de sortie des gaz qui se situe entre Mach 1 et Mach 2.

Deux procédés présentent ce type de caractéristiques :

- la projection hypersonique à tir discontinu ;
- la projection hypersonique à tir continu.

a. Projection hypersonique à tir discontinu

Pour la projection par canon de détonation une petite quantité de poudre de carbure, carburant de gaz et oxygène, est introduite dans un tube fermé appelé canon à détonation, Ce mélange est ensuite explosé grâce à une étincelle, à la fréquence de 8 allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée et éjectée à très grande vitesse (950 m/s) par l'onde de choc créée. Le régime de projection est donc discontinu. Entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué.

La détonation fait se propulser la poudre à une vitesse sonique multiple et la projette sur la pièce à une énergie cinétique extrêmement élevée. Ces revêtements ont une excellente densité (porosité inférieure à 1%), intégrité et adhésion (souvent supérieure à 80 MPa) au substrat. Dû aux conditions du processus, cette méthode est limitée à l'application des revêtements de carbure, principalement dans l'industrie aérospatiale et aérienne pour les revêtements résistants à l'usure.

Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de Cr ou de W avec liant métallique Ni ou Co, l'alumine, l'oxyde de chrome.

Ce type de matériel n'est utilisé que pour les travaux de sous-traitance, principalement en raison des contraintes de mise en œuvre (dimension du canon, bruit...).

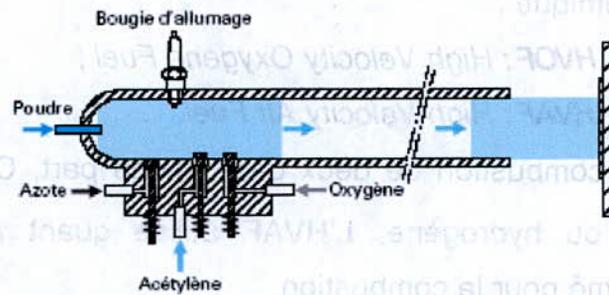


Figure I-8 : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation [2].

b. Projection hypersonique à tir continu

Lors de la projection à haute vitesse à combustion Oxy-Fuel (HVOF), le carburant et l'oxygène sont amenés dans un compartiment dans lequel la combustion produit une flamme supersonique, projetée par le biais d'une buse augmentant sa vitesse. La poudre du matériau de revêtement est amenée dans ce jet et l'extrême vitesse des particules (proche de la vitesse hypersonique) lorsqu'elles rentrent en contact crée un revêtement très dense et très résistant (Figure I-10).

L'énergie cinétique très élevée des particules lorsqu'elles frappent le substrat assure un liant mécanique adéquat même sans qu'elles soient pleinement en fusion (état pâteux).

Cette énergie cinétique acquise dans la tuyère permet la réalisation de dépôt d'excellente qualité : faible porosité (< 2 %), bonne adhérence (70 à 100 MPa) et faible rugosité de surface.

Ceci rend cette méthode de projection particulièrement bien adaptée pour la projection des revêtements avec des carbures. Les applications typiques sont le tungstène, les revêtements au carbure sur les composants et soupapes des turbines de moteurs, et les revêtements au nickel-chrome pour la résistance à l'oxydation.

Cette variante des procédés flamme classiques réside dans la vitesse très élevée acquise par les particules projetées grâce aux importantes pressions régnant dans la chambre de combustion.

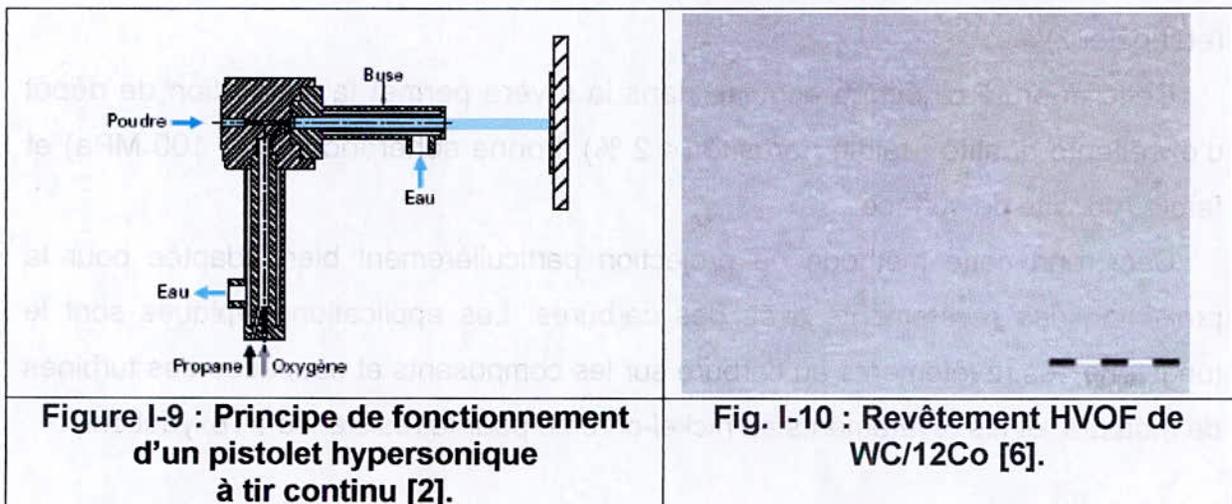
Deux procédés sont développés, leur différence tenant essentiellement à des critères d'ordre économique :

- le procédé **HVOF** : *High Velocity Oxygene Fuel* ;
- le procédé **HVAF** : *High Velocity Air Fuel*.

L'HVOF utilise la combustion de deux gaz : d'une part, O_2 et, d'autre part, propane, propylène ou hydrogène. L'HVAF utilise quant à lui un mélange kérosène - air comprimé pour la combustion.

Si ce procédé est d'une relative simplicité d'emploi, le coût d'utilisation horaire a été longtemps un frein à son développement industriel (la consommation en gaz pouvant atteindre 1 000 L/min). L'aéronautique est aujourd'hui le principal utilisateur du procédé HVOF, en particulier pour les dépôts de WC/Co 88/12 résistant à l'abrasion, l'effet de vitesse d'impact des particules sur le substrat étant bénéfique du point de vue de la cohésion des dépôts, et la température limitée de la flamme (par comparaison avec le procédé plasma) permettant d'éviter la décarburation des matériaux en cours de projection.

D'autres applications telles que revêtements de rouleaux (aciéries, papeteries) ou opercules de vannes sont aujourd'hui courantes [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8].



1.3.1.5. Les gaz de projection

Tous les procédés présentés précédemment utilisent une flamme oxycombustible comme source de chaleur. Si l'oxygène est généralement utilisé comme comburant de préférence à l'air pour l'obtention de performances thermiques élevées, le choix des combustibles sera dicté par des critères de paramètre de procédé (température de flamme, pression de travail), de coût, de stockage ou de sécurité.

Les principaux gaz combustibles sont l'acétylène, le propylène, des mélanges acétylène éthylène propylène, des mélanges méthyleacétylène propadiène hydrocarbures ou encore des hydrocarbures tels que le propane. L'ensemble des propriétés des différentes flammes est lié à la structure moléculaire des combustibles utilisés, suivant qu'ils contiennent des triples liaisons de type acétylénique (liaison moléculaire du type $C\equiv C$) ou de simples liaisons (liaison du type $C-C$).

L'acétylène possède des performances thermiques exceptionnelles qui en font le gaz le plus employé en projection flamme-fil. En revanche, son instabilité sous pression élevée ne permet pas son utilisation en projection hypersonique, ou dans la recherche d'amélioration de performances de pistolets flamme liée à une augmentation des pressions de travail.

Le choix du gaz combustible influencera directement le rendement de projection, le taux de dépôt, la qualité du revêtement (finesse du grain, cohésion...). Cette influence est due, d'une part, aux propriétés thermiques de chaque flamme et, d'autre part, à la matière et au contrôle de la régularité des débits et pressions qui peuvent découler du choix des gaz. Le tableau I-3 représente la synthèse de l'influence de chaque gaz sur le process et le tableau I-4 les gaz préconisés [2].

Process		A	C	T	P
Applications	Projection flamme subsonique	non réfractaires			
		réfractaires			
		plastiques			
	Projection hypersonique				
Performance	Refusion	non réfractaires			
		taux horaire de dépôt			
	Pratique	économie de matériau			
		compacité			
		adhérence			
		rugosité			
		propriétés réductrices			
		économie d'oxygène			
	Souplesse	débit instantané			
		autonomie d'utilisation			
		pression de distribution			
		tolérance température extérieure			
		facilité réglage de flamme			
	Sécurité	stabilité du produit			
		densité/air			
		plage d'inflammabilité			

(1) Légende :
 A = acétylène ; C = mélange acétylène/éthylène/propylène
 T = mélange méthyle-acétylène/propadiène/hydrocarbures
 P = propane

	excellent
	bon
	médiocre

Tableau I-3: Influence des gaz sur une installation de projection thermique [2].

Procédé	Matériaux	Gaz préconisé	Autres gaz possibles
Flamme-poudre	Tous matériaux	Acétylène	
Flamme-fil	Aciers, Zn, Al, Zn-Al, Ni-Al, bronze	Propylène	Acétylène, propane
	Mo	Acétylène	Propylène
	Cordons métalliques	Propylène	Acétylène
	Cordons céramiques	Acétylène	Propylène
HVOF	Carbures	Propylène ou kérosène	Propane
	Matériaux métalliques	Hydrogène	Propylène, propane

Tableau I-4: Gaz préconisés suivant les procédés [2].

II.3.2. Projection à arc électrique entre deux fils :

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables en matériau de revêtement. Les fils s'entrecroisent devant un jet d'air comprimé. Alors que la chaleur de l'arc fait fondre les fils, l'air comprimé souffle sur les gouttelettes fondues du matériau de revêtement sur le substrat. La température élevée de l'arc (température d'environ 6000°C) et la vitesse des particules (vitesse égale à 250 m/s) donnent au revêtement une

résistance et densité de liant supérieure à celle des revêtements projetés à la flamme.

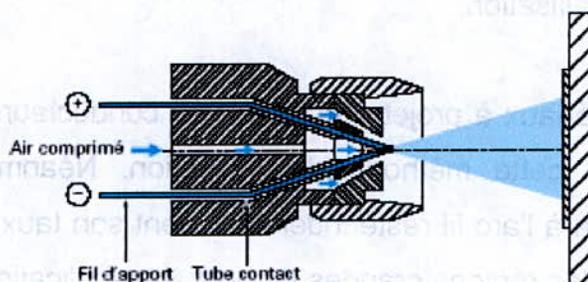


Figure I-11 : Principe de fonctionnement d'un pistolet arc électrique [2].

Les caractéristiques des dépôts sont les suivantes :

- Porosité de 5 à 10% ;
- Epaisseur des dépôts de 0.2 à 3 mm ;
- Force d'accrochage : 20 à 40 MPa ;
- Taux horaire de dépôt de 5 à 30 kg/h.

L'accroissement de la résistance d'accrochage du dépôt obtenu à l'arc électrique a cependant une contrepartie. En effet en raison de l'utilisation de l'air comprimé, les revêtements projetés à l'arc contiennent un pourcentage plus élevé en oxydes (Figure.I-12). Des phénomènes de nitruration par réaction avec l'azote environnant se produisent probablement aussi. Il en résulte que les modifications du métal projeté sont beaucoup plus importantes avec l'arc électrique qu'avec la flamme.

Le tableau I-5 donne les pertes par rapport au fil d'origine dans le cas d'un acier.

	Flamme	Arc
C	20%	50-75%
Si-Mn	-	30-50%

Tableau I-5 : pertes dues à la projection thermique.

Ceci est évidemment important dans le cas des rechargements durs pour lesquels le carbone intervient. A noter que le remplacement de l'air par de l'argon ou des mélanges azote-hydrogène par exemple diminue ces pertes. Ainsi avec un acier à

0,4% de carbone, la perte qui est de 60% avec l'air tombe à 20% avec un mélange azote-hydrogène, néanmoins cette solution augmente notablement le prix de revient d'une opération de métallisation.

Le fait que les matériaux à projeter doivent être conducteurs constitue aussi un frein à l'utilisation de cette méthode de projection. Néanmoins l'avantage du processus de projection à l'arc fil reste indéniablement son taux de déposition élevé le rendant parfait pour les régions grandes ou pour les applications de production de grand volume: la projection des grandes structures telles que les ponts et les plateformes off-shore avec des revêtements de zinc ou d'aluminium résistant à la corrosion, et la projection des composants des boîtiers électroniques avec revêtements conducteurs de cuivre ou d'aluminium [2] [4] [5] [6] [7] [8].

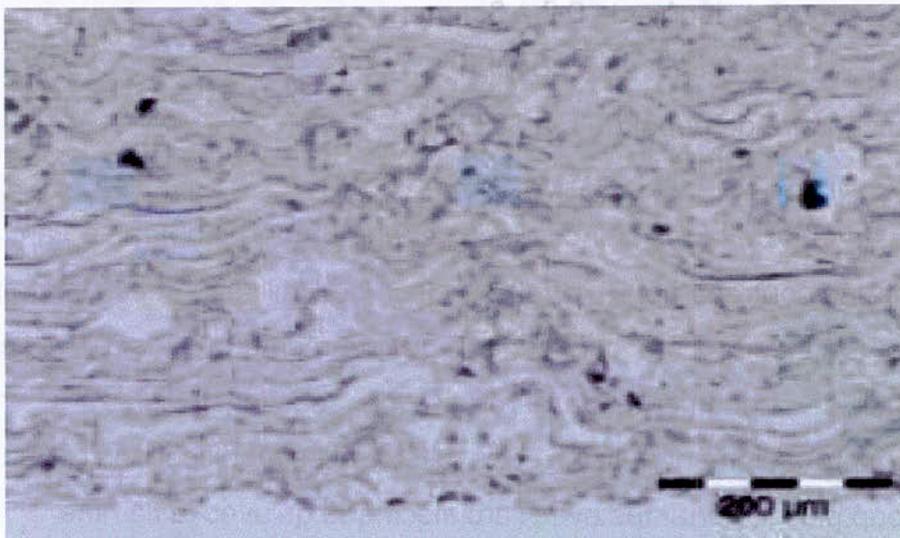
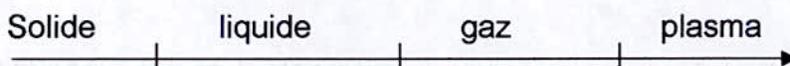


Figure I-12: Exemple de revêtement de métal après projection à l'arc fil électrique montrant un fort pourcentage d'oxydation [6].

I.3.3. La projection plasma

Le plasma est considéré comme le 4e état de la matière.



C'est un gaz ionisé constitué de molécules, d'atomes, d'ions et d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre. Un plasma Ar/H₂ sera ainsi constitué des espèces suivantes : Ar, H, H⁺, Ar⁺, e⁻. Pour générer un plasma, les trois éléments fondamentaux sont :

- une source de puissance (générateur à courant continu) ;
- une décharge ionisant le gaz (générateur haute fréquence ou haute tension) ;
- un couplage assurant le contact entre deux électrodes via le gaz plasma.

Pour la projection thermique, deux propriétés conditionnent vitesse et température des particules projetées :

- la conductivité thermique qui détermine les transferts plasma particules et donc l'état de fusion des particules lors de leur impact sur le substrat;
- la viscosité qui permet de diminuer les entrées d'air dans le jet plasma, d'augmenter la longueur du jet et d'éviter les réactions chimiques des particules (oxydation en particulier)

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

Un arc électrique se forme entre une cathode et la buse concentrique du pistolet pulvérisateur. Un mélange de gaz et de flux élevé le long de l'électrode est ionisé par l'arc, et forme le plasma. Ce jet de plasma est projeté hors de la buse, où la poudre du matériau de revêtement est injectée dans le jet de plasma. La chaleur et la vélocité du jet de plasma fait fondre rapidement et fait accélérer les particules pour les conduire sur le substrat et former un revêtement. Les revêtements par jet de plasma ont une structure plus dense que les revêtements projetés à la flamme (comparer les Fig. I-5 et Fig. I-14).

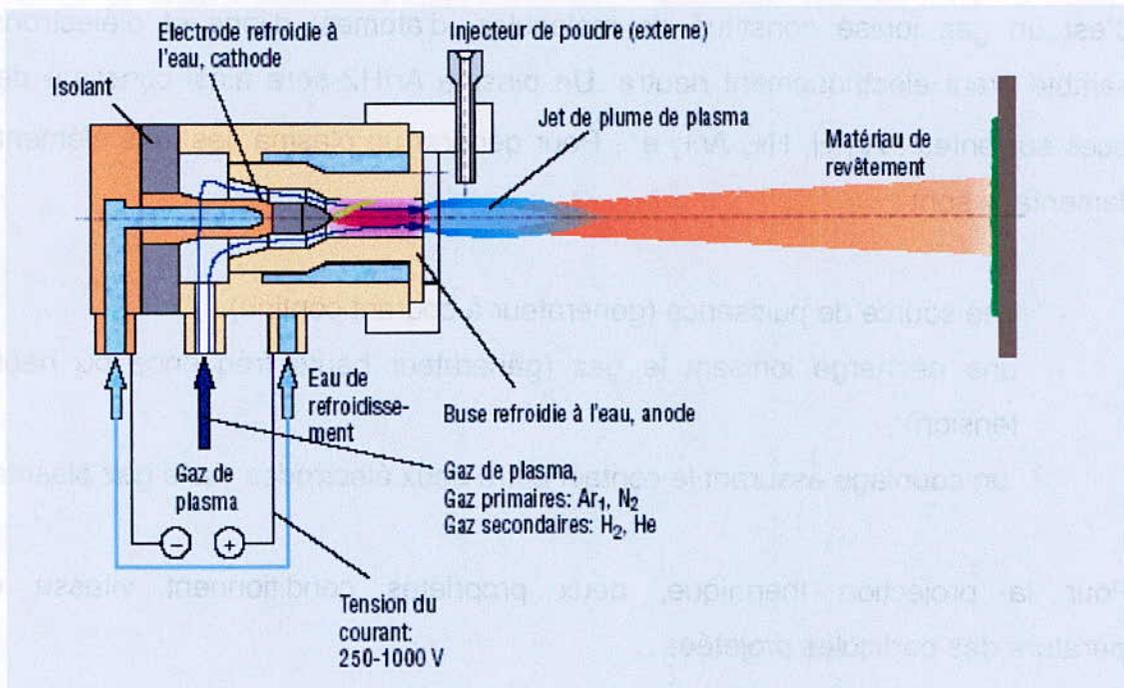


Figure I-13: Principe de fonctionnement d'une torche plasma [6].

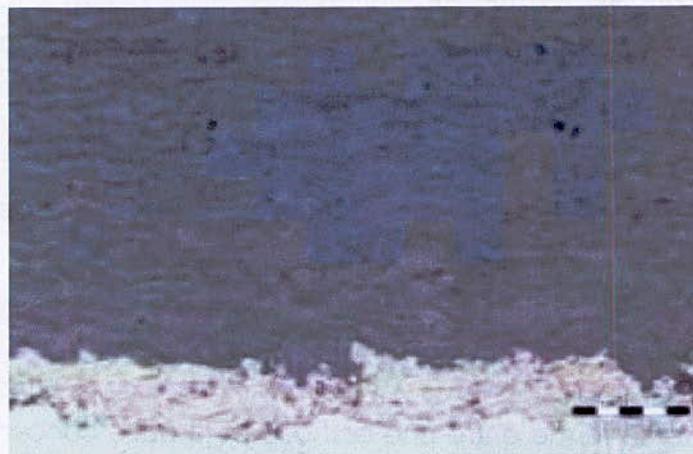


Figure I-14: Exemple de revêtement APS avec couche de liant NiCr et couche de finition en oxyde de titane [6].

La projection de plasma comporte l'avantage de pouvoir être utilisée sur les matériaux avec des points de fusion élevés tels que la céramique ou les métaux réfractaires. Il s'agit d'une méthode de projection polyvalente pour des revêtements de haute qualité et utilisés pour un vaste choix d'applications, y compris les revêtements sur les surfaces de traction, les revêtements pour barrière thermique sur

les chambres à combustion, les turbines, les vannes et les pales, les revêtements biocompatibles d'hydroxylapatite pour les implants et les revêtements de céramique sur les rouleaux d'imprimerie [2] [7] [8].

Caractéristiques	Projection flamme-poudre	Projection flamme-fil	Arc électrique	Plasma	HVOF	Canon à détonation
Source de chaleur	flamme oxyacétylénique	flamme oxyacétylénique	arc électrique	plasma	flamme oxyacétylénique	flamme oxyacétylénique
Température de flamme (° C)	3 000	3 000	6 000	12 000	3 000	3 000
Transport des particules	gaz flamme	air comprimé	air comprimé	gaz plasma (Ar/H)	gaz flamme	gaz flamme
Vitesse des particules (m/s)	40	150	250	200	700	950
Forme du produit d'apport	poudre	fil-cordon	fil	poudre	poudre	poudre
Taux horaire de dépôt (kg/h)	1 à 3	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement moyen ⁽¹⁾ (%)	50	70	80	70	70	70
Force d'adhérence (MPa)	20 à 40	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Taux de porosité (%)	10 à 20	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0,5 à 2	0,5 à 2
Épaisseur déposée (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,2 à 3	0,05 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1
Exemples de matériaux d'apport	<ul style="list-style-type: none"> • métaux • céramiques • carbures dans matrice métallique 	<ul style="list-style-type: none"> • métaux • céramiques • carbures dans matrice métallique 	<ul style="list-style-type: none"> • métaux 	<ul style="list-style-type: none"> • métaux • céramiques • carbures 	<ul style="list-style-type: none"> • métaux • carbures 	<ul style="list-style-type: none"> • carbures • céramiques

(1) Pourcentage de poudre projetée qui adhère au matériau.

Tableau I-6 : Principales caractéristiques des différents procédés de projection thermique [2].

I.4. CARACTERISTIQUES GENERALES DES DEPOTS

I.4.1. Structure métallurgique

Les dépôts sont généralement stratifiés, s'ils ne sont pas traités à posteriori. Ils sont poreux, la porosité provenant soit de microcavités dues à un empilage imparfait des gouttelettes, soit de gaz enfermés pendant la solidification. Le taux de porosité varie de moins de 1% à 25% suivant les procédés et les matériaux utilisés. Les dépôts comportent des inclusions telles que des oxydes ou encore d'autres matériaux provenant des chalumeaux eux-mêmes, des particules non fondues ou partiellement fondues n'ayant pas subi un cycle thermique complet (en raison de leur taille ou de leur cheminement dans la source de chaleur)

En raison de la très grande vitesse de refroidissement des particules au contact du substrat, leur structure métallurgique est du type trempée, généralement à phase unique. Ceci permet d'expliquer que la structure d'origine du matériau peut se trouver modifiée après dépôt. A titre d'exemple, on peut citer le cas de l'alumine, projetée sous forme alpha et qui se retrouve sous forme gamma dans le dépôt. Une autre conséquence de ces cycles thermiques sévères est la présence possible de microfissures intragranulaires à l'intérieur des dépôts.

I.4.2. Méthodes non-destructrice et destructrice de caractérisation des revêtements

En dépit des progrès considérables réalisés ces dernières années, les méthodes non-destructrices de caractérisation des revêtements, telles que l'évaluation eddy-current ou l'imagerie thermographique, ne sont toujours pas en mesure d'offrir une description suffisamment précise d'un système multicouches. Ce manque de précision ne s'applique pas uniquement aux mesures d'épaisseur du revêtement, mais aussi aux examens de morphologie de la couche (porosité, inclusion d'oxydes, structure de l'interface, etc.). A cause de ces limites, il semble probable que les méthodes métallographiques (destructrices) habituellement employées pour une caractérisation des revêtements continueront de jouer un rôle important dans la qualification de processus et le contrôle qualité dans un avenir proche. Des informations précises sur les profils d'épaisseur de revêtements et leurs propriétés

morphologiques sont grandement recherchées, particulièrement lors de l'évaluation d'un nouveau processus de revêtement ou lorsque les paramètres de processus ont changé. Cependant, des données d'une précision suffisante ne sont pas facilement obtenues par les techniques non-destructrices [9].

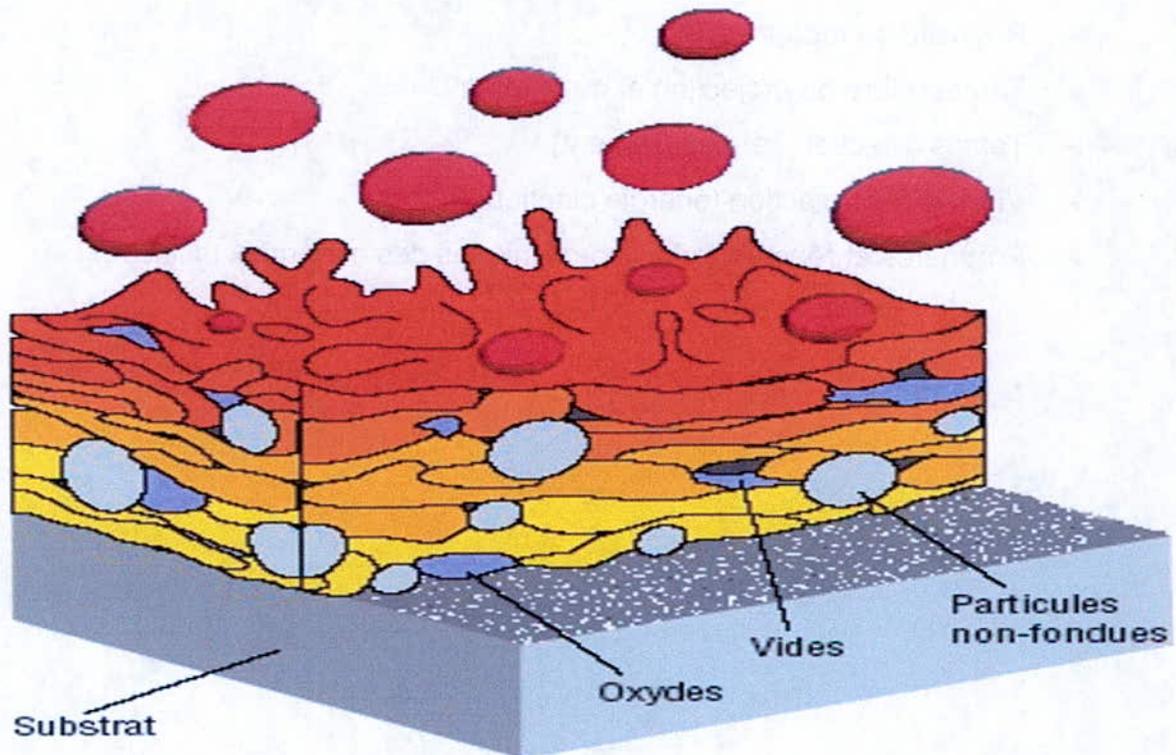


Figure I.15 : schéma représentant la coupe d'un dépôt projeté [6].

Enfin, lors des projections réalisées dans l'air, les particules et le substrat sont soumis au phénomène d'oxydation. Il n'est ainsi pas rare de constater une augmentation du taux d'oxygène pendant la projection : par exemple, le tungstène projeté par plasma atmosphérique à partir de poudre contenant 200 ppm d'oxygène voit ce taux passer à 5000 ppm dans le dépôt [2] [6].

I.4.3. Adhérence

Les dépôts adhèrent au substrat par un phénomène mécanique et de diffusion. Suivant les procédés et les matériaux, l'adhérence varie de 20 à 150 MPa. Dans le

cas où elle s'avère insuffisante (cas de projections d'oxydes par exemple), on utilise des sous-couches d'accrochage, parmi lesquelles on peut citer l'aluminure de nickel, le molybdène ou encore les alliages du type Ni-Cr (80/20).

Les mécanismes influençant l'adhérence et l'édification du revêtement sont :

- Propreté et étendue de la surface à revêtir,
- Rugosité ou topographie,
- Température de projection et du substrat
- Temps (réaction, refroidissement)
- Vitesse de projection (énergie cinétique)
- Propriétés et réactions physico-chimiques des matériaux utilisés [7].



Figure 1.15. Schéma représentant la coupe d'un dépôt projeté [8].

Enfin, lors des projections réalisées dans l'air, les particules et le substrat sont soumis au phénomène d'oxydation. Il faut ainsi que lors de la projection, une augmentation du taux d'oxygène pendant la projection, par exemple, la température par plasma atmosphérique à partir de l'air, contenant 20% d'oxygène, soit ce taux passer à 2000 ppm dans le dépôt [5].

1.4.3. Adhérence

Les dépôts adhèrent au substrat par un phénomène mécanique et de diffusion. Suivant les procédés et les matériaux, l'adhérence varie de 20 à 150 MPa. Dans le



Chapitre



2

Le Micropercuteur

Ce chapitre présentera le micropercuteur, dispositif industriel ayant permis de réaliser un test simple et efficace qui consiste à imprimer des sollicitations cycliques à énergie d'impact contrôlée.

Seront décrits le fonctionnement et les différents modes de propulsion dont est pourvu la machine ainsi que les différents stylets et pointes et autres accessoires composant la machine.

II. LE MICROPERCUTEUR OU IMPACTEUR A ENERGIE D'IMPACT CONTROLÉE

II.1. Introduction:

Sous l'effet de sollicitations cycliques dans le domaine plastique, les matériaux métalliques tels que l'acier, l'aluminium ou encore l'acier inox ou le molybdène réagissent plus ou moins différemment à ces contraintes.

Pour étudier ces réactions ainsi que l'effet d'un certain nombre de paramètres tels que le traitement thermique et la lubrification sur ces dernières, nous avons eu à utiliser un micropercuteur fourni par la société Technifor.

Une collaboration sur un tout autre sujet avec la société Technifor qui conçoit principalement des systèmes de marquage par micropercussion a involontairement apporté une solution au problème que nous venons de schématiser. Cette société fabrique un micropercuteur destiné au marquage de caractères alphanumériques ou de logotypes sur des pièces à l'échelle industrielle. Les caractères sont obtenus par alignement d'impacts successifs d'un stylet sur la pièce à marquer. Ce procédé est la solution idéale pour un marquage de pièces métalliques et plastiques, de forme et d'état de surface divers (Automobile, mécanique, sidérurgie, électromécanique, ...).

Ces impacts sont réalisés à l'aide d'un indenteur en cermet qui se termine par une pointe. Le diamètre de cette pointe varie de 200 à 600 μ m et peut atteindre 1 voire 2mm. L'un des avantages principaux de cette machine est sa fiabilité dans la mesure où il s'agit d'un dispositif industriel, par exemple sa température de fonctionnement est comprise entre +5 à +45°C et la vitesse de marquage peut atteindre 6 caractères/seconde sans oublier le fait que les organes qui composent la machine ont une durée de vie assez élevée [10] [11].

II-2. Description du micropercuteur:

Le marquage fut utilisé pour la première fois dans le domaine militaire et plus précisément pour marquer les armes. Ces marques pouvaient être relues et ce même si elles venaient à être limées ou effacées par un quelconque moyen, en inspectant au microscope la zone marquée. Ceci est dû à l'écrouissage que subit la zone marquée.

Le micropercuteur est composé de trois parties, la première est nommée le Bâti de colonne représenté dans la figure II-1.

Sur ce bâti se fixera la seconde partie, à savoir le dispositif de marquage (fig II-3) ainsi qu'une troisième partie qui, dans notre cas, est un porte échantillons.

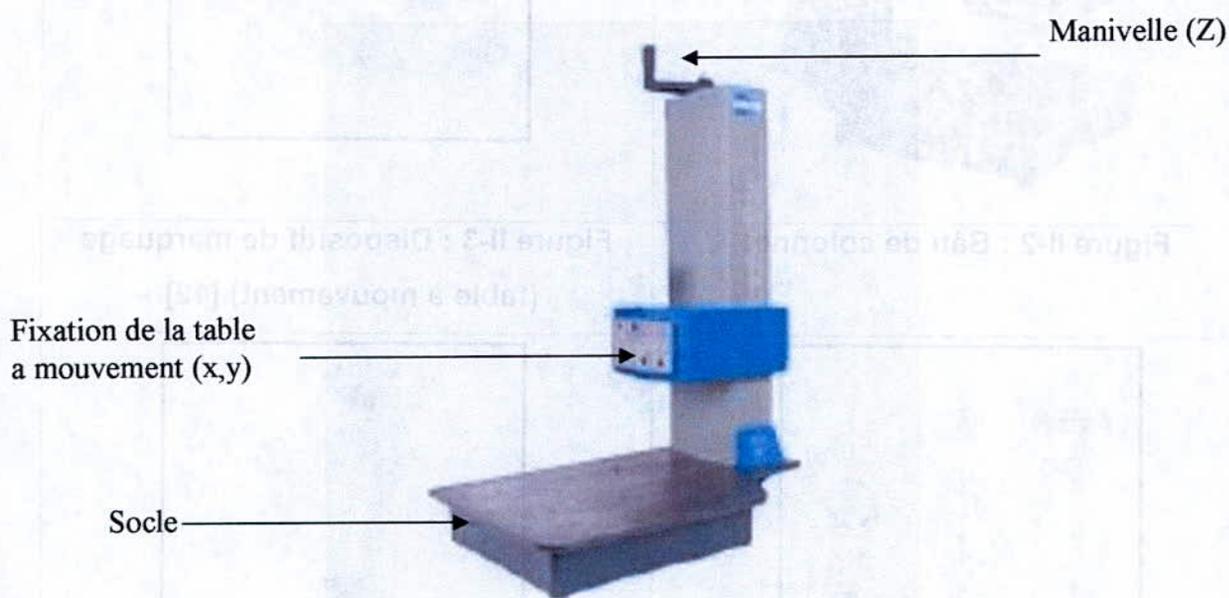


Figure II-1 : Bâti de colonne.

A noter aussi que la machine peut être équipée d'un certain nombre d'accessoires optionnels qui vont de la vérification de la qualité du marquage de codes Data Matrix™ par Micro Percussion, jusqu'à la relecture automatique de ce dernier par caméra CCD ou douchette portable.

La micropercussion se fait à l'aide d'une tête de marquage appelée stylet (figII-4), fixée sur une table à mouvements (x, y) pilotée par un moteur pas à pas.

L'ajustage de la hauteur de la tête de marquage par rapport à la pièce est réglable, le réglage s'effectue soit automatiquement à l'aide d'un axe motorisé comme montré dans la figure II-5, soit comme dans notre cas à l'aide d'une manivelle (figure II-1).

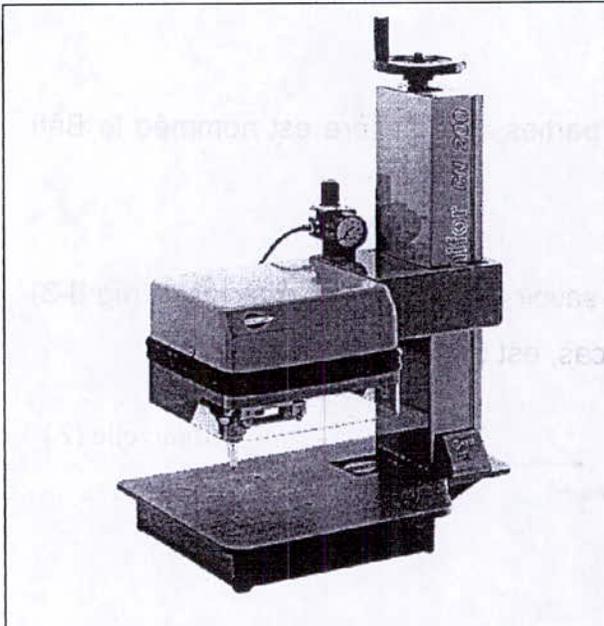


Figure II-2 : Bâti de colonne.

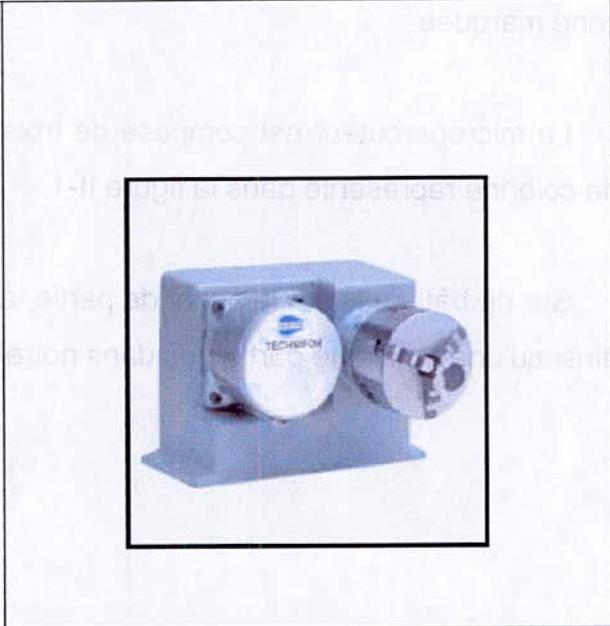


Figure II-3 : Dispositif de marquage (table à mouvement) [12].



Figure II-4 : Gamme de stylet standards et allongés [12].



Figure II-5 : Axe des Z motorisé [12].

Un micro ordinateur de commande gère le marquage par l'intermédiaire d'un programme nommé T101W fonctionnant sous environnement Windows. Un autre logiciel gère le transfert entre l'UC et le PC.

Son interface est simple et la prise en main est facile. Il est doté de deux modes : Mode "Utilisateur" (droits restreints) et mode "Superviseur" (accès par mot de passe

à toutes les fonctions). L'entrée des données se fait via un clavier externe 105 touches AT.

L'interface de communication indique toutes les étapes importantes via un écran, elle indique par exemple le départ du marquage, la fin de cycle, le nombre de cycles, ...etc.

Le marquage d'une pièce est effectué par le déplacement d'une pointe en cermet introduite dans le stylet.

Pour commander le mouvement de la pointe, deux modes de propulsion sont disponibles: le **mode électromagnétique** et le **mode pneumatique**, le choix du mode se fait au démarrage du logiciel.

Suivant les modes d'alimentation, deux types de stylet sont fournis: stylet électromagnétique et stylet pneumatique chacun ayant des caractéristiques particulières correspondant à chaque mode.

II.3. Etude du mode de propulsion:

Dans notre étude, nous avons utilisé le micropercuteur en mode électromagnétique ; le mode pneumatique ayant une sensibilité limitée sur les valeurs d'énergie les plus faibles ainsi qu'une excitation trop grande et difficilement contrôlable.

De part le mode de fonctionnement, il a été constaté que l'impact dû à une propulsion électromagnétique est d'autant plus faible que l'on rapproche l'échantillon de la pointe. Celle-ci subit un déplacement progressif dû à une accélération électromagnétique constante préprogrammée dans le logiciel de commande.

Au contraire, l'impact par propulsion pneumatique est d'autant plus fort que l'échantillon est proche de la pointe.

II.3.1 Stylet électromagnétique

En mode électromagnétique, le mouvement descendant de la pointe logée dans un guide, est assuré par un poussoir électromagnétique.

Le mouvement vertical du poussoir, va être généré par la force magnétique produite par l'électro-aimant. Celui-ci est excité par le passage d'un courant dans la bobine d'excitation pendant un temps t , appelé temps de baisse lors de la descente et temps de levée lors de la remontée du poussoir.

Les temps de descente et de remontée du poussoir sont commandés successivement par les temps de baisse et de levée. Ils sont gérés par deux commandes du programme T101W.

Quand le circuit d'excitation est fermé, le poussoir est bloqué en fin de course. Le rappel du poussoir est assuré par l'électro-aimant en fixant le temps de levée et par un ressort de rappel incorporé dans l'électro-aimant.

Cependant, la remontée de la pointe est assurée par la libération de la force exercée par le poussoir et le ressort de rappel logé dans le guide pointe.

La force électromagnétique est régulée à l'aide d'un code machine désigné dans le programme de marquage par le code EV. La gamme des valeurs disponibles varie de 0 à 6, la valeur EV (0) correspond au niveau énergétique le plus bas.

Les figures II.6 et II.8 représentent le montage de différents composants constituant le stylet électromagnétique.

Il s'agit d'une pointe en cermet monobloc mise au point par Technifor, elle est composée d'un mélange fritté de carbures de tungstène et de cobalt. La partie inférieure conique est terminée par une calotte sphérique dont les diamètres usuellement disponibles sont: 200, 400, 600 et parfois 1000 μm .

La pointe est introduite avec un ressort de rappel dans un guide pointe qui permet de fixer l'ensemble au bloc électromagnétique. Le ressort fait monter le percuteur jusqu'à ce qu'il soit plaqué contre le poussoir. Ainsi ce dernier reste en contact permanent avec la pointe

La fixation qui se fait entre le guide et le bloc s'effectue grâce au filetage intérieur dont est pourvu le guide qui se vissera sur le bloc qui lui, est muni d'un filetage extérieur.

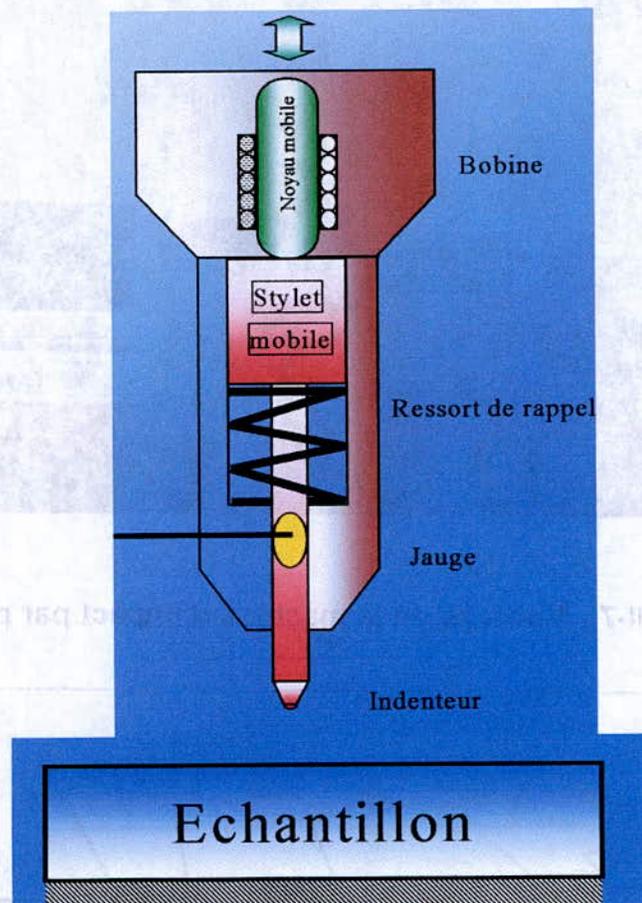


Figure II-6 : coupe schématique du stylet électromagnétique.

La figure II-7 représente le montage de la machine d'impact avec l'UC le PC et la Machine de marquage par percussion.



Figure II-7 : Montage de la machine d'impact par percussion.

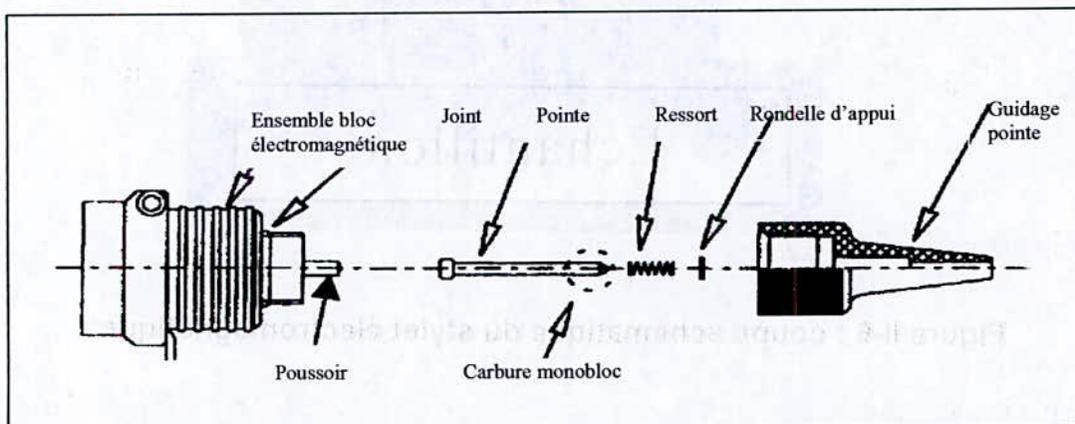


Figure II-8 : Coupe schématique montrant les composants du stylet électromagnétique [10].

II.3.2. Stylet pneumatique :

En mode pneumatique, le mouvement du percuteur est engendré par une soupape qui jouera le rôle de poussoir, ce dernier, sous l'effet de l'air comprimé, provoquera la descente de la pointe. Plus la pression de l'air comprimé est grande plus la force

mise en jeu est grande. Cette pression est variable, elle est réglée à l'aide d'une électrovanne qui peut être directement commandée par le programme de marquage. Le principe est le même que pour le marquage en mode électromagnétique, la gamme de puissance varie de EV (0) à EV (6), EV (0) correspond à la pression la plus basse et donc la force la plus faible.

Comme dans le mode électromagnétique la remontée de la pointe est assurée par un ressort de rappel mais aussi et surtout grâce à l'énergie restituée par la libération de la pression.

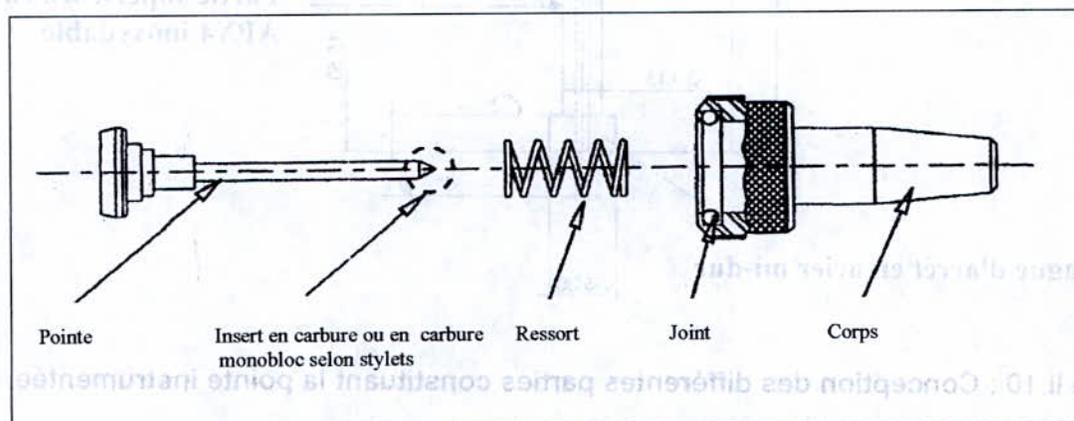


Figure II-9 : Coupe schématique montrant les composants du stylet pneumatique [10].

II.3.3. Propriétés des pointes :

Les propriétés mécaniques et la composition chimique des pointes utilisées en carbure de tungstène cobalt (WC-Co) de nuance type G1[Perderson] ou K20 [ISO], sont résumées dans le tableau II-1.

Composition (% poids)		Densité (g/cm ³)	Dureté Hv	Module de Young (Hbar)	Coefficient de dilatation (0 à 600°C)	Granulométrie (µm)
WC	Co					
93.5	6.5	14.9	1890	62000	4 10 ^{e-6}	2.5

Tableau II-1 : Propriétés mécaniques et composition chimique de la pointe [10].

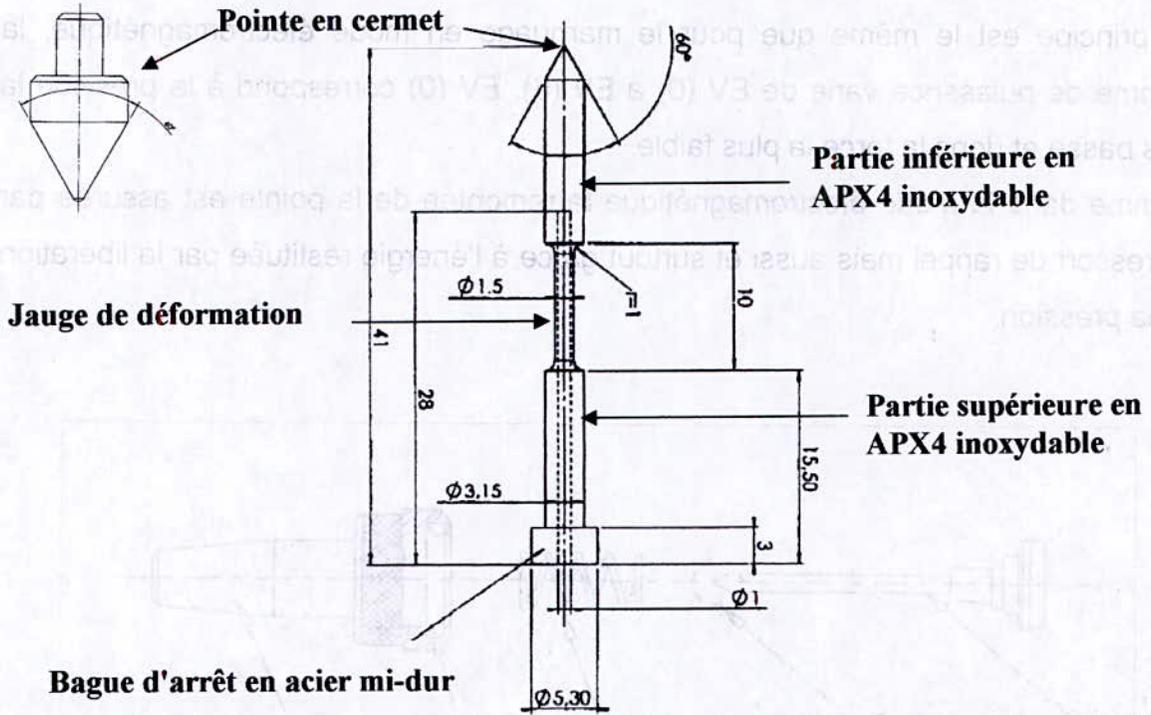


Figure II.10 : Conception des différentes parties constituant la pointe instrumentée.

Composition (%)	Densité (g/cm ³)	Module de Young (N/mm ²)	Coefficient de dilatation (à 600°C)	Géométrie	
				WC	Co
62.5	14.9	65000	4.10 ⁻⁶	2.5	2.5



Chapitre
3



Etude expérimentale

Dans ce chapitre sera traité toute la partie expérimentale :

- *Le choix des matériaux, la préparation des échantillons, préparation des surfaces et la métallisation sont traités en premier*
- *La caractérisation métallurgique basée sur une étude métallographique ainsi qu'une étude de microdureté HV.*
- *Enfin on présentera la micropercussion ; les résultats obtenus seront présentés sous forme de graphes montrant l'évolution du diamètre des empreintes en fonction du nombre de cycles en étudiant l'influence de la lubrification, du post traitement et de la distance bille-échantillon*
- *Une étude au microscope électronique à balayage des fonds de calottes sera également présentée pour compléter l'interprétation des courbes tracées..*

A. TECHNIQUES EXPERIMENTALES**III.1. CHOIX DES MATERIAUX****❖ Critères de choix des subjectiles :**

Vu leurs utilisations dans diverses industries, notre choix s'est porté sur l'acier XC18 et l'alliage d'aluminium AU4G pour la réalisation de cette étude.

➤ ACIER XC18

L'acier XC18 fait partie des aciers non alliés, il contient entre 0,12 et 0,18 % de carbone.

Sa dureté est évaluée à 114HV, il a une résistance à la rupture égale à (410-490 N / mm²).

Sa principale caractéristique reste son coût relativement faible comparé aux autres alliages. Il est utilisé surtout pour la cémentation, mais on le retrouve aussi dans l'industrie mécanique pour la fabrication des arbres capables de supporter des couples de forces moyennes.

Il est souvent trempé puis revenu pour augmenter ses propriétés mécaniques



➤ Aluminium AU4G :

Dans les alliages d'aluminium, la lettre A qui désigne l'aluminium est suivie d'une lettre correspondant aux éléments d'addition.

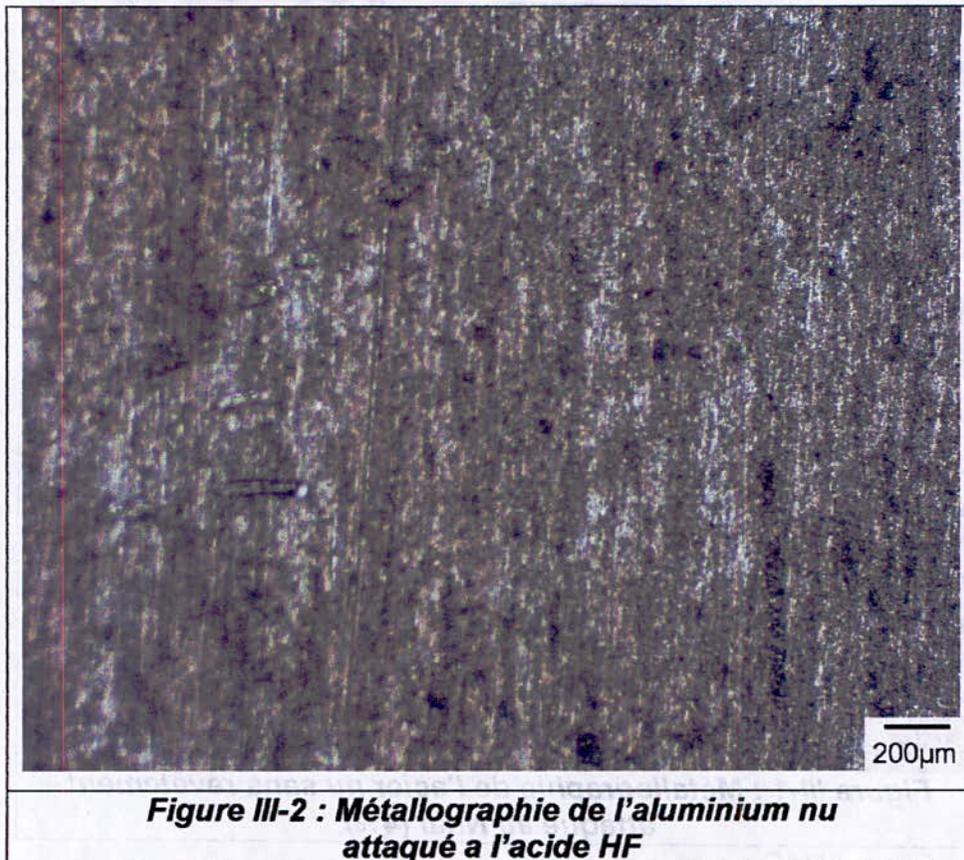
L'aluminium possède des propriétés très recherchées telles que l'aspect de surface, l'aptitude au polissage et à l'anodisation, une bonne résistance à la corrosion, et une bonne plasticité, etc.

Ses propriétés mécaniques sont résumées ci-dessous :

$$E = 19 \text{ Kg/mm}^2$$

$$R = 24 \text{ Kg/mm}^2$$

$$A = 4,5 \%$$



❖ choix du revêtement :

Étant donné les faibles caractéristiques des deux substrats, notre choix s'est porté sur un revêtement en acier inoxydable (18-8). Celui-ci ayant comme principales caractéristiques une bonne résistance à l'usure et à la corrosion. Aussi, cet acier s'apprête bien à la projection thermique à l'arc électrique entre deux fils procédé parfaitement maîtrisé par la société Algérie Métallisation où nous avons réalisé nos dépôts.

Dans notre cas l'acier inoxydable projeté est du type austénitique ; nous rappelons brièvement ses principales caractéristiques et applications.

Aciers inoxydables austénitiques:

Avec entre 0,03 et 0,05% de carbone, les éléments d'alliage principaux sont le chrome (17-24 %), le nickel (8-25%) et le molybdène (2-4%), le titane et le niobium pour la formation de carbures, non traitables thermiquement.

- **Caractéristiques:** ductilité élevée, résistance élevée à la corrosion, résistants aux acides oxydants, très bonnes propriétés de formage à froid, facilement fabriqués/usinés.
- **Applications:** vis, boulons et implants, ustensiles de cuisine, applications à basse température, dans l'industrie chimique, pharmaceutique et agroalimentaire [13].

❖ **Sous-couche d'accrochage :** un alliage Cu-Al (90-9) a été projeté sur un des substrats afin de voir l'importance de cette sous-couche sur l'adhérence du revêtement.

Une analyse EDAX des différents matériaux a permis de donner les résultats présentés sur le tableau III-1.

	Fe	C	Cr	Ni	Mn	Al	Si	Cu
XC18		0.33	1.2					0.3
Aluminium	0.23	0.18	0.28	0.46	0.57	81.09	-	2.34
Revêtement	64.4	0.77	18,1	7.89	0.67	0,08	0,45	0.38
S-Couche	0.65	0.02	-	-	-	8.91	0,35	89.7

Tableau III.1 : Composition chimique (% massique) des différents substrats et des matériaux projetés.

III.2. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Comme toute opération expérimentale, nous avons commencé par la préparation des éprouvettes, ceci après avoir choisi les matériaux et les dimensions de ces derniers.

Avant d'effectuer les traitements surfaciques sur une pièce, celle-ci doit avoir une forme régulière pour faciliter sa manutention et rendre l'échantillon plus agréable, pour cela ont été prélevés sur des tôles des échantillons de forme parallélépipédique de dimensions (60mmx40mmx4mm). Les différents dépôts ont été réalisés sur la surface principale.

Un polissage graduel de la surface principale de ces échantillons a été réalisé.

Avant de procéder à l'opération de métallisation, il est nécessaire d'effectuer une préparation de surface afin d'augmenter l'adhérence des revêtements. Les différents échantillons ont donc été rectifiés puis nettoyés et dégraissés selon les normes usuelles pour être finalement grenailés.

Le grenailage a été effectué dans une chambre dite « chambre de grenailage », la grenaille véhiculée par la pression d'air comprimé arrive à la buse et l'opérateur, qui porte une combinaison assurant sa protection contre les abrasifs sous pression, positionne le jet au dessus de la pièce à préparer. La grenaille circule à l'intérieur de la cabine en circuit fermé, les particules légères sont récupérées à l'aide d'un aspirateur.



Figure III-3 : Etat de surface après sablage.

Les conditions de grenailage ont été réunies dans le tableau III-2 qui suit :

Nature	Corindon projamine
Forme	Angulaire

Granulométrie	0.6-0.8
Pression (Bar)	4
Diamètre de la buse (mm)	9
Distance buse-pièce (mm)	2
Angle de projection (°)	60
Temps de sablage (s)	30

Tableau III-2 : conditions de grenailage.

III.3. METALLISATION DES EPROUVETTES

Les deux projections effectuées que ce soit celle du revêtement ou celle de la sous couche d'accrochage furent réalisées par une seule et même technique, à savoir projection avec un pistolet à arc entre deux fils type "**Arc Spray 234 de Metal Spray**".

L'appareil utilise l'arc électrique comme source d'énergie dont l'utilisation se fait aussi bien manuellement qu'automatiquement, il produit des revêtements de haute qualité.

Les pièces sablées auparavant, passent au poste de métallisation. Avant d'entamer cette opération, l'opérateur procède au réglage du pistolet pour réaliser le dépôt sur les faces sablées.

Les conditions de projection sont résumées dans le tableau III-3 :

Fils	Diamètre (mm)	1.6
	Vitesse d'avance	2(m/min)
Pression d'air dans le compresseur		5 bars
Pression de projection		3 bars
Tension du générateur		30 V
Intensité de courant		100 A
Distance de projection		140 mm
Angle de tir		90°

Tension avant allumage	34 V
Tension après allumage	31 V
Vitesse d'avance de la buse	4 (mm/tour)

Tableau III-3 : Conditions de projection thermique.

Les échantillons ont été refroidis à température et pression ambiante à l'abri des courants d'air.

L'épaisseur des dépôts est relativement variable, elle est d'environ 0,4 mm. Pour les échantillons réalisés avec la sous-couche d'accrochage Cu-Al, l'épaisseur de cette dernière est d'environ 0,2 mm.

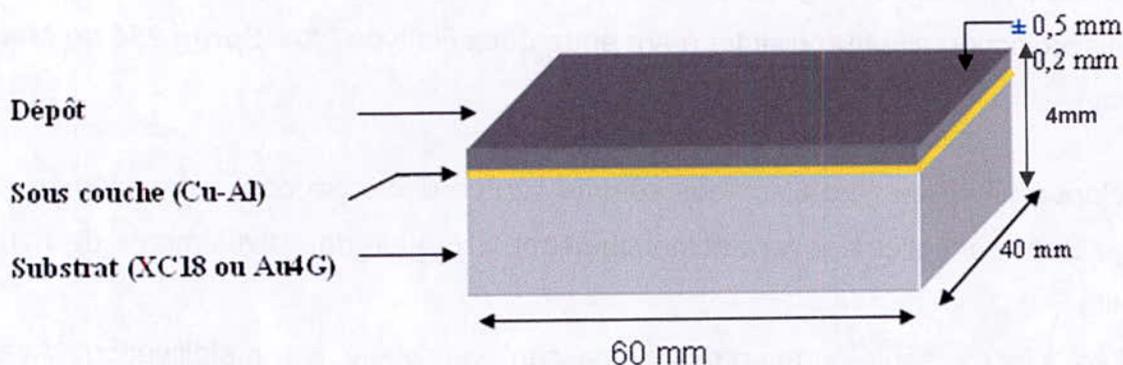


Figure III-4 : Spécifications des échantillons élaborés.

Chaque échantillon sera coupé en quatre petits échantillons de forme parallélépipédique de dimensions (30 mm x 20 mm x 4 mm) ceci pour faire les différents essais et analyses.

III.4. POST TRAITEMENT THERMIQUE

Une partie des échantillons ayant pour base l'acier XC18 ont subi un traitement thermique à 850°C sous vide d'air pendant une heure ; pour les échantillons à base d'aluminium, une partie a été traitée pendant une heure sous vide d'air mais à une

température de 450°C. Le but est d'étudier l'influence du post traitement thermique sur les caractéristiques des multimatériaux.

Les deux lots d'échantillons seront donc divisés en deux catégories, la première catégorie sera traitée thermiquement alors que la seconde restera à l'état brut.

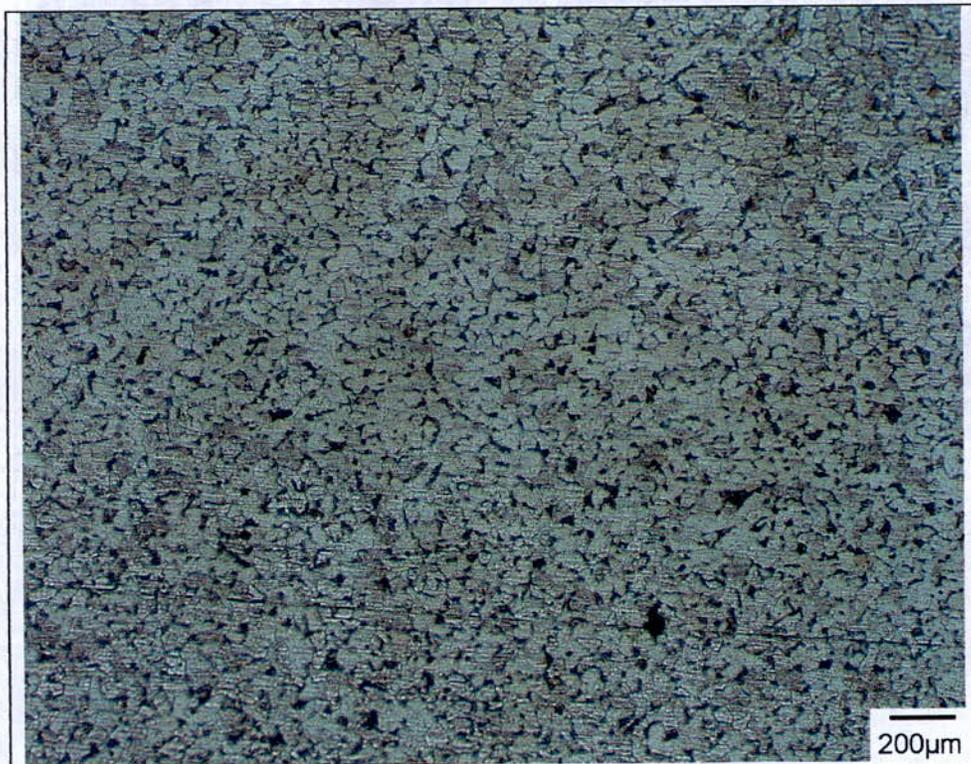


Figure III-5 : Métallographie de l'acier nu traité sans revêtement attaqué au Nital (4%)

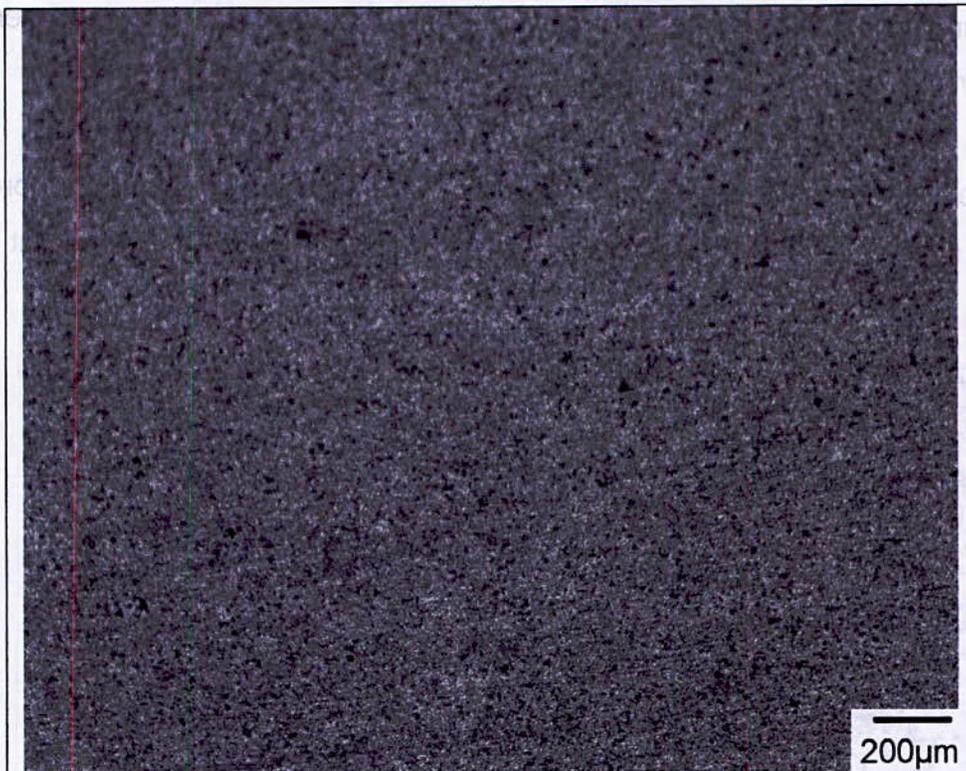


Figure III-6 : Métallographie de l'aluminium nu traité et attaqué a l'acide HF

B. TECHNIQUES D'ANALYSE ET DE CARACTERISATION

Après avoir métallisé les différentes éprouvettes, la deuxième étape consiste à faire une caractérisation métallurgique (structure métallurgique, dureté,) de ces matériaux. Nous procéderons ensuite à l'étude du comportement mécanique du revêtement en micropercussion.

III.5. Analyse métallographique

L'étude métallographique consiste à observer les échantillons selon l'épaisseur afin de mettre en évidence les phénomènes interfaciaux.

La réalisation d'une micrographie nécessite nombre d'opérations :

- Choix du plan de coupe ;
- Découpe ;
- Polissage ;
- Attaque chimique avec le réactif convenable;
- Observation et prise de micrographie.

Cette partie a pour but de mettre en évidence les différentes phases, la structure des différentes couches projetées et du substrat et d'observer les différents pores et oxydes, les infondus ainsi que l'interface de liaison dépôt/substrat. Elle permet aussi de mettre en évidence toute transformation ou diffusion ayant eu lieu au niveau de l'interface.

Dans notre cas on a eu recours à deux types de réactifs. Pour le substrat d'acier la face polie a été attaquée au **Nital à 4%** pour mettre en évidence les différentes phases.

Quant aux échantillons à base d'aluminium ils furent attaqués à **l'acide fluorhydrique HF**.

Notons d'abord que l'observation a révélé que les revêtements projetés directement sur les deux substrats, sans sous-couche d'accrochage, n'ont pas adhéré et le dépôt s'est décollé. Ce type d'échantillons ne sera donc pas concerné par notre étude. Les figures III-7 et III-8 montrent ce décollement.



Figure III-7 : Métallographie du bimatériau Acier XC18 / Acier Inox montrant le décollement du revêtement d'Acier Inox Grossissement X200.

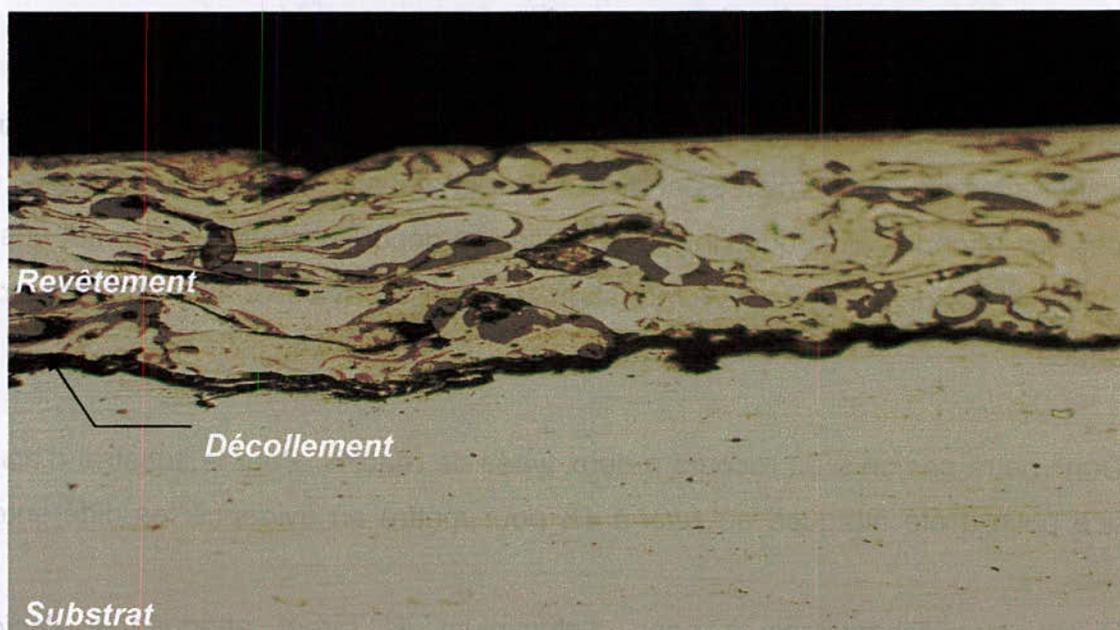


Figure III-8 : Métallographie du bimatériau Acier XC18 / Acier Inox montrant le décollement du revêtement d'Acier Inox Grossissement X100

Les figures suivantes représentent les coupes métallographiques réalisées au niveau de l'interface [dépôt / sous couche / substrat] :

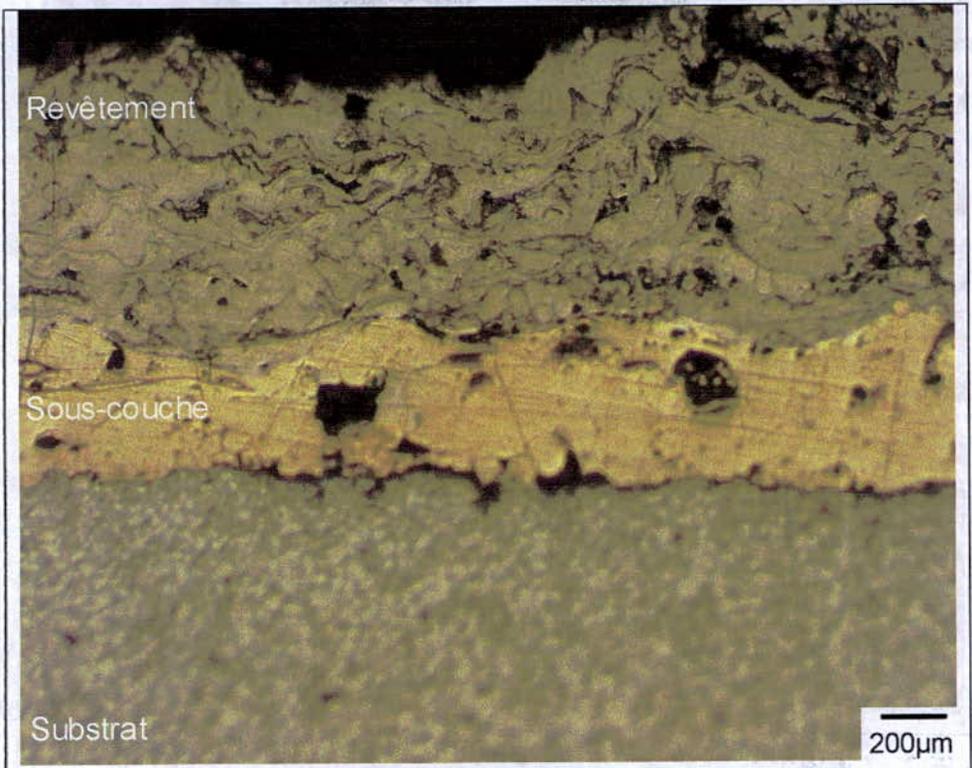


Figure III-9 : Métallographie du multimatériau Acier/Sous-couche/Acier Inox

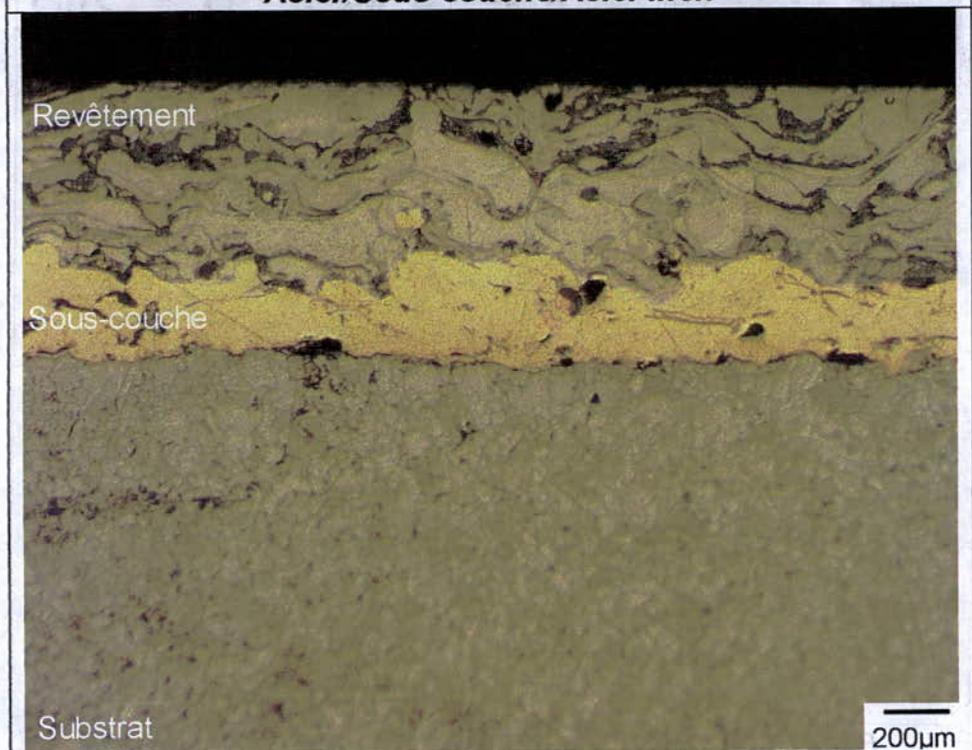


Figure III-10 : Métallographie du multimatériau Acier/Sous-couche/Acier Inox (Traité)

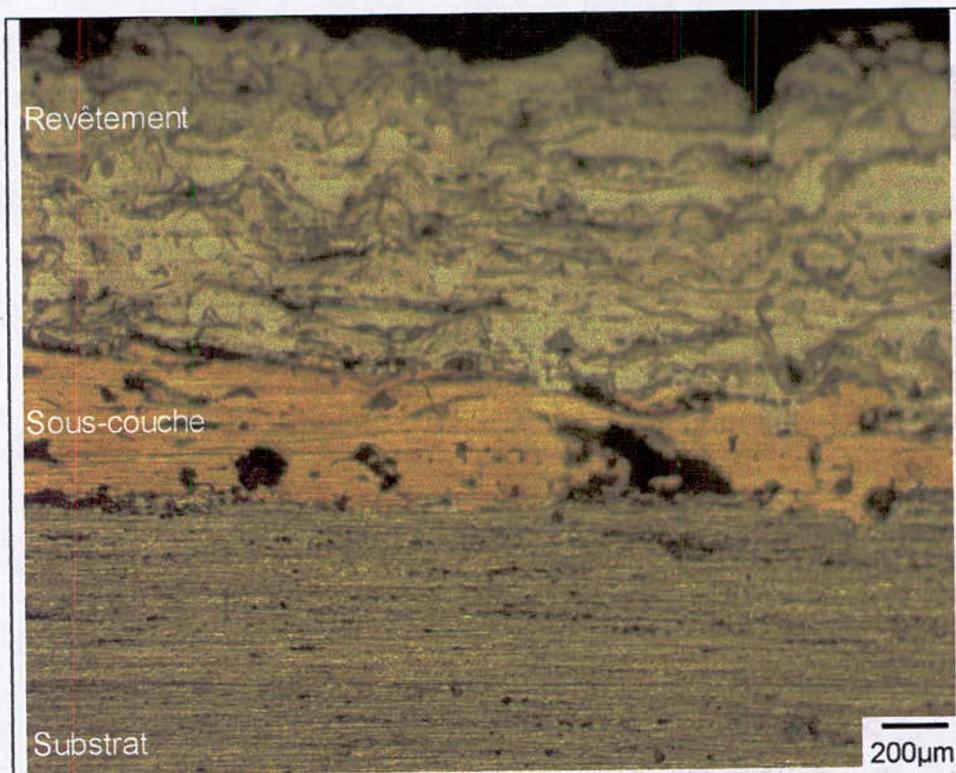


Figure III-11 : Métallographie du multimatériau Aluminium/Sous-couche/Acier Inox



Figure III-12 : Métallographie du multimatériau traité Aluminium/Sous-couche/Acier Inox

Généralement, les dépôts présentent une structure faite d'empilements de particules aplaties plus ou moins enchevêtrées en accord avec les données de la littérature et contiennent des pores et des oxydes comme cela se rencontre classiquement dans les projections thermiques atmosphériques (figures III-9 et III-11).

Dans le cas des échantillons ayant subi le post traitement de recuit pendant 1 heure (figure III-10 et III-12), on remarque après comparaison une redistribution plus homogène des inclusions et des oxydes.

En ce qui concerne les substrats on remarque que leurs structures deviennent plus fines après le post traitement thermique.

III.6. ETUDE DE MICRODURETE

La mesure de la dureté superficielle est un des moyens les plus importants qui permettent de déterminer le comportement physico-chimique.

Du fait que la couche obtenue par projection thermique est mince, on risque avec des pressions élevées de fausser les résultats. De ce fait une filiation de microdureté Vickers a été effectuée sur les multimatériaux réalisés. Chaque valeur représente la moyenne arithmétique de trois tests linéaires transversalement depuis le dépôt jusqu'au substrat ; à noter que l'essai de microdureté se fait à trois endroits équidistants sur le revêtement.

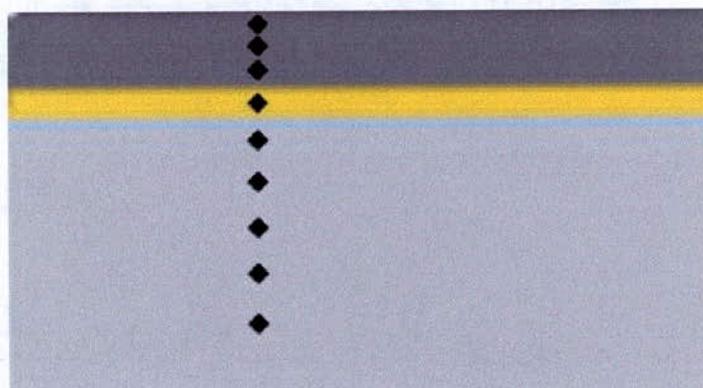


Figure III-13: micro-empreintes effectuées sur les éprouvettes.

La charge retenue est celle de 100 grammes, elle a été appliquée dans tous les cas de figures ; ceci a pour but de ne pas trop fausser les résultats en utilisant de grandes charges.

L'essai consiste à imprimer, dans le dépôt à contrôler, un pénétrateur avec une force déterminer. Les diagonales de l'empreinte obtenue sont ensuite mesurées au microscope optique.

Il est possible d'utiliser un pénétrateur « Vickers », ou un pénétrateur « Knoop ». Dans les deux cas le principe est le même, seule la forme du diamant change.

Pour nos essais nous avons utilisé un microduromètre digital avec interface totalement informatisée.

L'observation se fait sur moniteur et le calcul des diagonales s'effectue à l'aide d'un logiciel fonctionnant sous environnement Windows.

La dureté et la moyenne des essais sont alors calculées automatiquement par le logiciel en question.

Les résultats obtenus on permis de tracer les profils de dureté des deux multimatériaux en fonction de la distance et seront présentés ci-après (figureIII-14 et III-15).

Figure III-13: micro-empreintes effectuées sur les éprouvettes

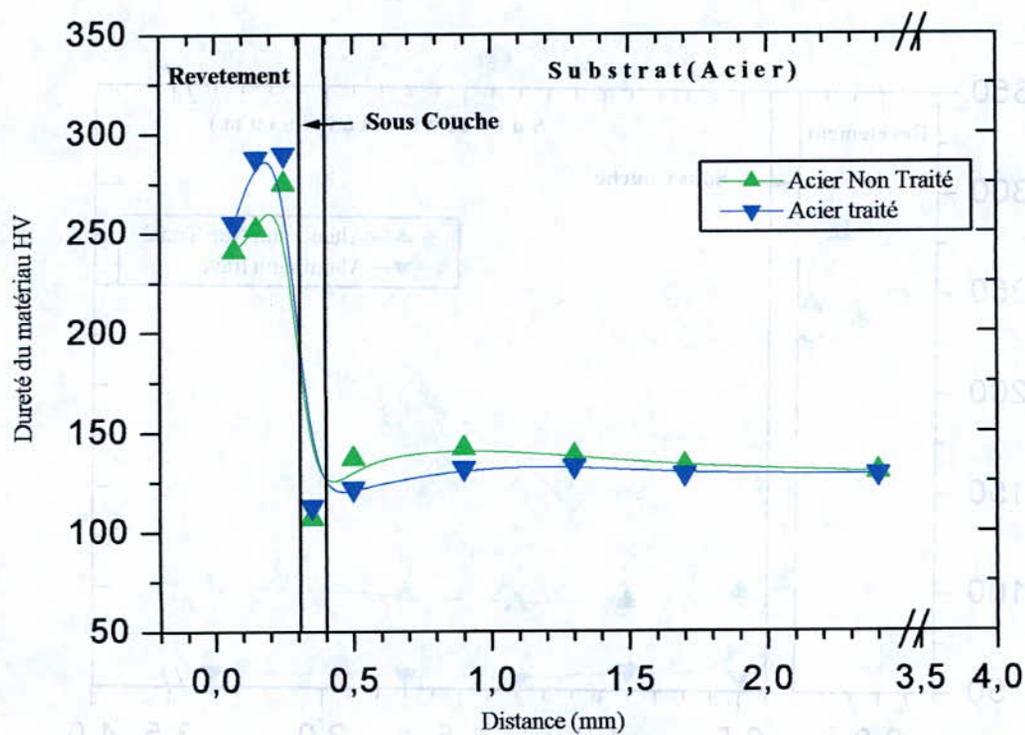


Figure III-14 : Variation de la dureté HV en fonction de l'épaisseur du multi-matériau Inox/S-C/Acier

- **Substrat Acier :**

On remarque d'abord que la dureté du substrat ne subit aucune variation de sa dureté qui reste constante sur tout le substrat (environ 135 HV).

La dureté de la sous-couche de change pas elle aussi ; elle est évaluée à 110HV avant et après traitement thermique.

En ce qui concerne le revêtement, sa dureté avant traitement varie de 245 à 260HV, ce qui veut dire que le post traitement de recuit à 850 °C pendant 1 heure a conduit à une augmentation de la dureté. En fait, ce post traitement a provoqué un durcissement et la dureté a augmenté d'environ 20 à 30 HV. Par exemple elle est passée de 260 à 290 HV sur le deuxième essai effectué au milieu du revêtement.

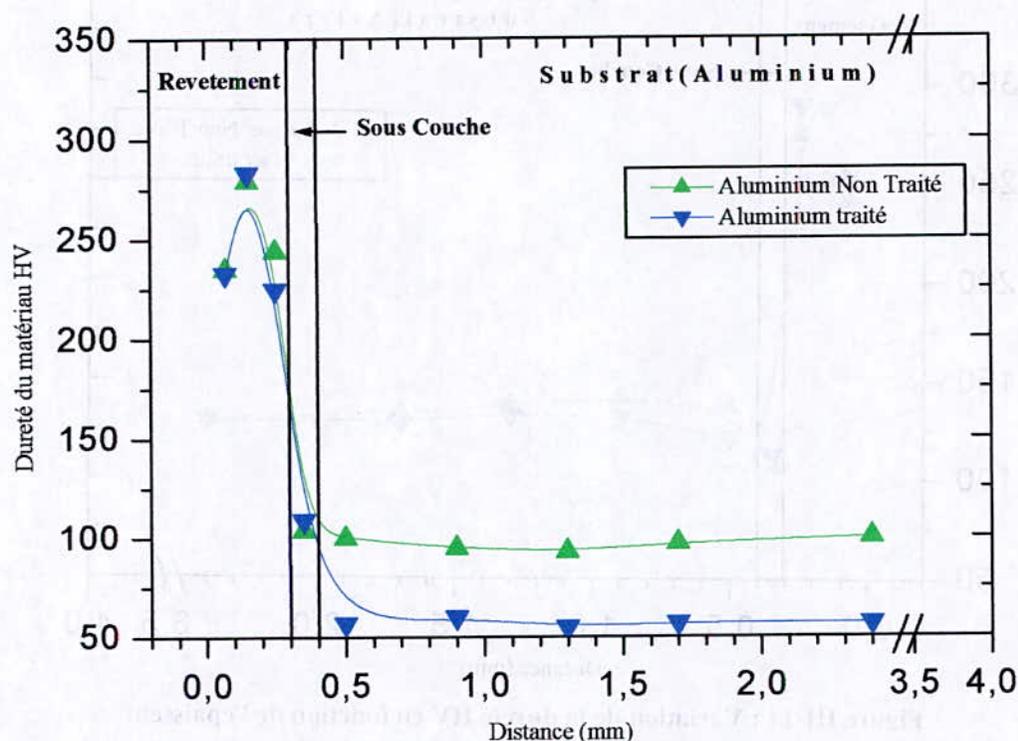


Figure III-15: Variation de la dureté HV en fonction de l'épaisseur du multi-matériau Inox/S-C/Aluminium

- **Substrat Aluminium :**

Contrairement au substrat d'acier, on remarque que la dureté du substrat varie après le traitement thermique. Elle est d'abord évaluée à 100 HV, puis elle chute de moitié après le traitement thermique. Cette chute (dureté 50 HV) est sûrement due à un adoucissement de la structure de l'alliage. Elle peut aussi s'expliquer par une homogénéisation de la structure dans laquelle s'est produit un réarrangement et un affinage des oxydes, des pores et des inclusions tel que remarqué dans les figures III-10 et III-12.

La dureté du revêtement varie de 230 à 275 HV, celle-ci correspondant respectivement à l'extrémité et au milieu du revêtement. Ces valeurs sont comparables à celles déjà mentionnées plus haut pour le cas du substrat acier, sauf que dans ce cas, le post traitement de recuit à 450 °C pendant 1 heure n'a eu aucun

effet sur la dureté du dépôt qui reste constante avant et après traitement, ce qui nous laisse dire que le traitement thermique n'a aucun effet sur le revêtement. La température de 450°C n'étant pas assez élevée pour permettre un quelconque changement de structure.

En ce qui concerne la sous couche, on retrouve la même valeur de dureté que dans le premier cas c'est-à-dire ~110HV ; ce qui veut dire que le traitement n'a activé aucun processus et n'a de ce fait engendré aucune transformation.

En conclusion le post traitement sous vide à une température de 450°C pendant une heure n'aura produit de changement que sur le substrat qui est devenu plus mou.

III.7. MICROPERCUSSION

La partie la plus importante de notre travail concerne l'étude du comportement mécanique sous l'effet d'une micropercussion cyclique des revêtements réalisés.

Elle consiste à soumettre la surface du revêtement des différents multimatériaux à des chocs mécaniques à l'aide d'un perceur. On étudiera l'effet sur la taille des empreintes réalisées, de:

- **La variation de la distance bille – échantillon ;**
- **Diamètre (de la bille) du perceur ;**
- **Nombre de cycles ;**
- **Lubrification (huile)...**

Le lubrifiant utilisé est une huile type 20W40. Cette huile est utilisée pour la lubrification des moteurs de voiture.

III.7.1. Conditions expérimentales :

Rappelons que les substrats sont en aluminium AU4G et en acier XC18 et que le revêtement est en acier inoxydable 18-8. Ainsi chaque catégorie sera divisée en quatre selon que l'échantillon soit lubrifié ou pas et enfin qu'il soit post-traité ou non, on aura les cas suivants:

1-Substrat Acier XC18 ou Aluminium AU4G / Sous couche Cu-Al/ Dépôt Acier Inox sans lubrification.

2-Substrat Acier XC18 ou Aluminium AU4G / Sous couche Cu-Al / Dépôt Acier Inox avec lubrification.

3-Substrat Acier XC18 ou Aluminium AU4G / Sous couche Cu-Al Dépôt Acier Inox + post traitement thermique (à 850 °C et 450°C respectivement) pendant 1 heure sans lubrification.

4-Substrat Acier XC18 ou Aluminium AU4G / Sous couche Cu-Al / Dépôt Acier Inox + post traitement thermique (à 850 °C et 450°C respectivement) pendant 1 heure avec lubrification.

Le plan suivant regroupe tous les cas de figure étudiés :

➤ **Conditions d'essais :**

Les essais de "micropercussion" ont été effectués dans les mêmes conditions pour les deux multimatériaux selon la procédure décrite au chapitre 2.

- Diamètre de l'impacteur : La partie inférieure conique qui est immédiatement en contact avec le revêtement a un diamètre de 2,4mm ;
- Nombre de coups par cycle : 50 coups/cycle ;
- Nombre de cycles : Nous avons commencé par appliquer 5 cycles ce qui représente 250 coups, ensuite nous avons augmenté ce nombre graduellement jusqu'à atteindre les 200 cycles en passant par 10, 20, 50 et 100 cycles ;
- Distance bille-échantillon : la distance qui sépare la pointe de l'impacteur de la surface du revêtement influe sur l'énergie transmise. Celle-ci est d'autant plus grande que l'on éloigne l'échantillon de la pointe ; deux valeurs de la distance ont été utilisées 1mm et 2mm.

III.7.2. Analyse des impacts par microscopie optique :

Le calcul des diamètres fut réalisé à l'aide d'un microscope optique équipé d'une réglette permettant le calcul des diamètres. Le diamètre de l'empreinte est mesuré horizontalement et verticalement ; la moyenne entre les deux diamètres sera calculée pour minimiser les erreurs, l'empreinte n'étant pas parfaitement circulaire. Le microscope utilisé est équipé d'un affichage digital qui donne instantanément la valeur sur son écran.

Des graphes représentant la variation du diamètre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles ont été tracés pour chaque paramètre (lubrification, distance bille-échantillon, traitement thermique). Nous présenterons d'abord les graphes de micropercussions réalisées sur les deux substrats (sans revêtement). Ils montreront le

comportement de ces deux alliages et serviront de comparaison pour les essais sur le revêtement.

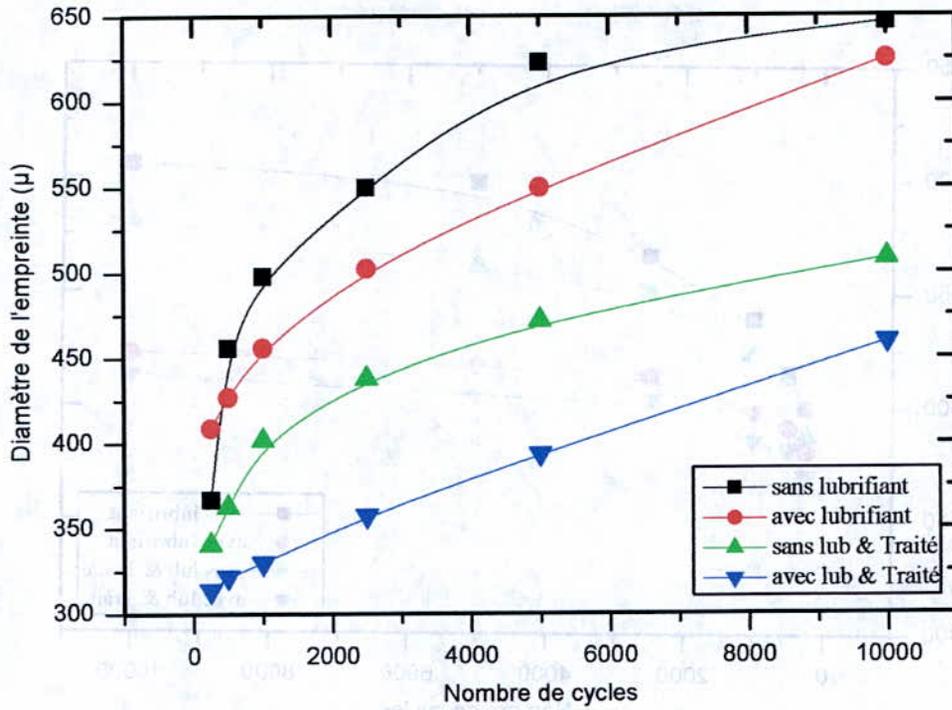


Figure III-16: Diamètre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles pour le substrat d'acier à une hauteur de 1 mm

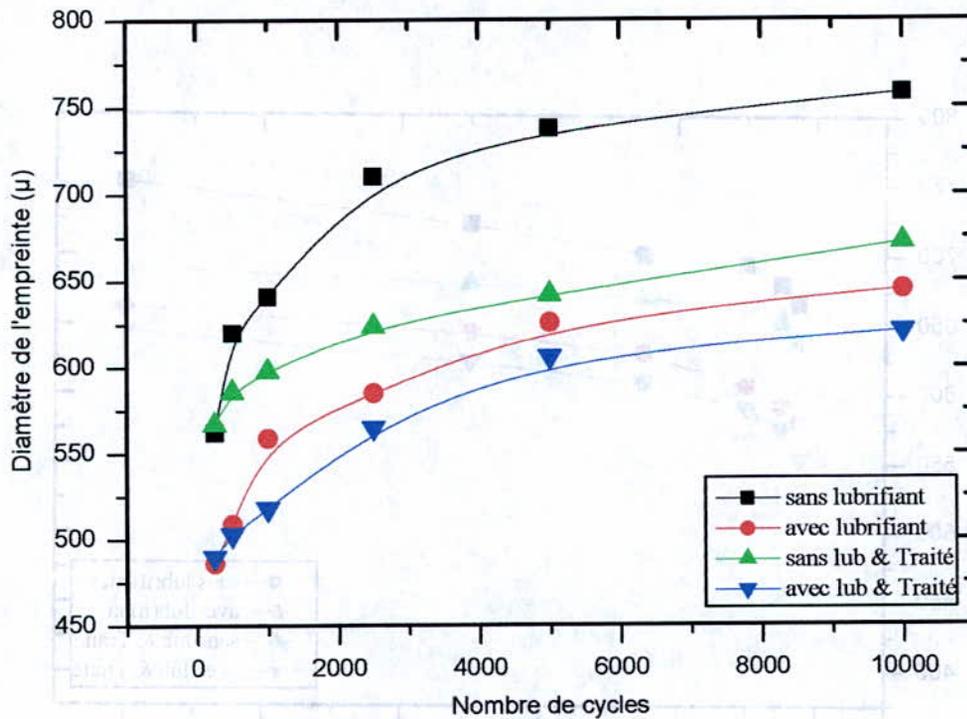


Figure III-17: Diamètre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles pour le substrat d'acier à une hauteur de 2 mm

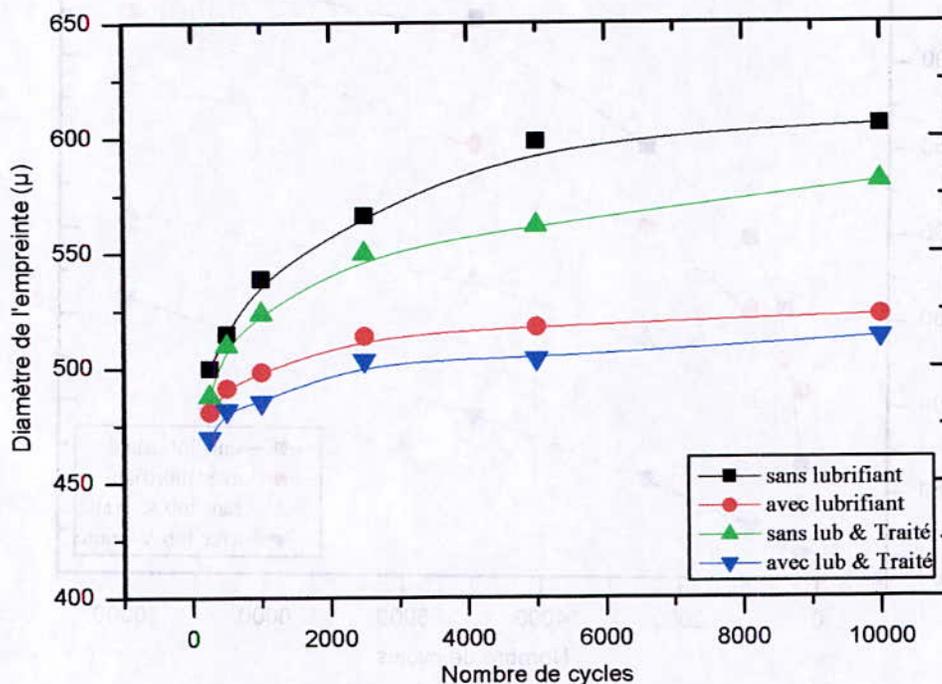


Figure III-18: Diamètre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles pour le multimatériau Acier inox/ Sous-couche / Acier XC18 à une hauteur de 1mm

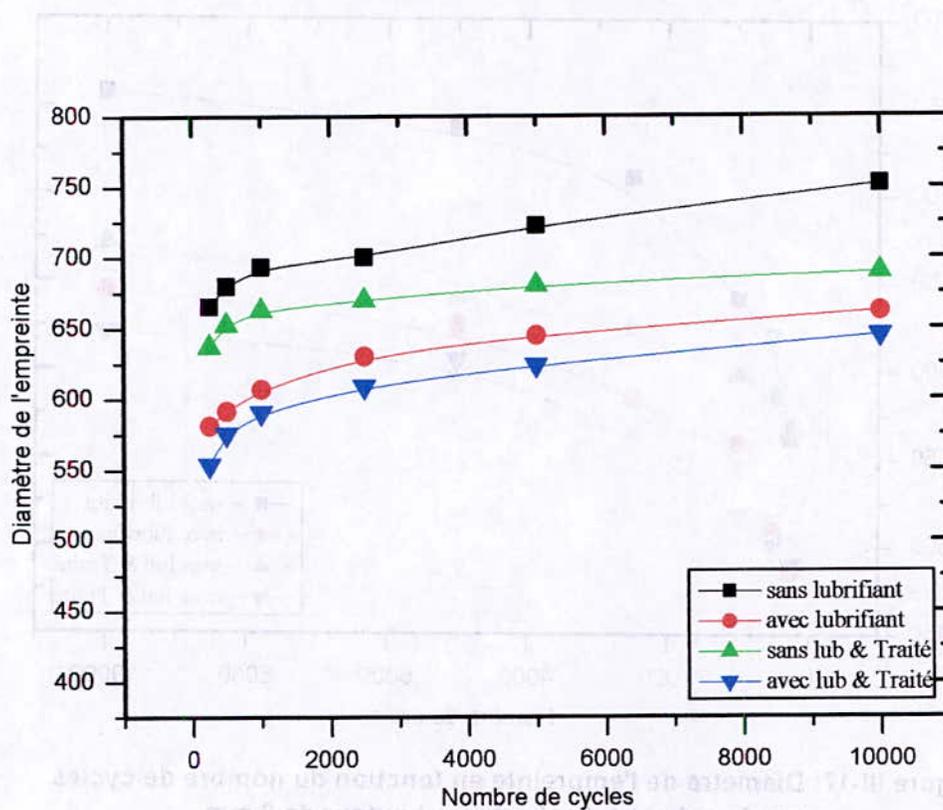


Figure III-19: Diamètre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles pour le multimatériau Acier inox/ Sous-couche / Acier XC18 à une hauteur de 2mm

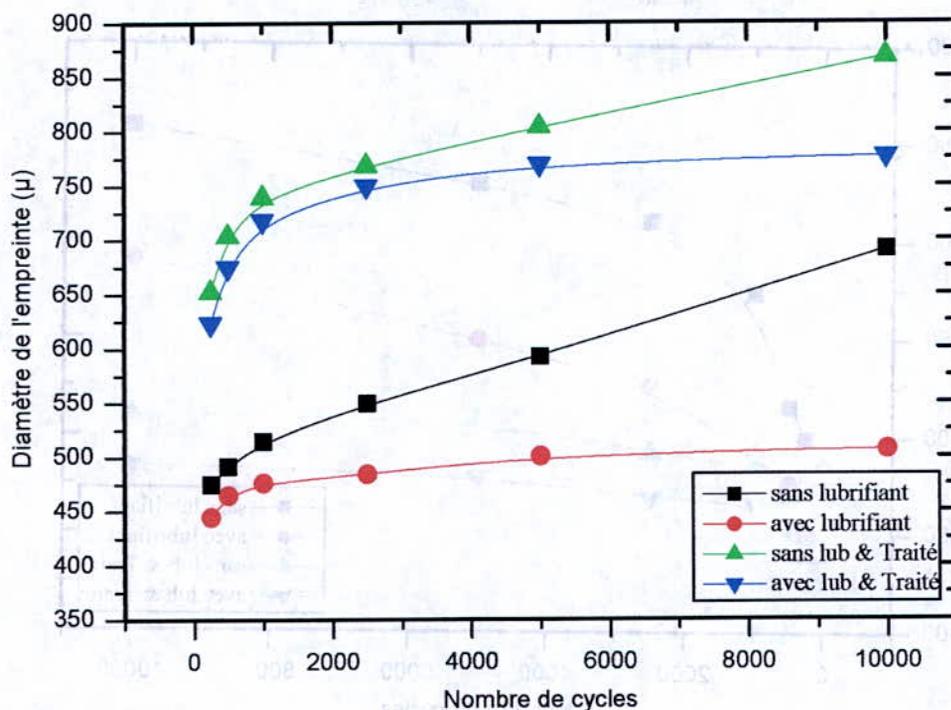


Figure III-20: Diametre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles pour le substrat d'aluminium à une hauteur de 1 mm

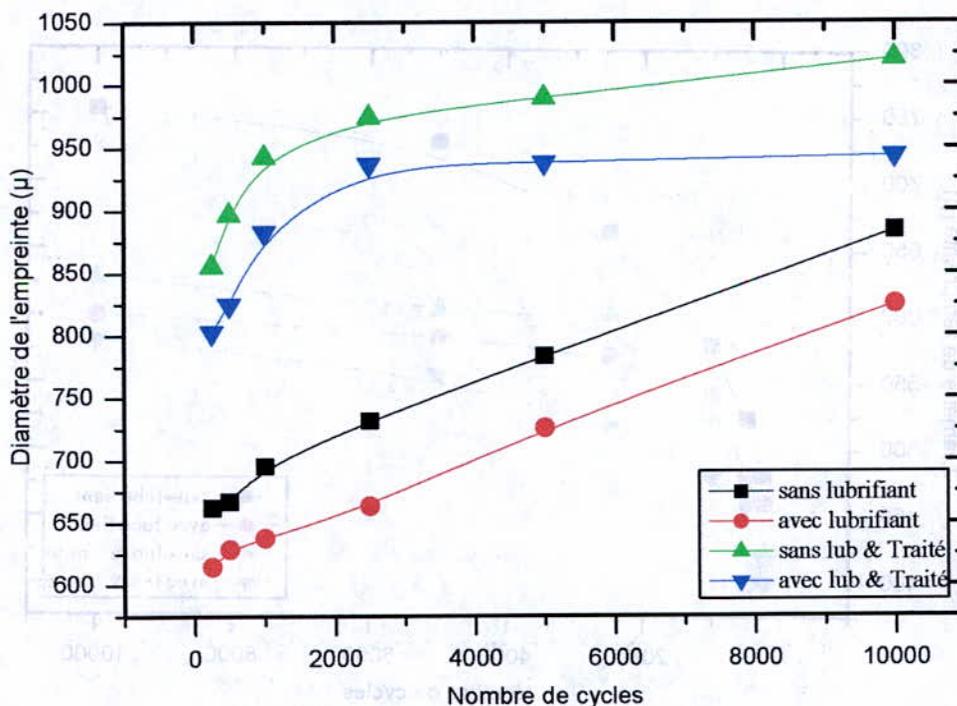


Figure III-21: Diametre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles pour le substrat d'aluminium à une hauteur de 2 mm

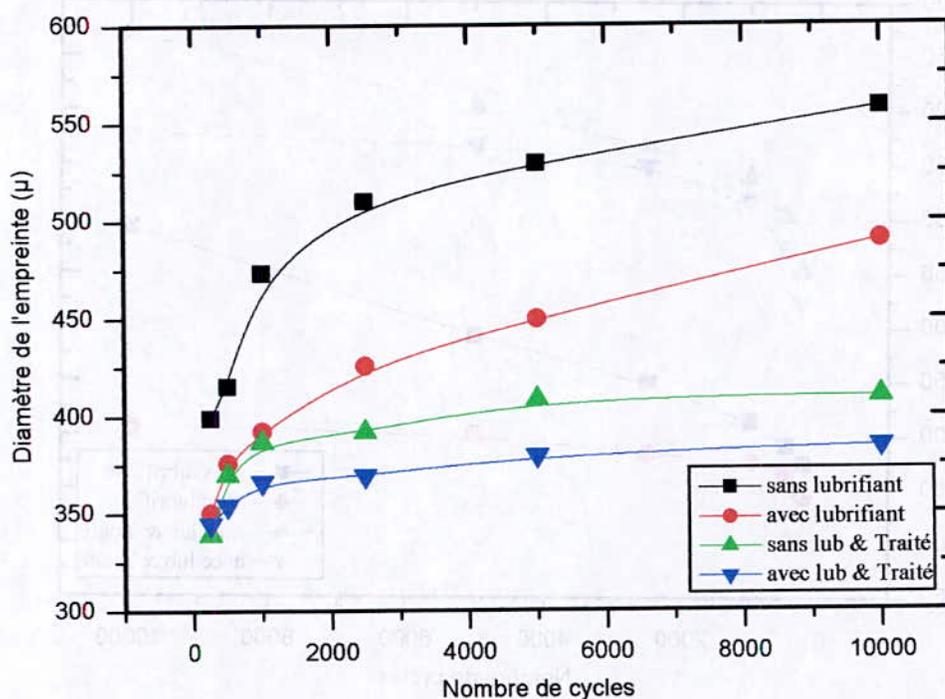


Figure III-22: Diametre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles pour le multimatériau Acier inox / Sous-couche / Aluminium AU4G à une hauteur de 1 mm

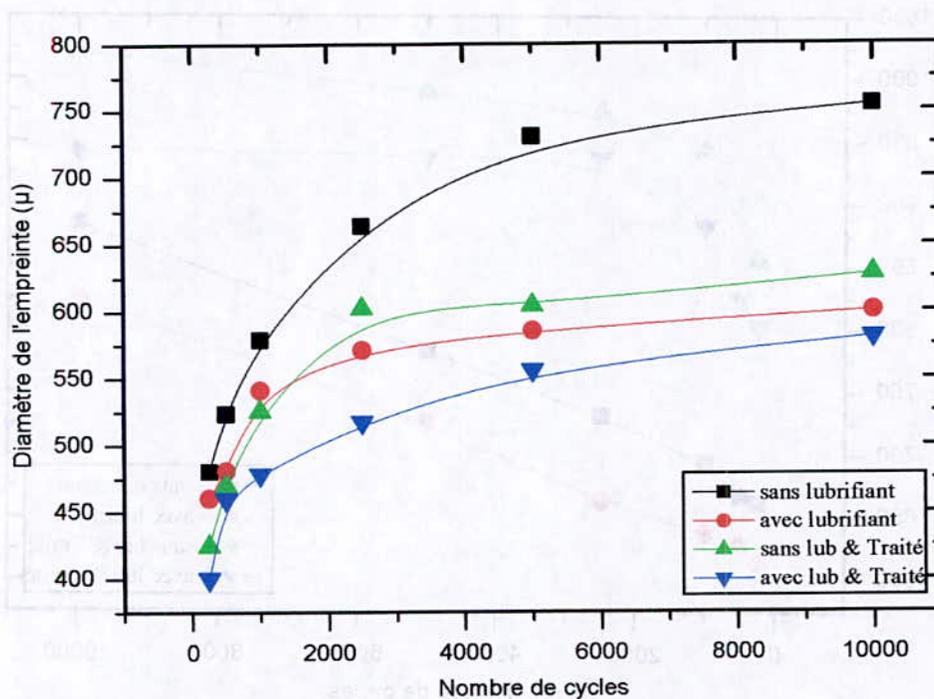


Figure III-23: Diametre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles pour le multimatériau Acier inox / Sous-couche / Aluminium AU4G à une hauteur de 2 mm

III.7.3. Interprétation des courbes représentant les diamètres d'empreintes en fonction du nombre de cycles :

Les courbes sont croissantes, en effet plus le nombre de cycles augmente, plus le diamètre des empreintes augmente ; ceci se traduit par une déformation prononcée du dépôt, ce qui est logique vu que le nombre de chocs est lui aussi croissant. Donc le nombre de cycles est le premier paramètre qui influe sur la résistance du revêtement à la micropercussion,

L'augmentation de la distance a fait déplacer les graphes représentant le diamètre de l'empreinte en fonction du nombre de cycles vers le haut (empreintes plus importantes) quelque soient les paramètres utilisés. Ce qui montre que l'effet de la distance est l'un des paramètres les plus importants qui entraînent une déformation prononcée du matériau.

Le post traitement a pour effet de déplacer les courbes vers le bas sauf pour l'aluminium non revêtu.

Pour ce dernier les courbes se déplacent vers le haut ; donc le matériau devient plus mou, l'énergie absorbée plus importante ; ce qui explique que les empreintes soient plus profondes.

Pour l'échantillon d'acier revêtu, les courbes se déplacent vers le bas, ce qui s'explique par le fait que le revêtement devient plus dur. On peut le vérifier par les courbes de duretés, le revêtement d'inox passe d'une dureté de 260HV à une dureté de 290 HV et donc le diamètre de l'impact sera moins grand vue cette augmentation.

En ce qui concerne l'échantillon d'aluminium revêtu la dureté du revêtement reste inchangée mais les courbes représentant le diamètre de l'empreinte en fonction du nombre de coups se déplacent toujours vers le bas. Ce qui veut dire que le diamètre diminue aussi, sans doute à cause de l'interférence du substrat d'aluminium qui comme cité ci-dessus devient plus mou du fait de la chute de sa dureté après le post traitement. Ainsi il deviendra plus plastique et il pourra absorber une partie de l'énergie induite par le choc du stylet sur le revêtement. Dans ce cas le substrat

jouera le rôle d'amortisseur. L'absorption d'une partie de l'énergie par le substrat veut dire que l'énergie transmise au revêtement sera moins importante et donc le diamètre de l'empreinte sera automatiquement moins grand.

On peut donc conclure que le post traitement contribue de manière différente suivant le substrat à rendre le revêtement plus endurant et plus robuste envers les chocs cycliques.

La lubrification de la surface de contact entraîne une chute de la déformation du matériau ce qui se traduit par un déplacement des courbes vers le bas (le diamètre des empreintes diminue).

L'effet conjugué de la lubrification et du post traitement donne des résultats encore meilleurs avec un déplacement des courbes encore plus vers le bas ; ce qui signifie une meilleure résistance aux chocs.

III.7.4. Analyse des impacts par microscopie électronique à balayage :

Les différents impacts obtenus après micropercussion ont été observés à l'aide du MEB. Les observations ont été faites à deux grossissements différents :

- ❖ Le premier donnant une vue générale de l'empreinte, généralement il ne dépasse pas les $G=150X$. Il concerne la première colonne des micrographies.
- ❖ Le second a pour but d'observer le fond des empreintes dans les régions où on peut mieux détecter et de visualiser d'éventuels fissurations, écaillages, ou tout autre phénomène tel que l'effritement. Il concerne la deuxième colonne des micrographies.

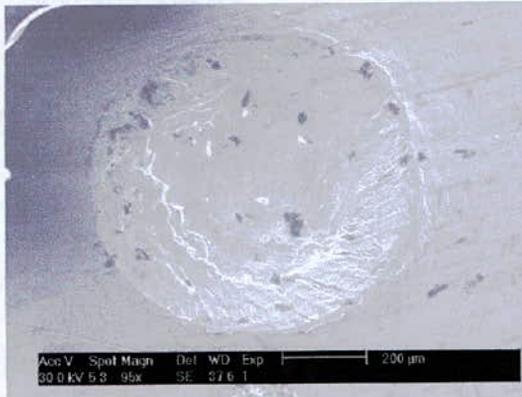


Figure III-24 Acier Nu

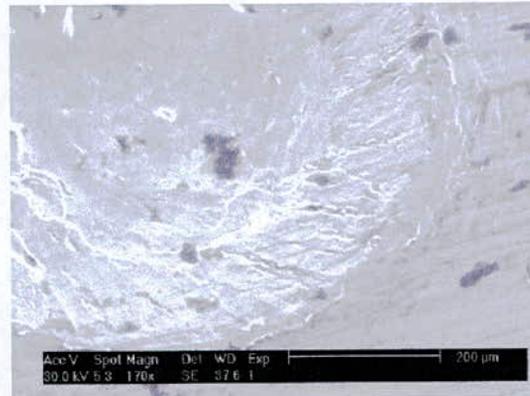


Figure III-25

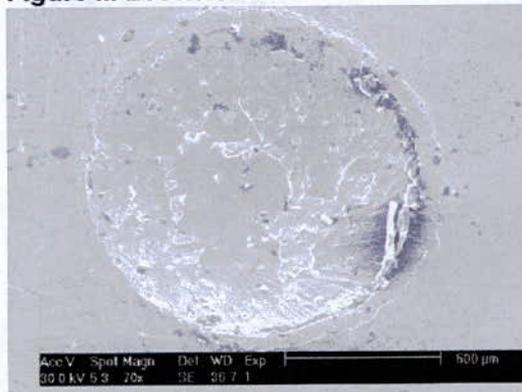


Figure III.26 Acier lubrifié

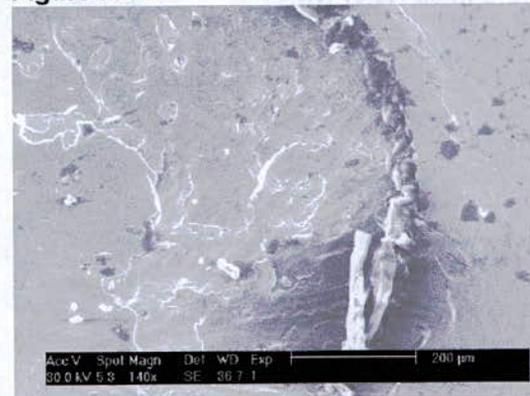


Figure III.27

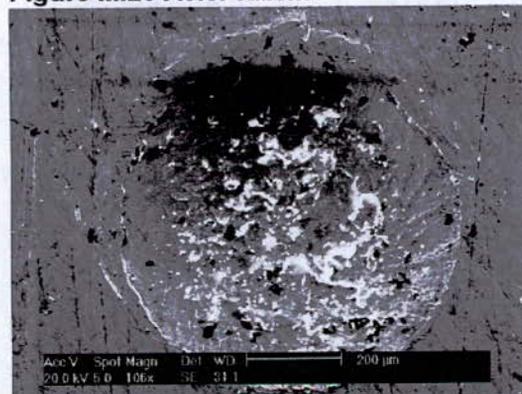


Figure III.28 Acier traité sans lubrifiant

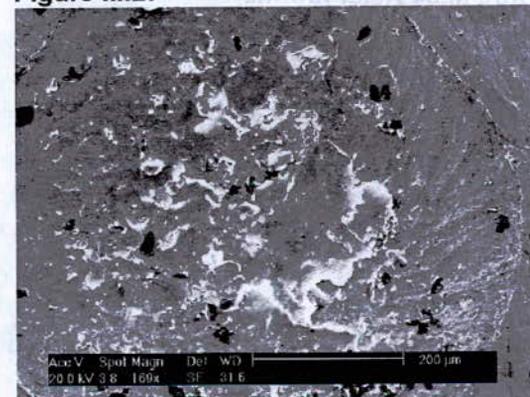


Figure III.29

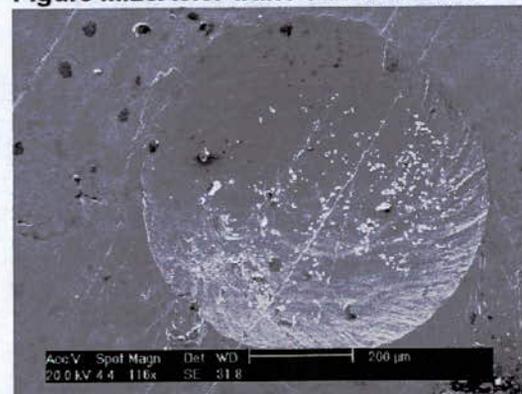


Figure III.30 Acier traité et lubrifié

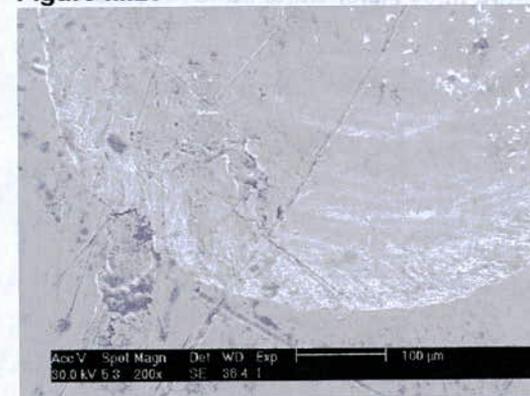


Figure III.31

Micrographies électroniques à balayage des calottes sphériques obtenues après micropercussion (distance 1 mm et 200 cycles) pour l'acier nu sans revêtement.

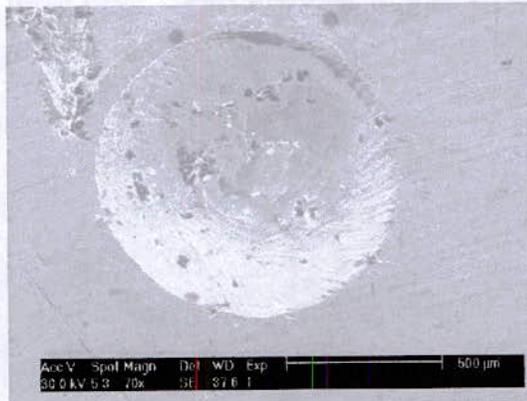


Figure III.32 Acier Nu

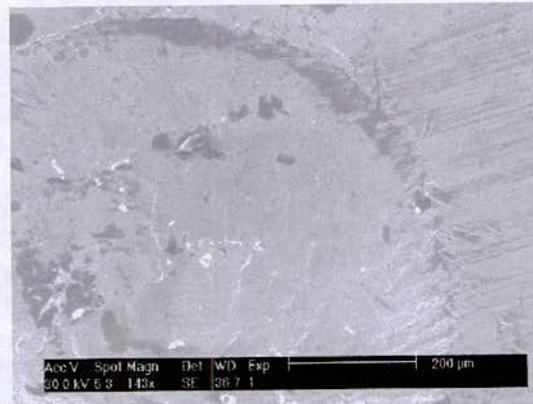


Figure III.33

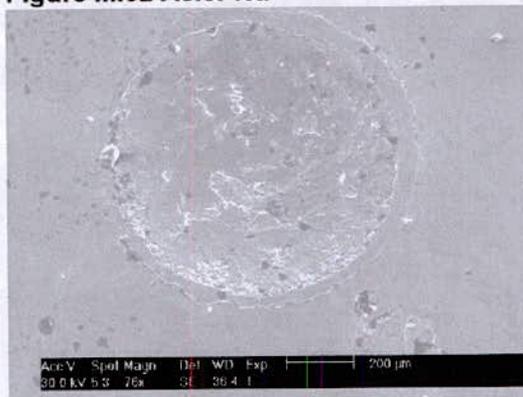


Figure III.34 Acier lubrifié

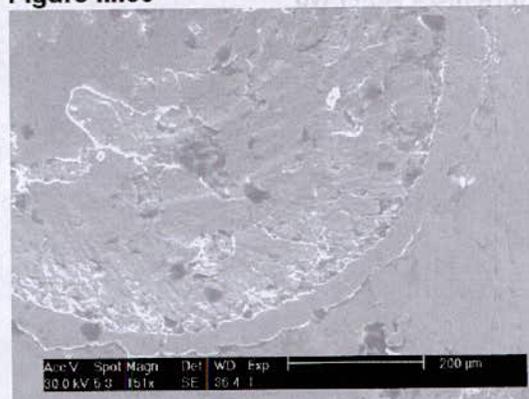


Figure III.35

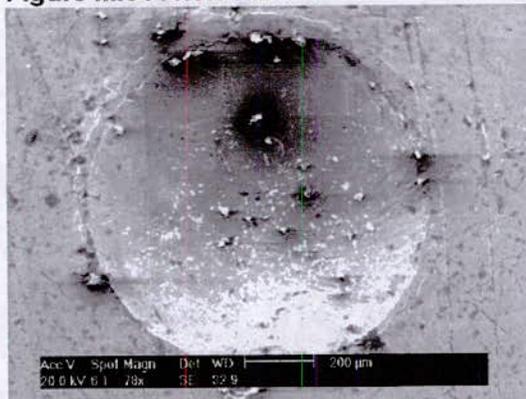


Figure III.36 Acier traité sans lubrifiant

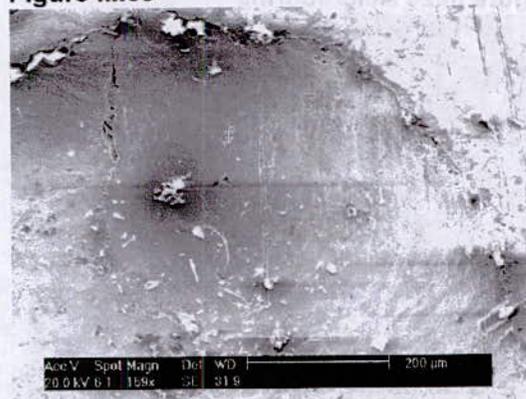


Figure III.37

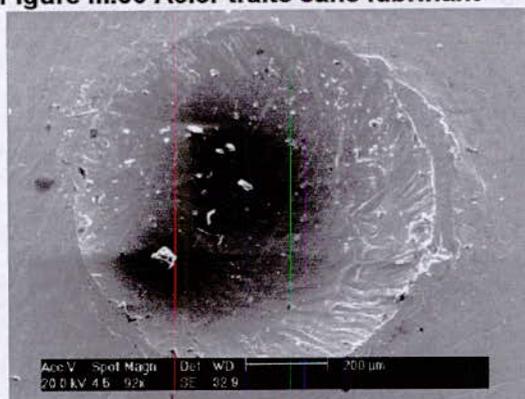


Figure III.38 Acier traité et lubrifié

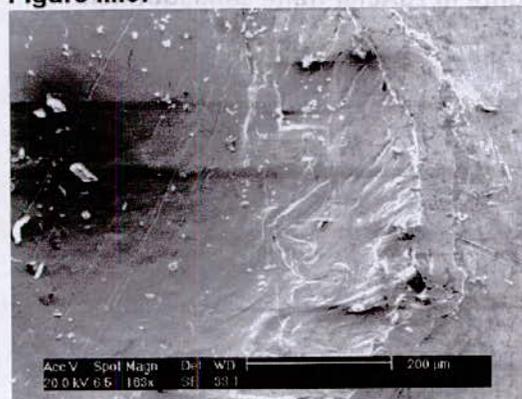


Figure III.39

Micrographies électroniques à balayage des calottes sphériques obtenues après micropercussion (distance 2 mm et 200 cycles) pour l'acier nu sans revêtement.

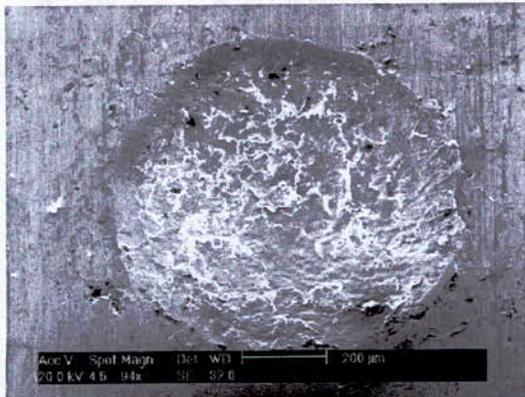


Figure III.40 Acier revêtu

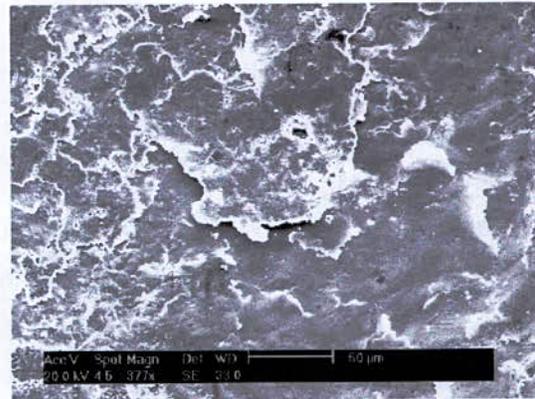


Figure III.41

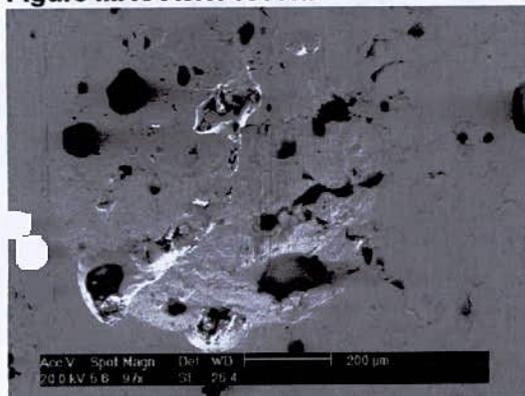


Figure III.42 Acier lubrifié

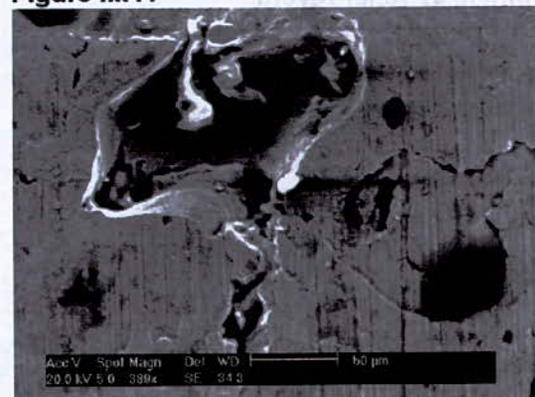


Figure III.43

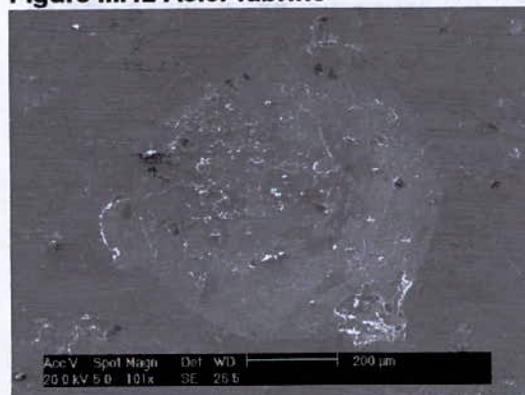


Figure III.44 Acier traité sans lubrification

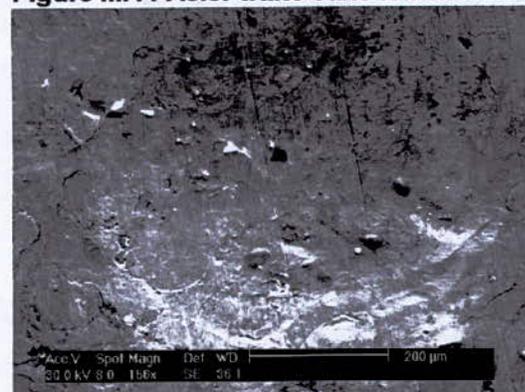


Figure III.45 Acier traité et lubrifié

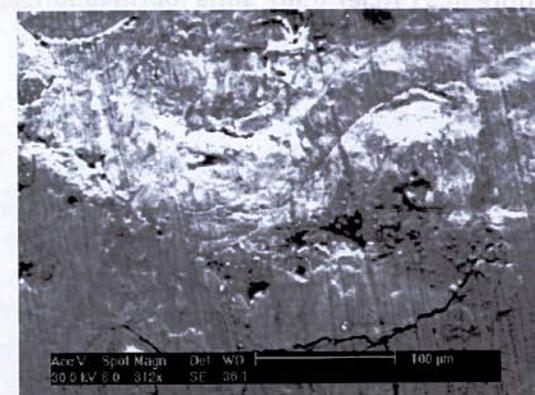


Figure III.46

Micrographies électroniques à balayage des calottes sphériques obtenues après micropercussion (distance 1 mm et 200 cycles) pour l'acier XC18 revêtu d'acier inox.

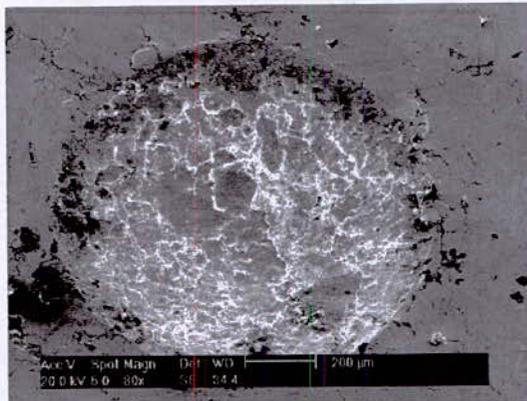


Figure III.47 Acier revêtu

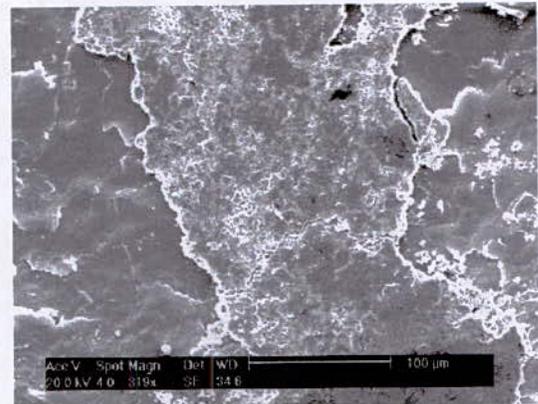


Figure III.48

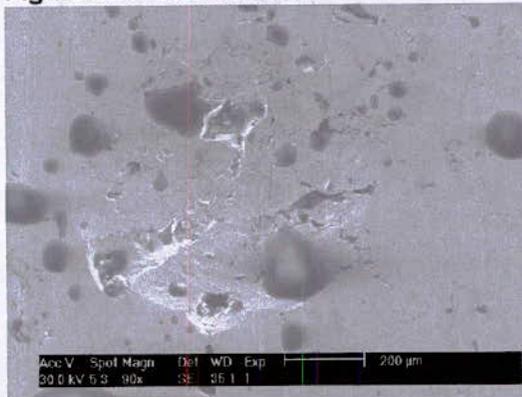


Figure III.49 Acier revêtu et lubrifié

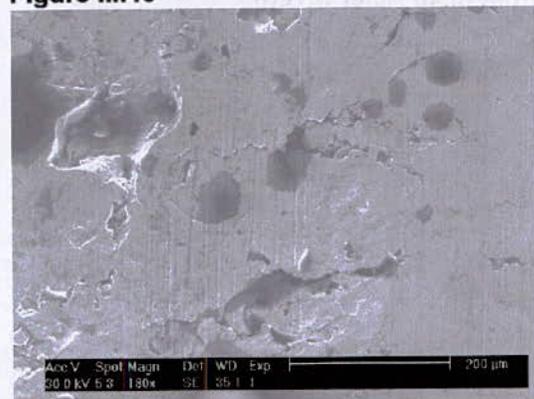


Figure III.50

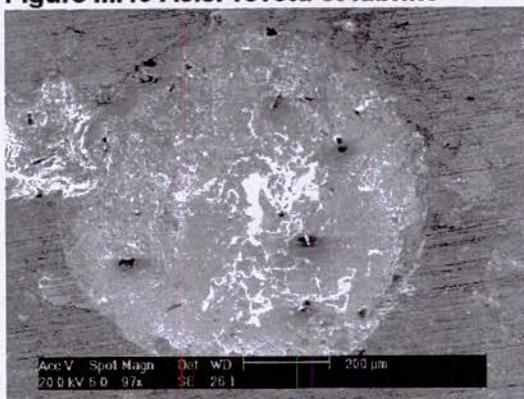


Figure III.51 Acier traité sans lubrification

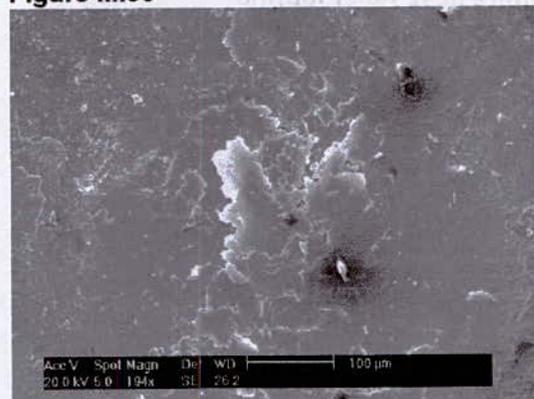


Figure III.52

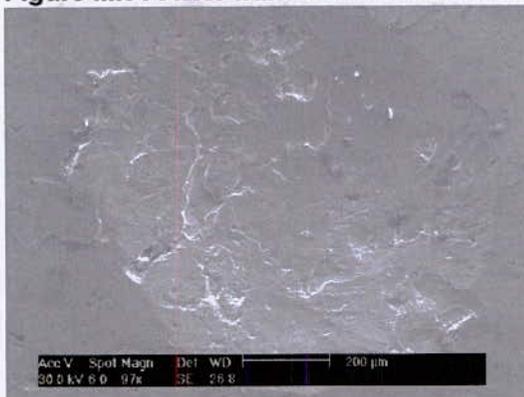


Figure III.53 Acier traité et lubrifié

Micrographies électroniques à balayage des calottes sphériques obtenues après micropercussion (distance 2 mm et 200 cycles) pour l'acier XC18revêtu d'acier inox.

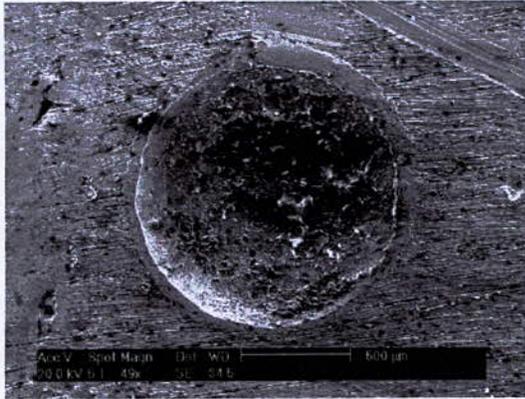


Figure III.54 Aluminium nu

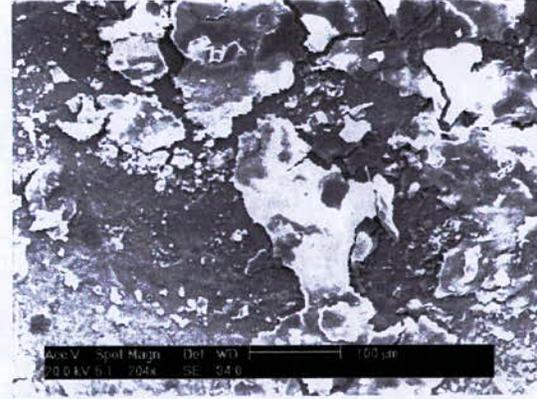


Figure III.55

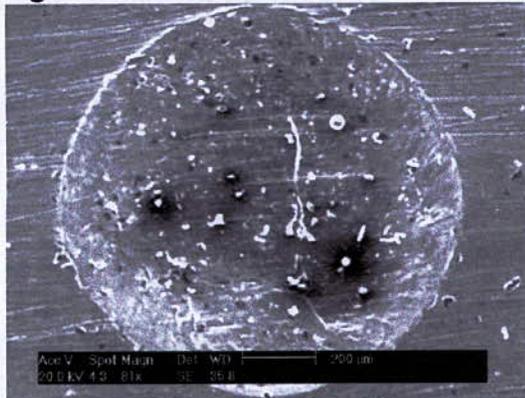


Figure III.56 Aluminium lubrifié



Figure III.57

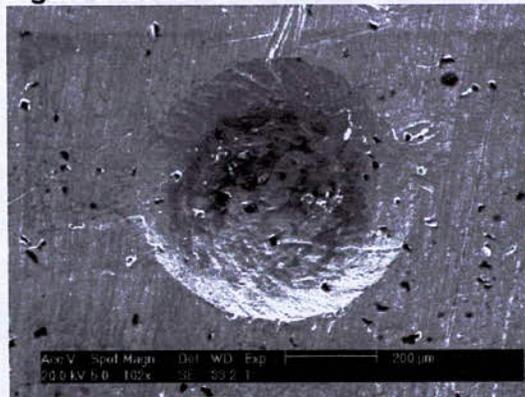


Figure III.58 Alu traité sans lubrifiant

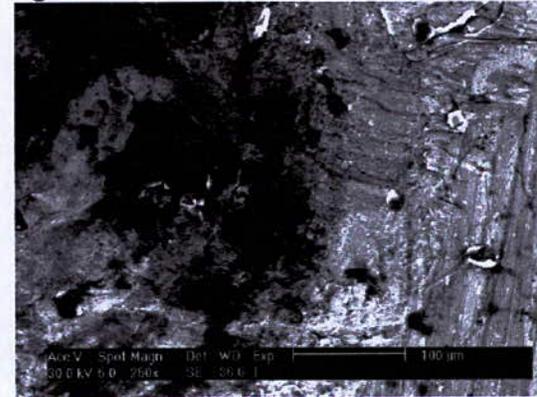


Figure III.59

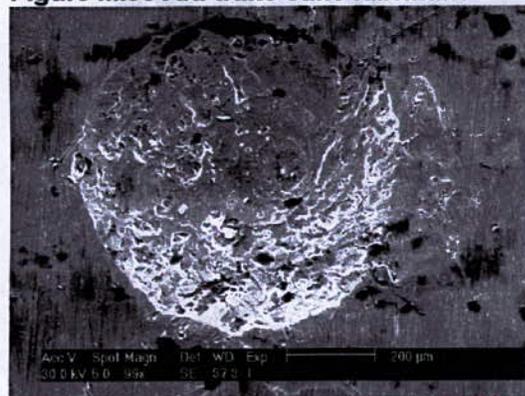


Figure III.60 Aluminium traité et lubrifié

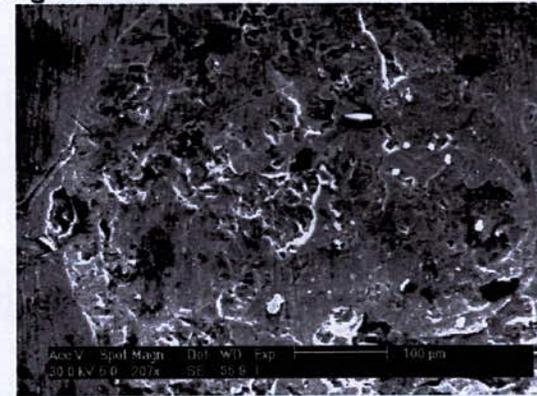


Figure III.61

Micrographies électroniques à balayage des calottes sphériques obtenues après micropercussion (distance 1 mm et 200 cycles) pour l'aluminium nu sans revêtement.

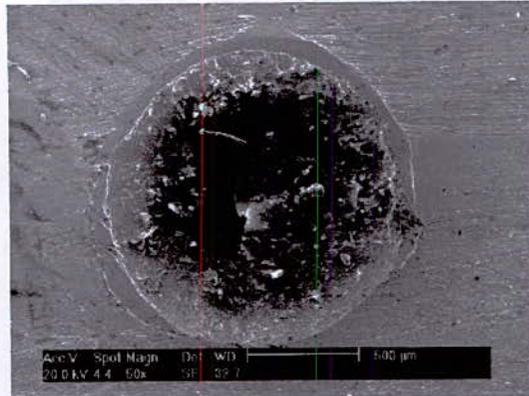


Figure III.62 Aluminium nu



Figure III.63

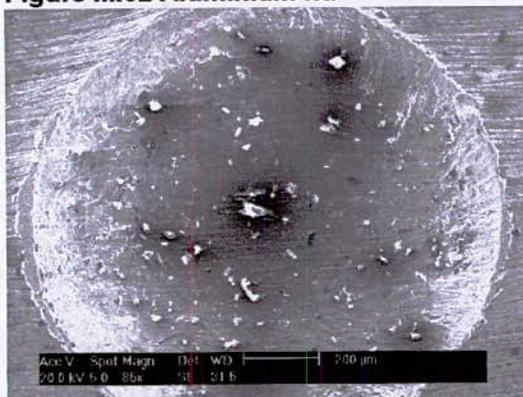


Figure III.64 Aluminium lubrifié



Figure III.65

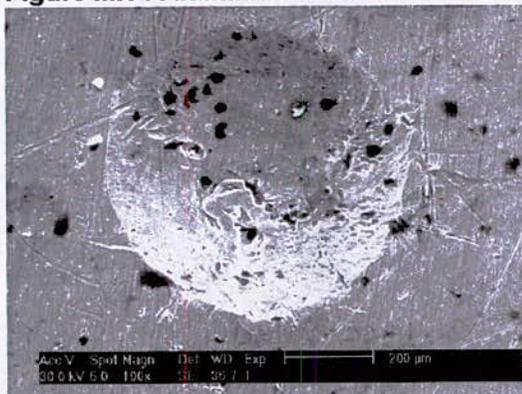


Figure III.66 Alu traité sans lubrifiant

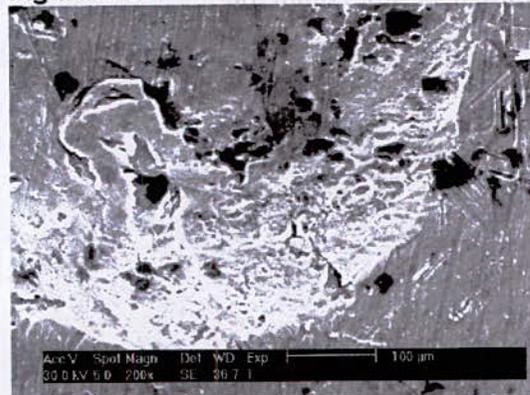


Figure III.67

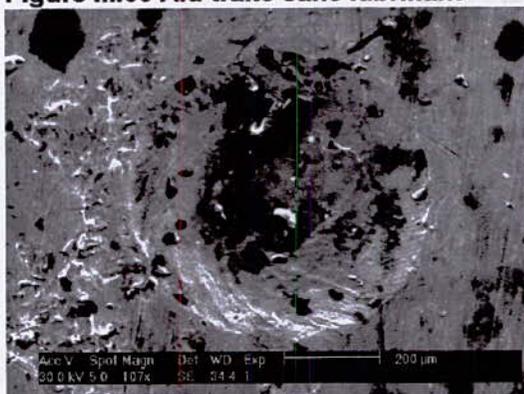


Figure III.68 Aluminium traité et lubrifié

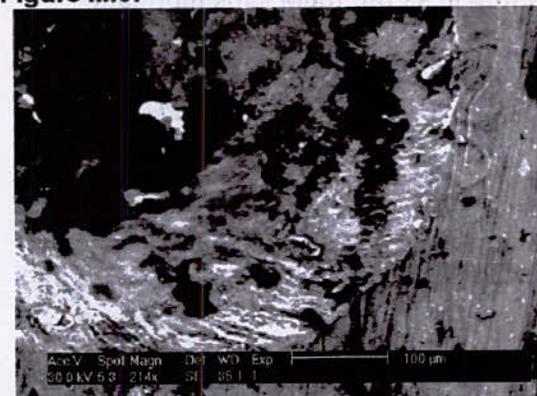


Figure III.69

Micrographies électroniques à balayage des calottes sphériques obtenues après micropercussion (distance 2 mm et 200 cycles) pour l'aluminium nu sans revêtement.

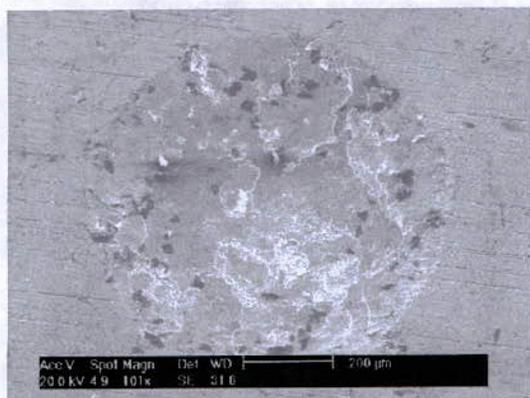


Figure III.70 Aluminium nu

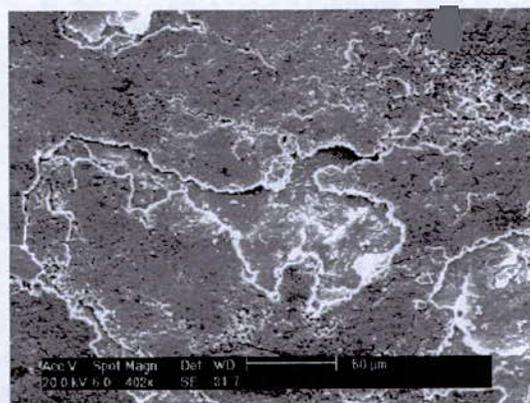


Figure III.71

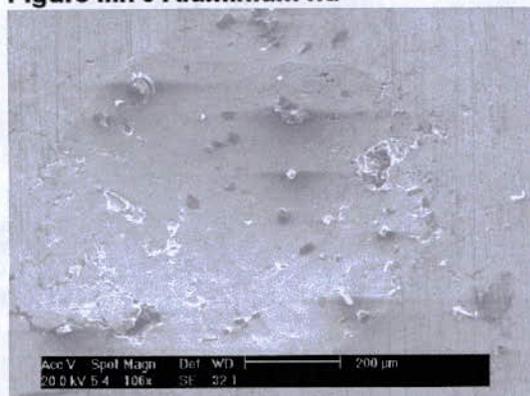


Figure III.72 Aluminium lubrifié

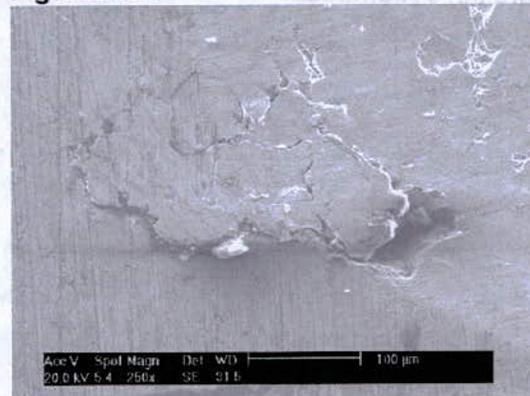


Figure III.73



Figure III.74 Alu traité sans lubrifiant

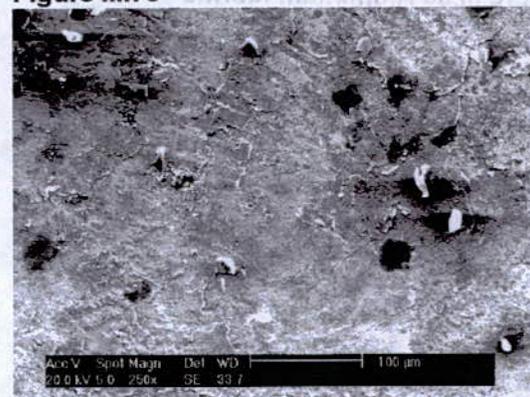


Figure III.75

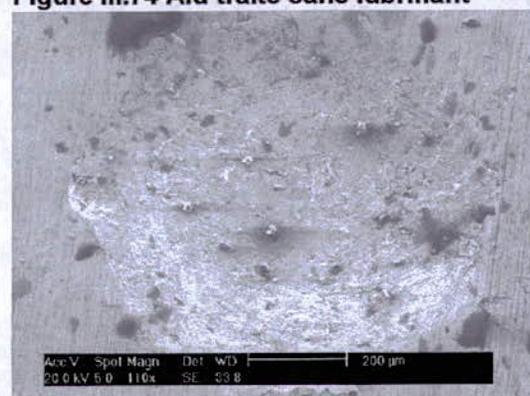


Figure III.76 Aluminium lubrifié et traité

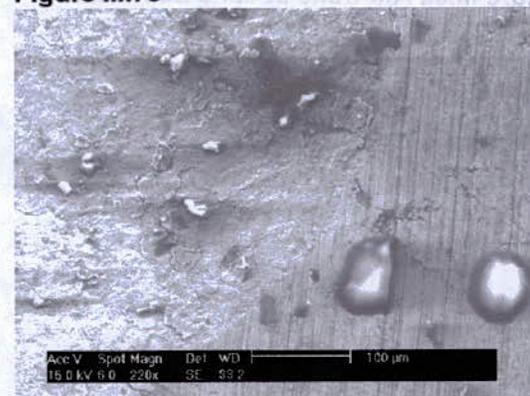


Figure III.77

Micrographies électroniques à balayage des calottes sphériques obtenues après micropercussion (distance 1 mm et 200 cycles) pour l'aluminium revêtu d'acier inox.

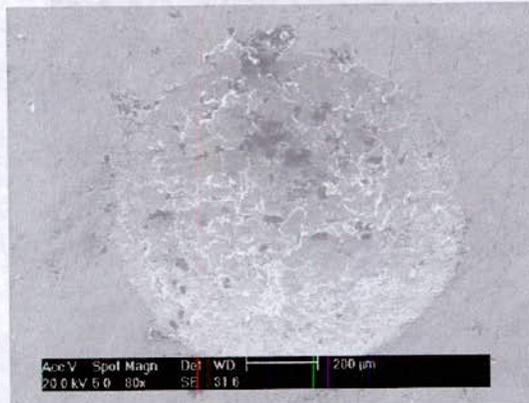


Figure III.78 Aluminium

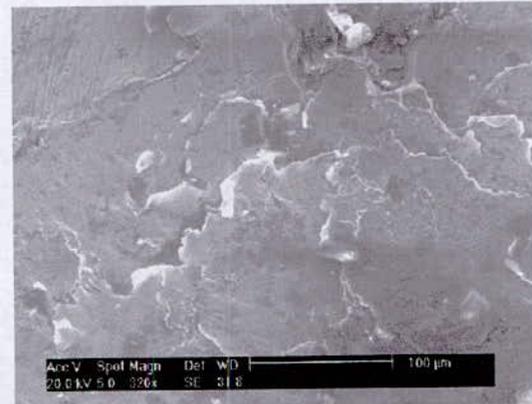


Figure III.79

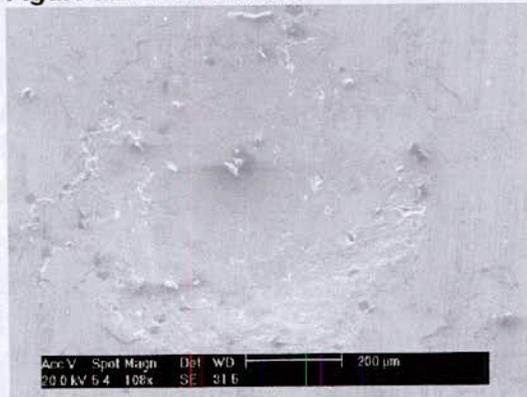


Figure III.80 Aluminium lubrifié

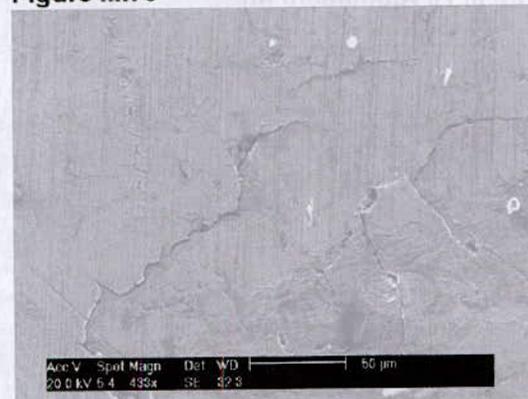


Figure III.81



Figure III.82 Alu traité et sans Lubrifiant

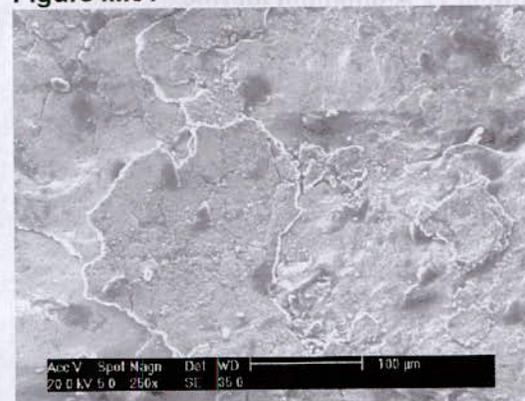


Figure III.83

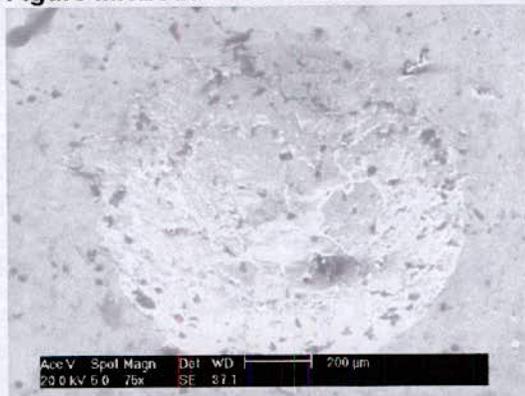


Figure III.84 Aluminium traité et lubrifié

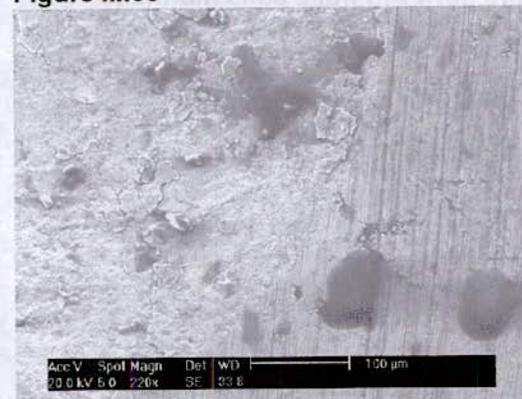


Figure III.85

Micrographies électroniques à balayage des calottes sphériques obtenues après micropercussion (distance 2 mm et 200 cycles) pour l'aluminium revêtu d'acier inox.

III.7.5. Interprétation des micrographies obtenues avec le MEB:

En observant les différentes micrographies, on remarque l'apparition d'écailles dues à la contrainte appliquée au matériau. Ce phénomène est plus marqué dans le cas du revêtement. Ces écailles qui recouvrent la surface de contact tendent à disparaître lorsque la surface de contact est lubrifiée.

La disparition des écailles entraîne dans le cas des substrats l'apparition de petites particules de forme variable et de taille relativement faible (environ $2\mu\text{m}$). Ces particules proviennent sans doute du matériau lui-même. Ce qui nous permet de conclure que la lubrification favorise plutôt l'apparition de fines particules provenant du substrat lui-même et que le phénomène d'écaillage disparaît. On assiste dans ce cas à un effritement ponctuel de la surface du substrat.

Le nombre de ces particules diminue considérablement lorsque le matériau est traité et devient presque nul dans le cas de l'acier.

Dans le cas de l'aluminium, la diminution peut s'expliquer par le fait que le substrat devient moins dur après traitement ; cela a été vérifié par les courbes de micro-dureté où l'on note que le substrat perd 50% de sa dureté du fait de ce traitement. Cela veut dire qu'il devient plus malléable et pourra donc se déformer sans s'effriter.

Dans le cas de l'acier, on remarque que la dureté ne varie que peu après le traitement thermique. De ce fait, tout porte à croire que le matériau qui a subi une transformation de sa structure micrographique est devenu moins sujet à l'effritement d'où la diminution observée du nombre de particules.

Par conséquent, l'effet conjugué des deux paramètres sus cités, à savoir la lubrification et le traitement thermique, permet de faire disparaître les deux phénomènes précédents que ce soit l'écaillage (sous l'effet de la lubrification) ou bien l'effritement (sous l'effet du post traitement thermique).

L'application de la lubrification du point de vue tribologique permet de diminuer le diamètre de l'empreinte, ce qui veut dire que le revêtement devient plus résistant.

La distance entre le stylet et le matériau est un autre paramètre qui rentre en considération lors de la micropercussion. En effet plus la distance est grande plus l'énergie transmise est grande à fortiori que le mode de percussion utilisé est le mode électromagnétique.

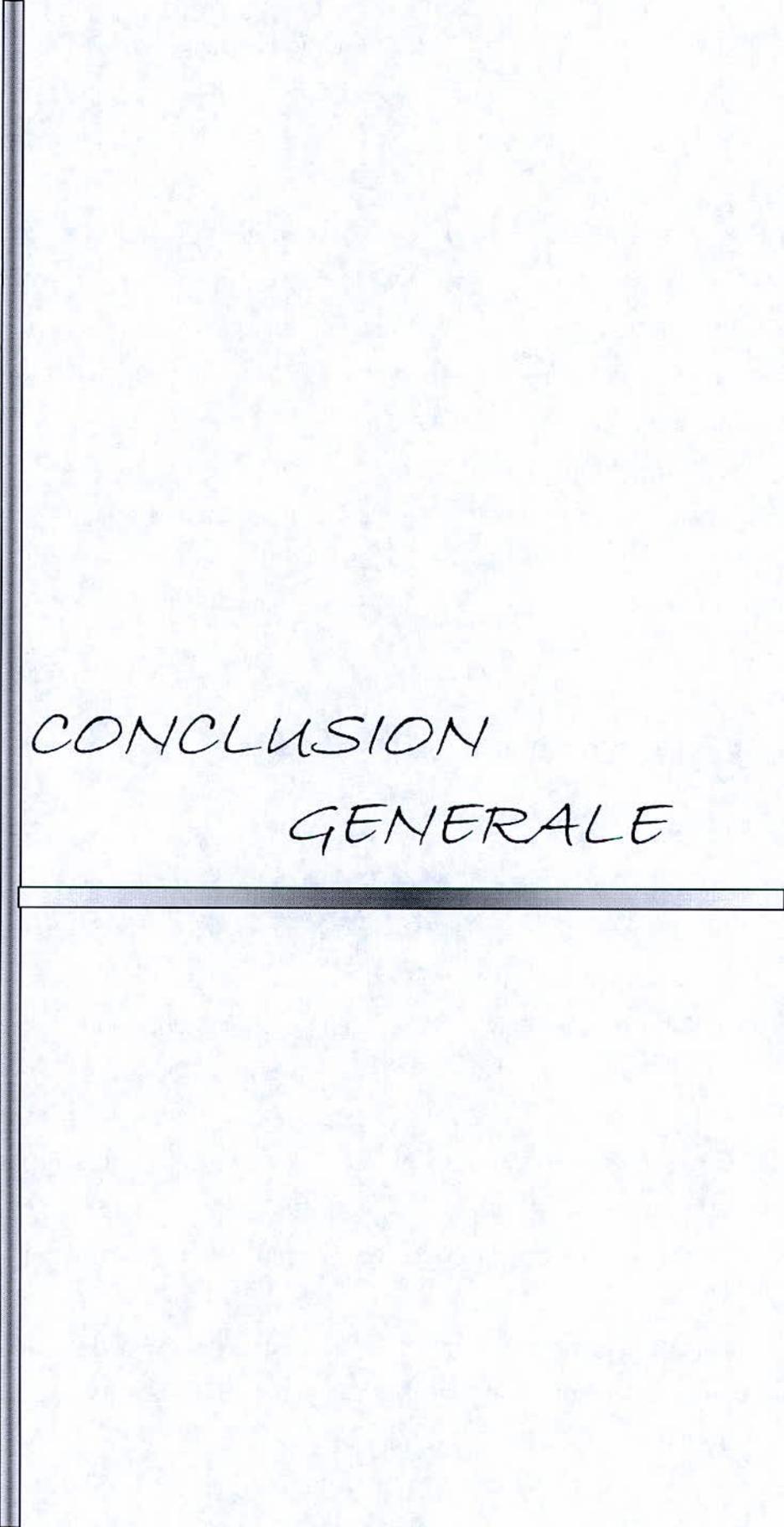
Dans notre cas, l'augmentation de la distance bille-échantillon a permis d'avoir des empreintes plus profondes et un diamètre plus grand. Cela est dû au fait que les contraintes de percussion appliquées sont plus élevées, ce qui génère un choc plus intense.

L'augmentation de la distance a fait que le phénomène d'écaillage est plus prononcé.

L'augmentation de la distance a permis aussi de constater que la fragmentation est plus prononcée au niveau de la surface du substrat. Le nombre de particules arrachées est plus élevé pour la distance de 2mm.

La plasticité que possède l'aluminium et que n'a pas l'acier explique en partie l'apparition de fissures observées au MEB sur le substrat d'acier non revêtu. En effet sur ce dernier on note l'apparition de fissures dues au fait que l'acier n'a pas l'aptitude qu'a l'aluminium à absorber les chocs et donc l'énergie transmise par le stylet est directement transmise au substrat qui ne réussit à amortir qu'une partie assez faible de cette énergie. Le reste engendre des fissurations plus ou moins importantes selon le cas et tendent à disparaître avec le traitement thermique et la lubrification mais augmentent avec la distance Stylet-Substrat du fait que l'énergie transmise est fonction de cette distance. Donc plus cette distance augmente plus l'énergie fournie est grande et plus les fissurations sont plus prononcées.

Comme cité ci-dessus, les fissures disparaissent quand la surface de contact est lubrifiée. Elles disparaissent aussi quand le substrat est traité ; le traitement



CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude avait pour objectifs :

- La réalisation de revêtements d'acier inoxydable sur deux substrats, l'un à base d'acier XC18, l'autre à base d'alliage d'aluminium.
- L'étude de l'effet de la sous-couche sur l'adhérence du revêtement au substrat.
- La caractérisation métallurgique et mécanique des multimatériaux obtenus, basée principalement sur une analyse métallographique, une filiation de microdureté et une étude du comportement en micropercussion.
- Et enfin l'influence des paramètres de micropercussion tels que la lubrification, le traitement thermique, le nombre de cycles, et la distance bille-échantillon sur le comportement des revêtements.

Au vu des résultats obtenus et de leur interprétation, on peut dire que :

- L'étude métallographique nous a permis de visualiser la structure des revêtements et de l'interface. Nous avons remarqué que les dépôts réalisés sont stratifiés et pourvus de pores et d'oxydes comme classiquement attendu dans de tels procédés de projection thermique.
- L'adhérence des revêtements projetés sans sous couche d'adhérence est très faible ; le dépôt s'est en effet décollé en plusieurs points de l'interface, ce décollement était même visible à l'œil nu dans certains cas. Ce qui nous pousse à dire que la présence de la sous couche est obligatoire dans le cas des projections d'aciers inoxydables. Elle joue un rôle très important dans l'adhérence du revêtement, et ce grâce à ses propriétés qui sont intermédiaires entre celles du substrat et du dépôt.
- Dans le cas des échantillons ayant subi le post traitement de recuit pendant 1 heure, on remarque après comparaison une redistribution plus homogène des inclusions et des oxydes.

- Les dépôts obtenus ont une dureté variant de 260-290 HV. Cette dureté est relativement élevée comparée à celle du matériau de base ; elle permettrait d'avoir une meilleure tenue aux chocs.
- Suivant la température du traitement thermique la dureté du revêtement projeté est soit restée inchangée dans le cas du traitement à 450°C, soit elle a augmenté dans le cas du traitement à 850°C.
- L'augmentation du nombre de cycles influe sur le diamètre de l'empreinte qui croît de manière exponentielle.
- La lubrification de la zone de contact percuteur-revêtement permet une diminution sensible de la déformation du dépôt.
- Le traitement thermique a contribué, mais de manière différente dans chaque cas, à diminuer la déformation par micropercussion du dépôt projeté.
- Le profil de dureté tracé montre que la dureté du revêtement s'est accrue après le traitement thermique à 850°C, ce qui a eu pour effet de déplacer les courbes de micropercussion vers le bas ; ce qui signifie que le diamètre des empreintes a chuté et que la déformation du revêtement est moindre.
- Les interprétations du profil de dureté tracé et de la courbe représentant les diamètres d'empreintes en fonction du nombre de cycles ont permis de conclure que le traitement thermique à 450°C n'a aucune influence sur la dureté du revêtement. Néanmoins on observe un adoucissement du substrat et une chute de sa dureté. On a aussi noté que le diamètre des empreintes laissées par les chocs cycliques était moins important ; ce qui est vraisemblablement dû à l'amortissement des chocs par le substrat devenu plus mou.

Les perspectives de ce travail sont larges. On peut citer :

- L'observation dans le plan diamétral des zones affectées par les impacts ; une analyse de la zone déformée pourrait donner plus d'indications et apporter peut-être des éléments nouveaux.
- L'utilisation de paramètres de micropercussion différents. Il sera intéressant d'imaginer de nouveaux impacteurs (nature, géométrie,...), et de voir la réaction du multimatériau à des chocs plus intenses et plus répétés.

- Du point de vue industriel, il serait sans doute intéressant aussi de perfectionner l'essai de micropercussion et d'en faire un système de qualification et de caractérisation des traitements de surface.
- Une autre étude du comportement mécanique (fretting, percussion, ou fatigue...) de ces multimatériaux pourrait être envisageable.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

[1] A.CORNET, .P.DEVILLE, Physique et ingénieur des surfaces, Edition EDP Sciences 1998

[2] Alain PRONER, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M1645 (Société AREGA), 2005

[3] Sylvain Audisio, Marcel Caillet, Alain Galerie, Henry Mazille, Revêtement et traitement de surface (fonctionnalités, durabilité, procédés), Collection des sciences appliqués de l'INSA de Lyon, Octobre 1998.

[4] Guide d'emploi de la projection thermique, CETIM 1989

[5] Raymon Bensimon, Guide d'emploi de la projection a chaud en mécanique, CETIM 1977

[6] Struers A/S Pederstrupvej 84DK-2750 Ballerup, Denmark www.struers.com
struers@struers.fr Préparation métallographique des revêtements par projection thermique.

[7] M. LARIBI, Caractérisation et modélisation métallurgique et mécanique de matériaux à gradients fonctionnels réalisés par projection thermique, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2003

[8] La projection thermique Marché et domaines sectoriels, Cahier de l'ingénieur, Mars98

[9] Struers A/S Pederstrupvej 84DK-2750 Ballerup, Denmark www.struers.com
struers@struers.fr Caractérisation matériellographiques des systèmes multicouches modernes utilisés pour les composants à gaz de combustion dans les grandes turbines à gaz pour la production d'électricité stationnaire

[10] Manuel de conduite et d'entretien Machine de marquage à commande numérique CN200 Sm et CN200 Sp. Technifor, Miribel (France), 1996

- [11] A.C SEKKAL. Etude des transformations tribologiques de surfaces ou « TTS » induites par impacts a énergie contrôlée. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lyon 2001.
- [12] www.technifor.com Machines de marquage par micropercussion CN212, Technifor 2005
- [13] Struers A/S Pederstrupvej 84DK-2750 Ballerup, Denmark www.struers.com
STRUERS@STRUERS.FR Préparation métallographique de l'acier inoxydable