

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF

MEMOIRE

Présenté à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision

Pour l'Obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option : Mécanique Appliquée

Par

Mohamed Sadek KEHIL

THEME

**Tenue à l'usure d'un acier ordinaire à dépôt d'alumine
par plasma**

Soutenu le 30 /06 /2012 devant le jury composé de :

HAMIDOUCHE Mohamed	Pr.	Université de Sétif	Président
LOUCIF Kamel	Pr.	Université de Sétif	Rapporteur
OUAKDI El Hadj	Pr.	Université de Sétif	Examineur
DJEDDOU Ferhat	M.C	Université de Sétif	Examineur

Dédicace

Je dédier ce modeste travail :

A

Ma source éternelle d'inspiration, de motivation et de bénédiction ... Ma mère

Mon maître de passion, de patience et de persévérance ... Mon père

Mes soeurs et mes frères

Mes amis

Ma promotion

M^{ed}. Sadek

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au niveau de l'institut d'optique et mécanique de précision, Université Ferhat Abbas de Sétif, Algérie.

*Je remercie au premier lieu le bon **Dieu** pour m'avoir donné le courage et la volonté pour achever ce travail..*

*Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à monsieur **Kamel LOUCIF** professeur à l'université Ferhat Abbas et directeur de mon mémoire, pour m'avoir encadré, initié à la recherche et pour sa patience et soutien permanent. J'ai tout particulièrement apprécié ses encouragements et ses conseils qui m'ont été très précieux et qui m'ont permis de mener à bien mon travail.*

*Je remercie vivement **M. BENGHALEM** Maître conférence, à l'université Ferhat Abbas, pour son aide durant ce travail.*

*Mes profonds remerciements à monsieur **HAMIDOUCHE Mohamed**, professeur à l'université Ferhat Abbas qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Je tiens également à remercier vivement monsieur **OUAKDI El Hadj** professeur à l'université Ferhat Abbas, **DJEDDOU Ferhat** Maître conférence et monsieur à l'université Ferhat Abbas pour avoir consacré leurs temps précieux à lire et à évaluer ce travail.*

Sommaire

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

Chapitre I : Techniques et procédés de revêtement

I. Introduction.....	3
I.1 Techniques de déposition.....	4
I.1.1 Les méthodes chimiques.....	4
I.1.1.1 Dépôt chimique en phase vapeur CVD.....	4
I.1.1.2 Dépôt chimique en phase liquide (CSD).....	5
I.1.2 Les méthodes physiques.....	5
I.1.2.1. Dépôt physique en phase vapeur (PVD).....	5
I.1.2.2 Pulvérisation cathodique.....	6
I.1.2.3 Ablation par laser.....	6
I.3 Projection thermique.....	7
I.3.1 Projection à la flamme.....	8
I.3.2 Projection à la flamme supersonique (HVOF).....	9
I.3.3 Projection à détonation.....	10
I.3.4 Projection par arc électrique.....	11
I.3.5 Projection supersonique à froid (« Cold Spray »).....	12
I.3.6 Projection plasma.....	12
I.4. projection plasma.....	12
I.4.1 Principe de la projection plasma.....	13
I.4.2 Modes de projection plasma.....	13
I.4.3 Fonctionnement de la torche à plasma d'arc.....	14
I.4.4 Interaction plasma-particules.....	14
I.4.5 Construction d'un dépôt projeté plasma.....	15
I.4.6 Analyse comparative des procédés de projection thermique.....	16
I.5 Usure des revêtements.....	17
I.6 Contraintes dans les revêtements.....	18
I.7 Contraintes résiduelles dans les couches minces.....	19

Chapitre II : Eléments de tribologie

II. Introduction.....	21
II.1 Définition.....	21
II.2 Système tribologique.....	21
II.3 Le circuit tribologique.....	22
II.4 Paramètres fonctionnels.....	23
II.4.1 Mode de contact.....	23
II.4.2 La charge du contact.....	23
II.4.3 La vitesse du contact.....	24
II.4.4 Etats de surface.....	24
II.4.5 Environnement.....	25
II.4.6 Matériaux.....	25
II.5 Le frottement.....	25
II.5.1 Définitions et notations.....	25
II.5.2 Lois empiriques du frottement.....	26
II.5.3 Types de frottement.....	28
II.5.3.1 Frottement sec.....	28
II.5.3.2 Frottement hydrodynamique.....	28
II.5.3.3 Frottement onctueux.....	28
II.6 L'usure.....	29
II.6.1 Introduction.....	29
II.6.2 Définitions.....	29
II.6.3 Mécanismes d'usure.....	29
II.6.3.1 L'usure par transfert ou adhésion.....	29
II.6.3.2 L'usure par abrasion.....	30
II.6.3.3 Usure érosive.....	31
II.6.3.4 L'usure par fatigue.....	32
II.6.3.5 L'usure par réactions tribochimiques.....	33
II.6.4 Evaluation de l'usure.....	33
II.7 Relation entre frottement et usure.....	34

Chapitre III : Méthodes expérimentales

III.1 Matériaux utilisés.....	35
III.2 Descriptions des appareils utilisées.....	36
III.2.1 Dispositif d'usure.....	36
III.2.2 Caractéristiques du dispositif.....	37
III.2.3 Conditions de travail.....	37
III.3 Moyens et appareils utilisés.....	38
III.3.1 Projecteur de profil.....	38
III.3.2 Duromètre.....	38
III.4 Observations métallographiques.....	39
III.5 Préparation des échantillons.....	40
III.6 Usure du disque.....	40

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Etude de l'acier à revêtement alumine ou céramique composite.....	41
1.1 Caractérisation par mesure de dureté.....	41
1.2 Tenue à l'usure.....	43
1.2.1 Etude de la perte de masse.....	44
1.2.2 Etude des dimensions des pistes.....	45
1.2.3 Observations métallographiques.....	46
1.2.4 Analyse des débris.....	47
1.2.5 Analyse par DRX.....	50
IV.2 Etude de l'alliage d'aluminium à revêtement d'acier.....	51
2.1 Caractérisation du substrat	51
2.1.1 Mesure de dureté.....	51
2.2 Revêtement	52
2.2.1 Identification du revêtement.....	52
2.2.2 Mesure de dureté.....	53
IV.1.3 Observation métallographique.....	54
2.3 Tenue du matériau à l'usure.....	55

2.3.1 Variation de la de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement.....	55
2.3.2 Variation de la largeur des pistes en fonction de la vitesse de glissement.....	55
2.3.3 Variation de la profondeur en fonction de la vitesse de glissement.....	56
2.3.4 Conclusion	57
2.3.4 Observations métallographiques.....	57
A- Etude des pistes d'usure.....	57
B - Etude des débris d'usure	57
2.3.5 Etude du profil de dureté.....	58
Conclusion générale.....	45
Références bibliographiques.	

Introduction générale

La demande industrielle pour l'amélioration de la résistance aux frottements et à l'usure de pièces, tant mécaniques que de structure, est en constante croissance depuis plus de 20 ans. Elle se justifie notamment par la volonté de réduire les pertes considérables liées aux phénomènes de frottement/usure. Il est généralement admis qu'elles représentent de 6 à 10 % du Produit National Brut des pays industrialisés. Dans les applications mécaniques, par exemple, 30 % des causes d'avarie sont dues à l'usure. Dans ce contexte, la stratégie industrielle est souvent de recourir aux revêtements pour améliorer les performances et allonger la durée de vie d'un système mécanique. Ces revêtements sont techniquement et/ou économiquement avantageux par rapport à un changement du matériau constituant la pièce à améliorer. En outre, il est demandé de plus en plus fréquemment aux pièces de résister à des sollicitations impliquant simultanément plusieurs phénomènes (frottement, abrasion, corrosion, chocs, ...).

Dans l'industrie automobile par exemple, l'emploi d'un alliage de cuivre, un bronze d'aluminium, qui présente une bonne résistance à l'usure, peut être envisagé en tant que matériau de base, pour la réalisation d'un coussinet d'un organe de glissement. Dans ce cas, l'incorporation d'une phase céramique au sein de la matrice métallique permettrait d'augmenter les propriétés tribologiques de ces alliages.

La progression des connaissances sur les matériaux ainsi que sur les procédés de fabrication des revêtements est actuellement très rapide. Parmi les procédés connus, la projection thermique est sans conteste l'une des techniques les plus appréciées.

La projection Plasma fait partie de la projection thermique qui regroupe un ensemble de procédés dans lesquels des matériaux sous forme pulvérulente (particules de taille inférieure à 100 μm , environ) sont déposés dans un état fondu ou semi-fondu sur des substrats préalablement préparés.

Cette technique est industriellement répandue dans de nombreux secteurs pour des applications tribologiques, tels que l'automobile (paliers, cylindres,...), l'aéronautique (pieds des aubes, ...), les biomatériaux (prothèses, ...). En effet, la projection plasma est un procédé souple, aussi bien pour le choix des matériaux que pour celui des conditions expérimentales, autorisant par conséquent une large palette d'applications.

Notre travail consiste à étudier la tenue à l'usure d'un acier ordinaire à dépôt d'alumine par plasma en régime sec. Un essai de frottement de type « pion-disque » est

mis en œuvre afin d'étudier le comportement tribologique des revêtements d'alumine projetés par plasma. Ce travail a été réalisé au laboratoire des Matériaux Non Métalliques au Département d'Optique et Mécanique de Précision (Université Ferhat Abbas de Sétif). L'échantillon a été préparé au niveau du laboratoire des sciences des procédés céramiques et de traitements de surfaces, université de Limoges (France).

Ce mémoire est organisé selon quatre chapitres

Dans le premier chapitre, on donne une étude bibliographique sur les techniques et procédés des revêtements ainsi que les différentes techniques de projection plasma.

Le deuxième chapitre présente des généralités sur la tribologie selon deux points de vu: des notions générales sur le frottement et l'usure, suivies d'une description de mécanisme d'usure et de frottement.

Le troisième chapitre est consacré à la description des méthodes expérimentales, ainsi que les moyens techniques utilisés dans notre travail.

Le quatrième chapitre se propose d'établir les résultats obtenus et leur discussion. Une conclusion générale clôt ce mémoire en faisant ressortir les principaux résultats de l'étude.

Chapitre I : Techniques et procédés de **revêtement**

I. Introduction

Différentes technologies de dépôts permettent d'apporter un matériau à la surface d'une pièce pour en changer les propriétés de surface. Hormis l'application d'une couche de produits organiques (peinture), peuvent être cités parmi les techniques les plus utilisées : l'électro dépôt, les dépôts chimiques, l'immersion dans un bain de métal en fusion, les dépôts physiques ou chimiques en phase vapeur (notés respectivement PVD et CVD) et la projection thermique. Les applications de ces dépôts concernent essentiellement la protection contre l'usure et la corrosion, la décoration ou la réalisation de dépôts à propriétés physiques spécifiques (électrique, magnétique, thermique, etc.) [NOUR04].

Au cours du XXème siècle, les applications plus pointues se sont diversifiées dans des domaines suivants :

- Chimie : les principales applications des revêtements de surface sont orientées vers une meilleure tenue à la corrosion par la création d'un film étanche,
- Mécanique : les revêtements par des matériaux plus durs sur les outils de coupe ont permis d'augmenter les vitesses de coupe,
- Electronique : la microélectronique a pu se développer à partir des années 1960 grâce à la mise en œuvre de couches de plus en plus minces conductrices ou isolantes,
- Thermique : l'utilisation d'une couche barrière thermique (TBC) diminue par exemple la température de surface du métal des ailettes des réacteurs permettant ainsi d'améliorer les performances des réacteurs (augmentation de la température interne)
- Optique : tout en conservant les applications esthétiques, les applications optiques des couches ont permis de développer des capteurs de rayonnements plus efficaces [HIDA03].

La Figure I.1 montre les différentes épaisseurs obtenues ainsi que les températures de substrat atteintes en cours de procédé en fonction de la technique utilisée.

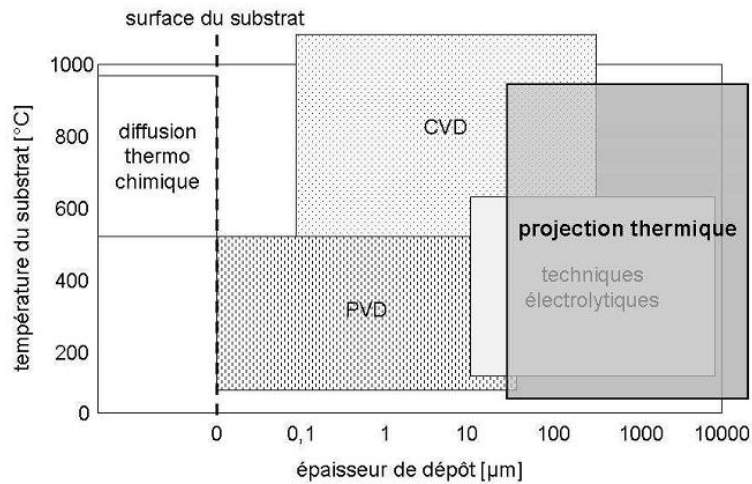


Figure I.1 : Epaisseurs de dépôts et température de substrat en fonction de la technique utilisée (d'après [NOUR04])

I.1 Techniques de déposition

I.1.1 Les méthodes chimiques

I.1.1.1 Dépôt chimique en phase vapeur CVD

La technique CVD consiste à élaborer un matériau sous forme de couche mince, en transportant en phase vapeur des molécules et en les faisant réagir sur (ou au voisinage) d'une surface. Cette réaction chimique fournit comme produit solide le matériau désiré. Les autres produits de réaction doivent être gazeux afin d'être éliminés hors du réacteur. Les molécules contenant les éléments du matériau à déposer sont appelées précurseurs et la pièce sur la surface de laquelle la réaction chimique doit avoir lieu est appelée substrat.

Le précurseur est transporté jusqu'au substrat sous forme de vapeur, généralement par un gaz inerte dit gaz vecteur. La décomposition au-dessus du substrat est généralement obtenue par activation thermique. La température du substrat fournit l'énergie d'activation nécessaire pour déclencher la réaction chimique et favoriser, lorsqu'elle est suffisamment élevée, la diffusion dans ce substrat des atomes apportés à la surface. Cette diffusion à l'état solide entraîne une modification des produits de réaction et assure généralement une bonne adhérence du revêtement. Cette technique permet d'obtenir des couches d'épaisseur variable de pratiquement tous les métaux, alliages ou composés métalliques sur des matériaux conducteurs ou isolants [ŞOVA06].

Un modèle cinétique global caractérisé par les étapes élémentaires indiquées sur la (Figure I.2) permet de décrire un procédé CVD :

1. transport du précurseur au-dessus du substrat ;
2. diffusion du précurseur à travers la couche limite, vers la surface du substrat ;

3. adsorption du précurseur sur la surface du substrat ;
4. diffusion des espèces sur la surface du substrat ;
5. réaction de surface : formation du matériau et des espèces gazeuses ;
6. désorption des espèces produites ;
7. diffusion des résidus gazeux à travers la couche limite ;

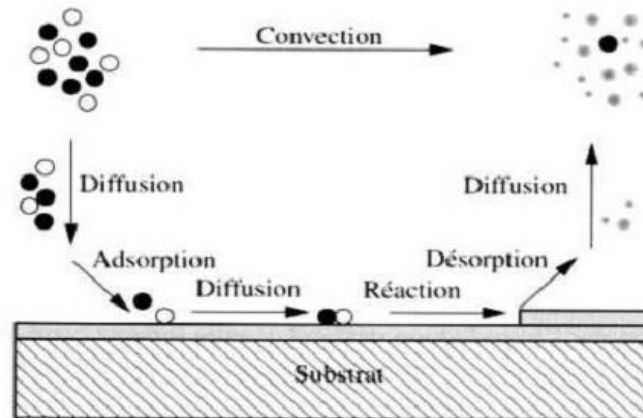


Figure I.2 : Illustration des diverses étapes du procédé CVD [FRED93].

I.1.1.2 Dépôt chimique en phase liquide (CSD)

Le dépôt chimique en phase liquide consiste d'abord à former une solution (sol) de tous les éléments du composé désiré dans un solvant organique. Le sol est alors déposé sous la forme d'un film sur un substrat par centrifugation, trempage ou pulvérisation. En général, le film liquide gélifié avant que tout le solvant ne soit évaporé et se transforme en film gélifié, solide viscoélastique. Le film est ensuite pyrolysé et recuit afin d'obtenir la microstructure et la cristallinité voulues [REMO06].

I.1.2 Les méthodes physiques

I.1.2.1. Dépôt physique en phase vapeur (PVD)

Le développement de la technologie de vide a progressé considérablement pendant les trois dernières décennies et cela a permis le développement des techniques de dépôt sous vide telles que les techniques de base de la PVD sont : l'évaporation et la pulvérisation sous toutes ces formes. Ces techniques des dépôts permettant l'obtention d'une large variété de matériaux à température de dépôt relativement basse ($<500^{\circ}\text{C}$), par exemple :

- Films métalliques (Al, Cu, Ti...etc.) et leurs alliages.
- Films des métaux réfractaires (Mo, Ta, W...etc.).
- Films d'oxydes (ZrO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 ,...etc.).

- Films de nitrures, de siliciures, de carbures, de borures, et de fluorures.

Ces techniques ont été largement utilisées pour l'obtention des revêtements réfractaires résistant à l'érosion et à l'usure, [TAYL77, ESER78], comme par exemple Al_2O_3 , Acier inoxydable.

Le dépôt physique en phase vapeur (PVD) présente beaucoup de d'avantages par rapport au dépôt chimique en phase vapeur, par exemple les films sont denses, le processus est facile à contrôler et il n'y a pas de pollution [JIAN92].

I.1.2.2 Pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique (« sputtering » en anglais) est l'une des techniques les plus anciennes. Des ions lourds d'un gaz rare, généralement Ar^+ , sont accélérés sous une forte tension jusqu'à la cathode constituée du matériau cible à déposer. Les atomes de surface vont alors être arrachés et projetés vers le substrat refroidi afin de s'y déposer. Il est aisé de produire des dépôts métalliques par cette technique. Cependant, dans le cas de matériaux diélectriques, donc non conducteurs comme la plupart des oxydes, il y a une difficulté car les ions ne peuvent pas se décharger sur la cathode. Dans ce cas, une parade a été trouvée en interposant une grille soumise à un potentiel modulé à haute fréquence, ce qui augmente sensiblement la complexité et le coût du dispositif. Cette technique, appelée « RF-sputtering » est toujours d'actualité [SÁNC05].

Alors que la pulvérisation cathodique n'a été que rarement utilisée pour élaborer les films minces de matériaux ferroélectriques, elle constitue à l'heure actuelle la technique essentielle de fabrication d'électrodes pour condensateurs ferroélectriques en couches minces (ex : Pt, Au, RuO_2 , SrRuO_3) [VOSS78].

I.1.2.3 Ablation par laser

L'ablation par laser (PLD, pour « Pulsed Laser Deposition ») exploite les possibilités d'interactions entre la matière et les photons cohérents d'un laser. Le faisceau laser à impulsion entre par la fenêtre de quartz transparente d'une enceinte à vide et irradie la cible du matériau à déposer sous une incidence proche de 45° . A l'impact, l'énergie des photons est transférée au matériau où s'opèrent alors localement de multiples changements d'état et phénomènes tels que fusion, évaporation ou création d'un plasma. Le matériau est alors vaporisé brutalement et éjecté sous une forme ionisée ou non, perpendiculairement à la surface de la cible vers le substrat positionné en face de la cible [AUCI97].

La nature du laser (longueur d'onde, densité d'énergie transmise à la cible) ainsi que la distance entre la cible et le substrat, la pression dans l'enceinte ou la température du substrat

au moment du dépôt vont influencer les caractéristiques du film. Ces différents paramètres sont découplés les uns des autres et confèrent ainsi une grande souplesse à cette méthode de dépôt. Cette technique a connu un essor particulier lors de la découverte des matériaux supraconducteurs à haute température critique et de leur dépôt in situ. Depuis, elle constitue une des techniques les plus utilisées pour l'élaboration de couches minces diverses de la famille des titanozirconates de plomb PZT, titanate de plomb ou niobate de lithium. Elle est désormais également utilisée pour le dépôt d'électrodes oxydes comme SrRuO_3 , $\text{nLa}(\text{Sr},\text{Co})\text{O}_3$ et RuO_2 [DIJK87].

I.2 Projection thermique

La projection thermique consiste à utiliser une source de chaleur pour fondre et accélérer un matériau. Celui-ci prend alors la forme de particules pâteuses ou liquides qui heurtent, s'étalent et se solidifient sur un substrat, formant un dépôt par empilements successifs [AUDI 98, PAWL 95, PRON99]

La morphologie et les propriétés des dépôts dépendent de nombreux paramètres expérimentaux (Figure I.3), relatifs principalement à :

- la nature du matériau à projeter,
- la source de chaleur,
- l'atmosphère environnante,
- le substrat.

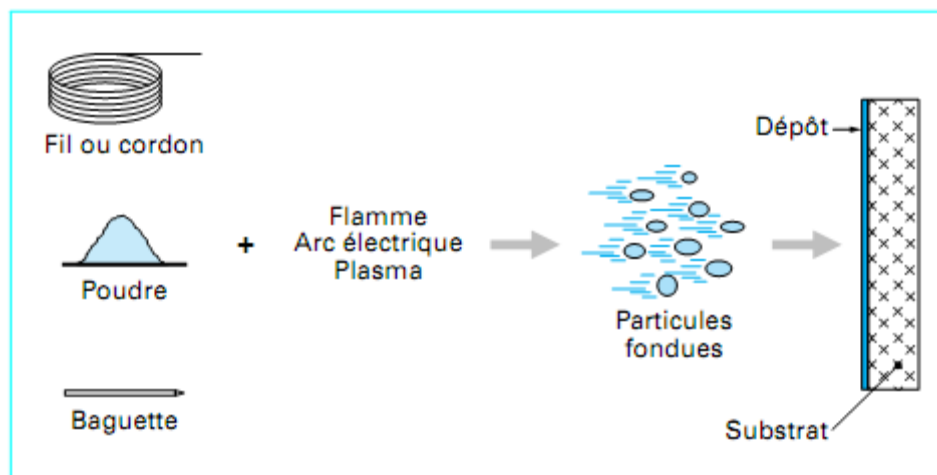


Figure I. 3 : Principe de la projection thermique d'après [PRON99]

Les propriétés du dépôt, notamment les propriétés tribologiques, dépendent de sa microstructure, elle-même fortement dépendante des nombreuses conditions de projection. Ces paramètres expérimentaux sont relatifs principalement à la nature du matériau d'apport et

à son injection, à la source de chaleur, à l'atmosphère environnante et au substrat (Figure I. 4). En faisant varier certaines de ces conditions expérimentales, divers types de microstructures, présentant des comportements tribologiques différents, peuvent être réalisés.

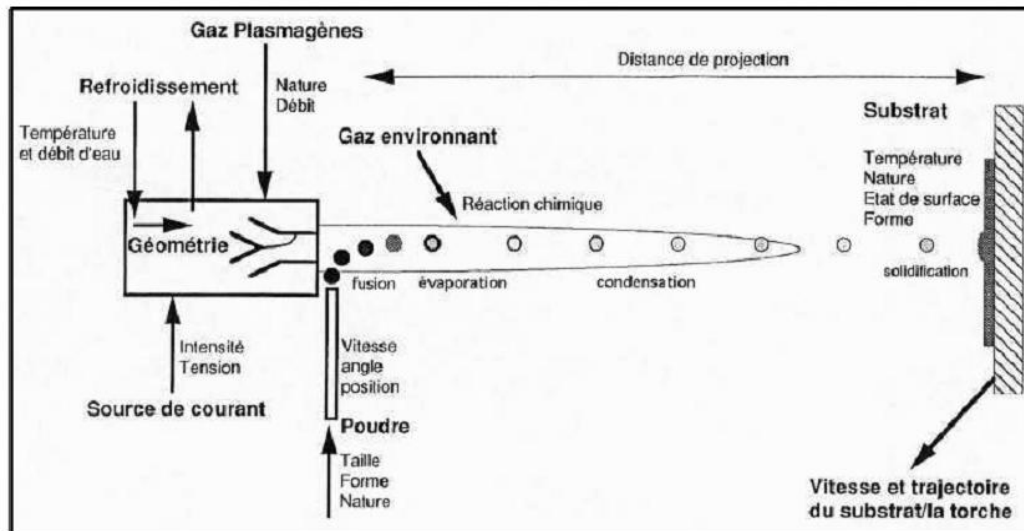


Figure I. 4 : Représentation schématique des paramètres expérimentaux de la projection thermique : exemple de la projection plasma [BEAU03].

Il existe de nombreux procédés de projection thermique. Tous les procédés utilisent le même principe : fondre un matériau d'apport, puis le projeter grâce à un gaz vecteur. Deux types d'énergie sont utilisés comme source de chaleur : la flamme et l'arc électrique. Les cinq principaux procédés sont la projection à la flamme, à l'arc, plasma, HVOF et à froid.

I.2.1 Projection à la flamme

L'utilisation de l'énergie d'une réaction chimique de combustion est un principe de base pour trois grandes techniques de projection à la flamme.

La projection à la flamme est une technique largement employée dans le monde compte tenu de sa simplicité et de son faible coût d'équipement. Les pistolets à flamme sont principalement utilisés pour projeter les matériaux sous forme de poudre, de fils ou de baguettes. Le principe est fondé sur l'introduction du matériau à déposer dans la flamme (figure I.5). Les principaux mélanges de gaz enthalpiques sont: acétylène/oxygène, hydrogène/oxygène ou propane/oxygène. Ils permettent d'atteindre des températures de flamme de 3200°C, 2700°C et 2400°C respectivement à la stœchiométrie. Le projectile subit des échanges thermique et cinétique dans la flamme et est donc fondu et accéléré avant d'être déposé en fines gouttelettes («splats» en appellation anglaise) sur la surface à revêtir [SMIT74].

Les premiers matériaux utilisés étaient le plomb et le zinc pour des applications de protection anti-corrosion. Depuis, la gamme des matériaux ainsi que les applications ont été élargies. Des métaux purs comme Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo, des aciers y compris des aciers inoxydables, des alliages à base de Zn, Cu, Ni ou Sn, mais aussi des polymères peuvent être utilisés comme matériaux d'apport sous forme de poudre ou en fils. Des céramiques Al_2O_3 , $Al_2O_3-TiO_2$, Cr_2O_3 , ZrO_2-CaO sous forme de cordons ou de baguettes peuvent être aussi déposées en utilisant cette technique [KREY89, KADY96]

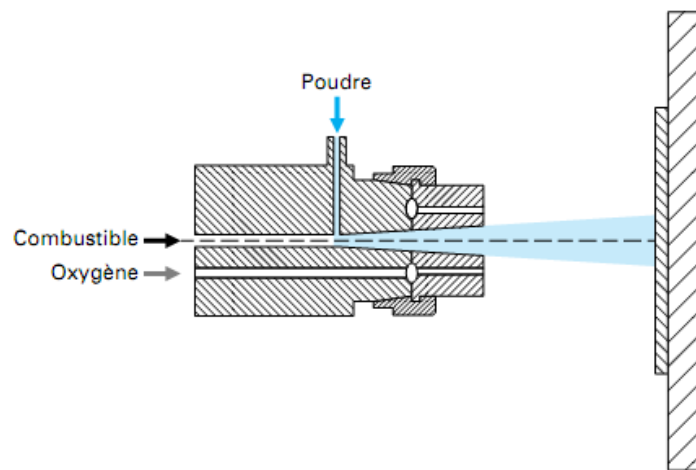


Figure I.5 : Schéma de principe de la projection à la flamme [PRON99].

La technique propose de multiples solutions pour des problèmes d'usure, de corrosion, de protection thermique, etc., via la projection mais aussi le traitement par refusions des revêtements obtenus pour améliorer leurs propriétés. Cependant elle reste limitée à des matériaux dont la température de fusion est inférieure à celle de la flamme. La vitesse des particules varie entre 30 et 150 m/s, ce qui produit des taux des porosités relativement élevés (entre 5 et 10%) et une adhérence limitée. Le taux de dépôt varie de quelques kilogrammes par heure pour la projection de poudre jusqu'à quelques dizaines de kilogrammes par heure pour la projection de fil [SOKO09].

I.2.2 Projection à la flamme supersonique (HVOF)

Le principe de la technique HVOF est le même que celui de la projection à la flamme. Ses particularités sont: en premier un processus de déflagration qui se produit dans un volume confiné et en second une expulsions des gaz à travers un divergent de type Laval (Figure I.6). Carburant et comburant sont injectés dans la chambre de combustion sous pression avec des débits variant entre 100 et 500 NL/min. La réaction de réduction provoque une forte expansion du mélange gazeux qui se propage à vitesse sonique dans la tuyère et passe au-delà

dans le divergent et le jet externe. Les mélanges carburant/comburant sont de type gazeux (oxygène – hydrogène/propane/propylène/gaz naturel) ou liquide (air comprimé – kérosène ou white spirit) pour le procédé appelé HVOF (High Velocity Air Fuel).

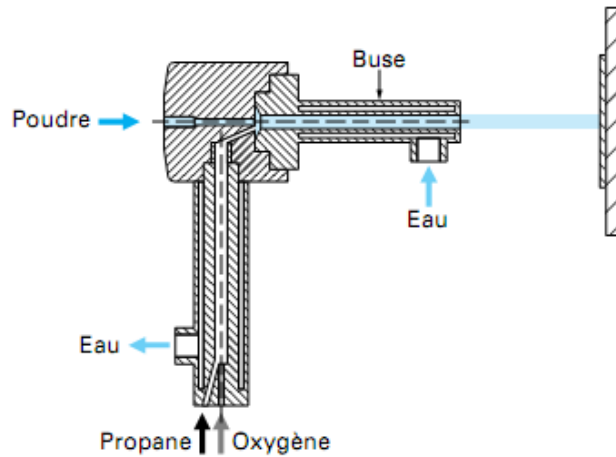


Figure I.6 : Schéma de principe de la projection HVOF [PRON99].

L'espace réduit de la chambre de combustion favorise le transfert thermique entre les particules et la flamme. L'écoulement supersonique transmet une densité de quantité de mouvement importante, ce qui permet d'avoir un dépôt de très bonne qualité avec une dureté élevée. Le taux de porosité est généralement inférieur à 2% avec une bonne adhérence (70-90 MPa) et une faible rugosité de surface. Ce procédé permet de déposer des métaux (Ni, Co, Mo, Cr), des alliages (Inconel, MCrAlY, NiCr), des alliages auto-fusibles, mais aussi des carbures (WC-Co, TiC-Ni). Les applications sont les protections anti-corrosion et anti-usure, les barrières thermiques, mais également la réparation, avec des dépôts de fortes épaisseurs en plusieurs passes. Le coût de l'utilisation est fortement lié à la nature et à la consommation des gaz qui peut atteindre 1000 NL/min. Le taux de dépôt est de l'ordre d'une dizaine de kilogrammes par heure [KREY89].

I.2.3 Projection à détonation

Le procédé est connu sous le nom de D-Gun (détonation gun). Le dispositif principal est un canon à détonation, où la réaction d'oxydation se produit avec une vitesse supérieure à la vitesse du son (Figure I.7). Le canon est constitué d'un tube de diamètre 21 à 25 mm et d'une longueur d'environ 1 m fermé d'un côté. Il est équipé d'un système de soupapes pour injecter les gaz et la poudre ainsi que d'un dispositif d'allumage entièrement automatisé. La poudre est injectée en même temps que le mélange des gaz (généralement acétylène/oxygène).

L'onde de choc de l'explosion amorcée par une étincelle propulse la poudre tout au long du canon avec une vitesse proche de 1000 m/s.

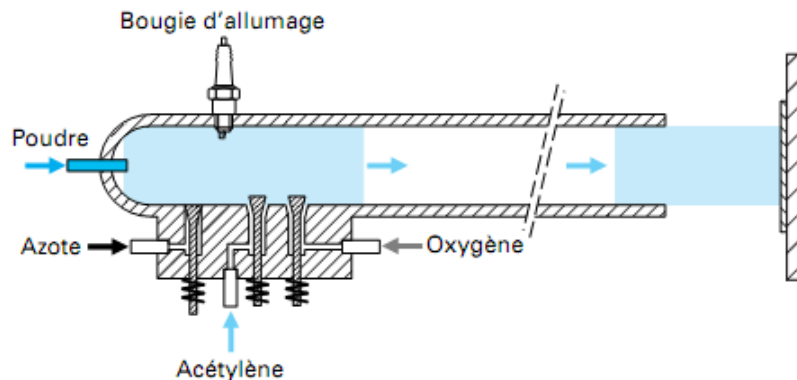


Figure I.7 : Schéma de principe du canon à détonation [PRON99].

Les allumages sont reproduits avec une fréquence de 4 à 10 tirs par seconde et successivement suivis d'un balayage du canon avec un gaz neutre. Le revêtement obtenu possède un faible taux de porosité (moins de 1%) et une très bonne adhérence (80 MPa) mais il est limité à une épaisseur qui ne dépasse pas 300 μm [KADY96]. Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de W et de Cr avec des liens de Ni ou Co, mais aussi des oxydes de chrome ou de l'aluminium. Les applications en protection anti-usure sont dans les domaines de l'aéronautique et de la sidérurgie [SOKO09].

I.2.4 Projection par arc électrique

La projection à l'arc est le premier procédé ayant utilisé l'énergie d'une décharge électrique. Il consiste en un arc électrique créé entre deux fils consommables et un jet de gaz comprimé qui sert à pulvériser et à projeter le métal fondu en fines gouttelettes sur le substrat. L'équipement consiste en un pistolet de projection, un système d'avancement des fils, un générateur de courant asservi par une régulation automatique et une source de gaz comprimé (généralement de l'air mais l'utilisation d'un gaz neutre est possible). Les fils sont amenés dans la zone de fusion du pistolet à travers des électrodes guides qui assurent leur bon positionnement et le transfert du courant (Figure I.8).

L'arc électrique est généré entre les deux fils en contact et permet de les fondre. La température dans la zone de fusion peut être de l'ordre de 6000 K. Le métal fondu est pulvérisé grâce au jet de gaz comprimé et projeté sur le substrat. Les épaisseurs des dépôts varient de 0.2 à 3 mm avec un taux de porosité de 5 à 10% et une adhérence de 20 à 40 MPa. La technique est simple et peu coûteuse et permet de déposer la matière avec un débit

important (de 5 à 30 kg/h). L'utilisation d'un gaz neutre diminue sensiblement la présence d'oxydes dans le dépôt. Des modifications du pistolet et l'emploi d'un second jet de gaz ont permis de concentrer le flux de matière atomisée et de diminuer la porosité des couches [SAMP98].

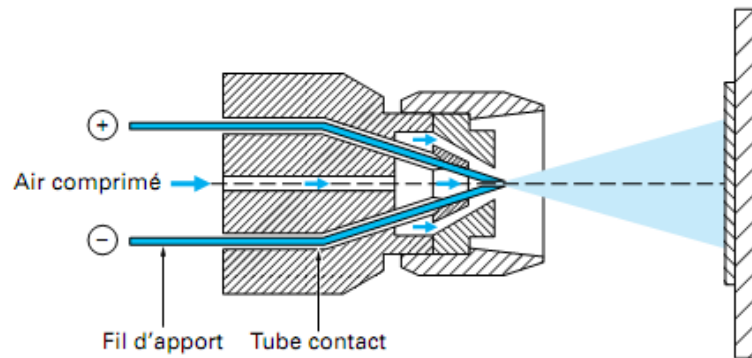


Figure I.8 : Schéma de principe de la projection à l'arc [PRON99].

Les matériaux projetés sont des métaux conducteurs électriques (aluminium, cuivre, zinc, molybdène), des aciers mais aussi des alliages NiCrAl, NiMoAl. L'une des limites importantes du procédé est la nature des matériaux (tréfilabilité et conductibilité). La gamme des matériaux projetés peut être élargie en utilisant la technologie des fils fourrés qui permet de déposer des carbures (CrC, WC, TiC) et des oxydes ainsi que d'élaborer des couches composites [SAMP98].

I.2.5 Projection supersonique à froid (« Cold Spray »)

Qui n'est pas réellement un procédé de projection thermique puisqu'il s'effectue « à froid » mais lui est tout de même assimilée. Cette technique très récente est encore en développement et consiste à utiliser un jet de gaz chaud à haute pression (20 à 35 bars) pour projeter une poudre, généralement métallique préchauffée. Les particules adhèrent au substrat et les unes aux autres par déformation plastique, ce qui permet de limiter l'échauffement et les contraintes résiduelles [ALKH00]. Cependant, seuls les procédés permettant d'atteindre des températures et des vitesses élevées de particules peuvent faire fondre les matériaux à température de fusion très élevée (ex : la température de fusion de l'alumine est 2050°C). Aussi, pour la projection des céramiques, seuls les procédés listés ci-dessous sont utilisés [BEAU03].

I.2.6 Projection plasma

La source de chaleur utilisée est un plasma thermique créée par l'ionisation partielle d'un mélange de gaz plasmagènes. Le mélange de gaz généralement utilisé pour former l'atmosphère plasmagène est constitué d'argon ou d'azote avec de l'hydrogène ou de l'hélium. Le jet plasma constitué de gaz dissociés et partiellement ionisés, émerge de la tuyère à grande vitesse (1000m/s) et à haute température (15000°C) [FAUC04] tous les matériaux y compris les plus réfractaires, peuvent ainsi être fondus.

Le principal avantage de la projection plasma est la possibilité de pouvoir projeter des matériaux très réfractaires et d'obtenir des dépôts très durs comme la céramique, destinés à la protection contre l'usure ou la corrosion.

I.3. projection plasma

I.3.1 Principe de la projection plasma

Le principe de la projection par plasma d'arc soufflé consiste en l'utilisation d'une torche plasma comme source de chaleur pour fondre et accélérer une poudre du matériau qui doit revêtir le substrat préalablement préparé. Cette poudre est véhiculée jusqu'au plasma à l'aide d'un gaz porteur. Un arc électrique de forte intensité (plusieurs centaines d'ampères), généré entre les deux électrodes de la torche refroidies par une circulation d'eau, permet d'ioniser partiellement un mélange gazeux à base d'argon, d'hydrogène, d'hélium et/ou d'azote [HER88]. Le milieu ainsi créé est électriquement neutre et constitué d'un mélange de molécules, ions, atomes et électrons appelé plasma thermique (Figure I. 9).

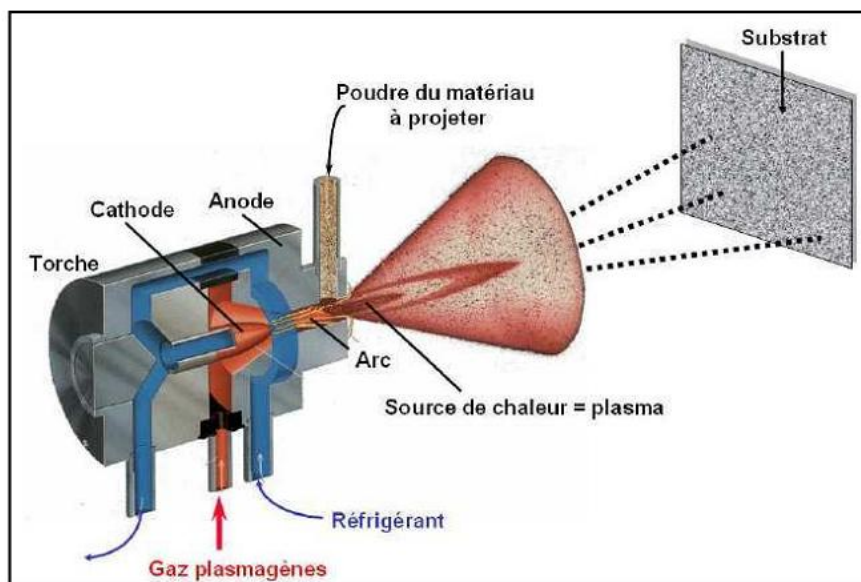


Figure I. 9 : Représentation schématique de la projection plasma [HERM88]

Parmi toutes les sources de chaleur utilisées dans les divers types de projection thermique, ce plasma, dit "thermique", permet de fondre la plus grande variété de matériaux (polymères, métaux, céramiques) [FAUC04].

I.3.2 Modes de projection plasma

L'utilisation d'une enceinte fermée équipée de systèmes de régulation permet d'effectuer la projection dans une atmosphère dont la nature et la pression sont connues. Différents modes de projection ont ainsi été développés :

- La projection sous air à la pression atmosphérique ou mode APS (« Atmospheric Plasma Spraying »), procédé le plus simple et le plus couramment utilisé en industrie pour les matériaux peu sensibles à l'oxydation ;
- la projection sous gaz neutre (argon) à la pression atmosphérique ou mode IPS (« Inert Plasma Spraying ») ;
- la projection sous faible pression de gaz neutre ou mode LPPS (« Low Pressure Plasma Spraying »), aussi appelée mode VPS (« Vacuum Plasma Spraying »)
- la projection sous gaz réactif ou mode RPS (« Reactive Plasma Spraying ») ;
- la projection à une pression supérieure à la pression atmosphérique ou mode HPPS (« High Pressure Plasma Spraying ») [DELQ07].

I.3.3 Fonctionnement de la torche à plasma d'arc

Les torches conventionnelles employées en projection plasma sont constituées d'une cathode en forme de tige et d'une anode concentrique qui constitue la tuyère. Le gaz plasmagène circule dans l'espace entre ces deux éléments. Deux familles de torche sont à distinguer (Figure I.10) :

- Torche à arc transféré : l'arc jaillit entre une électrode interne et un corps conducteur, généralement le substrat ;
- Torche à arc soufflé : l'arc jaillit entre deux électrodes, une cathode et une anode-tuyère, c'est celle que nous décrivons par la suite.

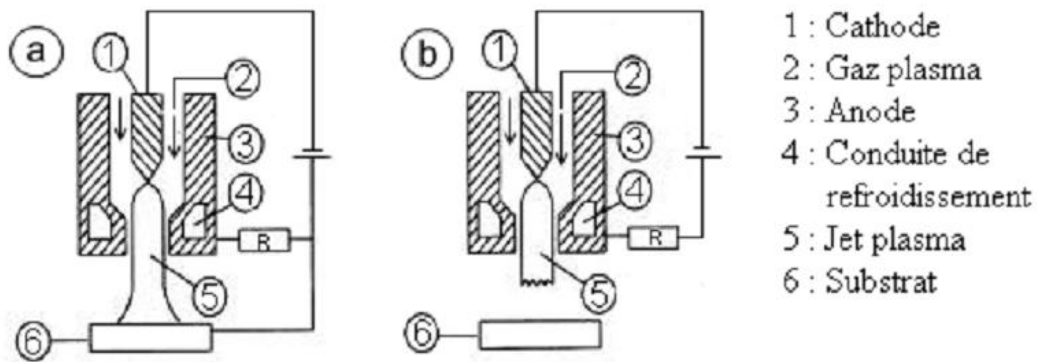


Figure I.10 : Torche plasma (a) à arc transféré (b) à arc soufflé [VENK02]

I.3.4 Interaction plasma-particules

Le transfert thermique et le transfert de quantité de mouvement entre le plasma et les particules injectées dépendent de leur temps de séjour dans le plasma (lié à leur vitesse) et de la nature des gaz plasmagènes employés. La qualité d'un dépôt projeté plasma est régie essentiellement par l'état de fusion et la vitesse des particules au moment de leur impact sur le substrat. Les transferts de chaleur et de quantité de mouvement du plasma vers les particules doivent donc être suffisants pour assurer leur fusion et leur accélération.

Le transfert d'énergie cinétique (ou transfert de quantité de mouvement) conditionne la trajectoire des particules et assure leur accélération vers le substrat. Il est nécessaire que les particules injectées aient une quantité de mouvement de l'ordre de celle du plasma afin de pouvoir pénétrer au cœur du plasma [FAUC04]. Le transfert d'énergie thermique permet le chauffage de la poudre injectée au sein du plasma. L'état de fusion des particules est fonction du temps de séjour des particules dans le plasma, des températures rencontrées ainsi que de la conductivité thermique moyenne du plasma. Ces valeurs dépendent elles-mêmes de la nature des gaz plasmagènes et de l'enthalpie fournie au plasma [SYED04].

I.3.5 Construction d'un dépôt projeté plasma

Un dépôt plasma est constitué par l'empilement de lamelles issues de l'étalement et de la solidification rapide des particules de poudre fondues et accélérées par le plasma. L'étalement des particules sur le substrat et sur les lamelles précédentes est l'une des étapes les plus importantes de la projection plasma. La morphologie de la lamelle (couramment appelée « splat » en anglais) est déterminante pour la qualité (adhérence et autres propriétés) du dépôt. La manière dont les gouttelettes s'évalent et se solidifient influe notamment sur la porosité du dépôt et sur la rugosité finale du dépôt. Les lamelles ont des épaisseurs comprises entre 1 et quelques microns et des diamètres variant entre 50 et 100 μm . La structure des

dépôts dépend donc des paramètres des particules à l'impact (vitesse, température, taille) mais également des paramètres liés au substrat (nature, rugosité, température de préchauffage, chimie de surface). Cet empilement confère aux dépôts une structure lamellaire particulière anisotrope et hétérogène de lamelles individuelles.

Ce mode de construction génère des défauts : pores, fissurations interlamellaires (macrofissuration), fissures intralamellaires (microfissuration), zones de contact plus ou moins parfaites aux interfaces lamelle-lamelle et lamelle-substrat, rugosité de surface, dont la présence peut être préjudiciables aux propriétés d'usage. Lors de la projection en atmosphère réactive, des phases (oxydes, nitrures,...), créées in situ au cours de la projection, peuvent également être présentes au sein du dépôt. Cette microstructure lamellaire est représentée schématiquement en (Figure I.11)

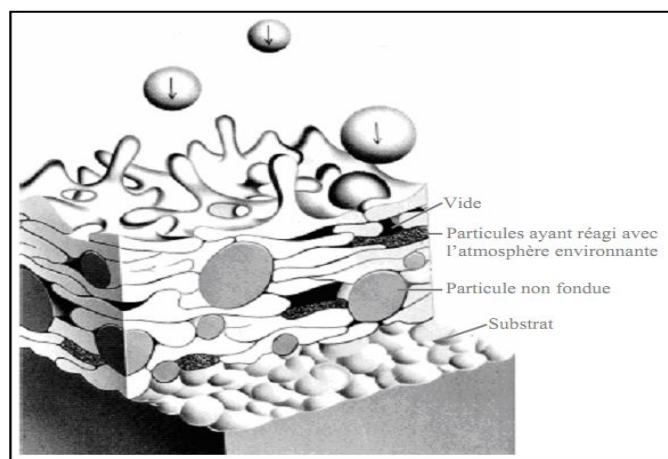


Figure I. 11 : Représentation schématique de l'empilement des lamelles lors de la projection plasma d'après [HERM88]

I.3.6 Analyse comparative des procédés de projection thermique

Le tableau I.1 présente pour chacun des procédés : puissance moyenne de la source, débit de poudre projetée, adhérence du revêtement au substrat exprimée selon une échelle arbitraire, cohésion comparative du revêtement suivant une échelle arbitraire, taux comparatif d'oxydes au sein des revêtements métalliques, rendement de projection et coût selon une échelle arbitraire.

Tableau I.1 Caractéristiques des revêtements obtenues par différents procédés [AUDI99]

Paramètres / procédés	Puissance (kW)	Débit kg/h	Adhérence arbitraire 1 à 10	Cohésion arbitraire 1 à 6	Taux d'oxydes %	Rendement %	Coût arbitrai re 1à10
Flamme (poudre)	10-15	3-7	3	2	6-12	50	3
Flamme (fil)	10-20	5-15	4	3	4-8	70	3
HVOF	100-150	3-6	8	5	0.5-2	70	5
D-Gun	100-150	1-2	8	5	0.1-0.5	90	10
Arc électrique	5-10	5-30	6	4	1-5	80	1
APS	10-80	3-5	6	4	1-5	60	5
VPS-LPPS	30-100	3-8	9	6	0.1	75	10
IPS	30-80	3-5	8	5	<0.1	60	8

Le procédé LPPS permet d'obtenir une très bonne adhérence de revêtement, de faibles taux d'oxydes, ainsi qu'un bon rendement. Cependant, son coût de mise œuvre est très élevé.

I.4 Usure des revêtements

Un test tribologique est réalisé sur un tribomètre type "pion sur plan", sur un échantillon multicouche TiN/CrN.

D'un point de vue purement qualitatif, l'usure des différents dépôts peut être décrite par deux phases. Dans les premières minutes de l'essai, indépendamment du dépôt, l'usure consiste, comme le montre la figure V.1, en un "polissage" de la surface du revêtement (usure douce).

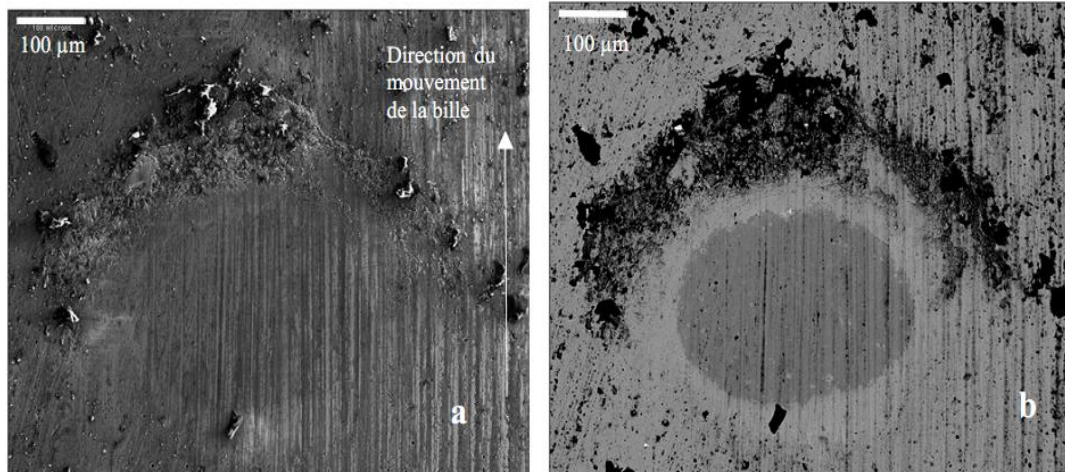


Figure I.12 : Images MEB d'une trace d'usure d'un échantillon multicouche TiN/CrN après 10 minutes de frottement. Image en mode électrons secondaires (SEI) (a) et électrons rétrodiffusés (BSE) (b) [MEND03]

Les débris d'usure s'accumulent à l'avant du contact entre le plan et la bille. Ces derniers apparaissent en noir sur la micrographie réalisée en électrons rétrodiffusés (figure. I.12b) et sont donc composés d'éléments ayant une masse atomique moyenne plus faible que le dépôt, probablement des oxydes. Lorsque le frottement se poursuit et après un temps variable, certains dépôts s'écaillent. La sensibilité à l'écaillage des différents dépôts s'avère un critère important [MEND03].

I.5 Contraintes dans les revêtements

Généralement les couches minces sont déposées sous contraintes, ces contraintes peuvent provoquer des fissures et des fragmentations aux surfaces et ainsi la décohésion de la couche avec le substrat, donc pour régler ce problème il faut bien contrôler le processus de projection des couches minces et minimiser les contraintes après la déposition [CAMM05].

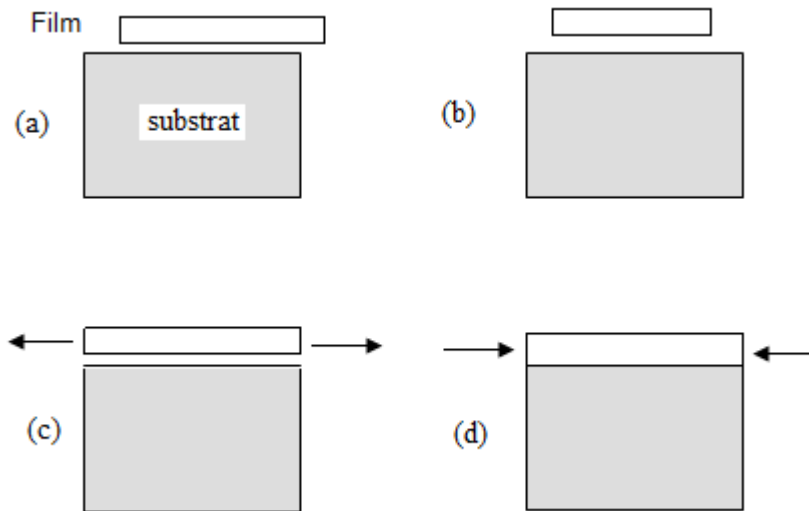


Figure I.13: origine mécanique des contraintes dans les couches minces [CAMM05]

- (a) le film est en état de contrainte libre
- (b) changement de film résulte de changement de la surface de contact avec le substrat
- (c) traction au bord de couche impose une contrainte biaxiale, cela allonge le film et devient plus grand que la surface plane de contact du substrat
- (d) compression au bord de la couche mince cela diminue le film par rapport au surface plane de contact du substrat

I.6 Contraintes résiduelles dans les couches minces

On définit les contraintes résiduelles comme étant les contraintes demeurant dans une structure mécanique alors qu'aucune sollicitation extérieure n'est appliquée. Ces contraintes jouent un rôle important sur les propriétés mécaniques des matériaux déposés. Leur prise en compte permet d'optimiser les procédés d'élaboration des matériaux. En effet, ces contraintes influencent notamment l'adhérence et l'épaisseur critique des revêtements.

Par ailleurs, l'adhérence d'un matériau a différentes origines, en particulier la formation de liaisons covalentes ou l'existence de forces d'attraction entre les atomes des surfaces en contact [GRIL99].

Dans le cas des films minces, on considère deux types de contraintes résiduelles :

- les contraintes d'origine thermique
- et les contraintes intrinsèques.

Le premier type de contraintes, que nous appellerons simplement « contraintes thermiques », est clairement identifié. On trouve son origine dans la différence de coefficient de dilatation

thermique entre les matériaux solidaires. Les contraintes thermiques s'expriment par une déformation des différents éléments lors du refroidissement de la structure [SHEN95].

Les contraintes thermiques naissent inévitablement et obligent l'ensemble à se courber pour minimiser les énergies internes. Le film peut alors se trouver dans un état de tension ou dans un état de compression (figure I.14), selon le signe de la différence de coefficient de dilatation thermique [JOHA89].

Les contraintes intrinsèques sont dues au procédé d'élaboration des couches et apparaissent durant la croissance. On peut parfois trouver leurs origines et tenter de les réduire. Dans certains cas, un recuit ou des cyclages thermiques permettent de les relaxer [SHEN95].

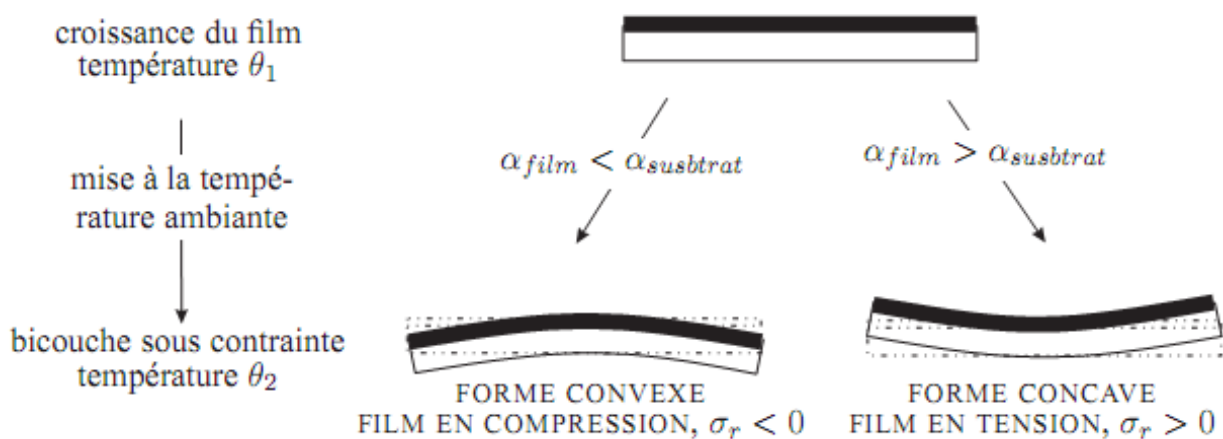


Figure I.14: Naissance des contraintes thermiques durant l'élaboration d'une couche mince [JOHA89]

Chapitre II :
Eléments de tribologie

II. Introduction

Au début du vingtième siècle, la tribologie s'appuyait sur l'étude des volumes, avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement. Au milieu du vingtième siècle, la tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Depuis une vingtaine d'années, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments interfaciaux dans un contact.

Les phénomènes de frottement ne sont pas décrits par des propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement délicate. En outre, le frottement et l'usure sont des phénomènes indépendants. Il est en effet possible de concevoir des systèmes à usure faible et frottement élevé (freins) ou à usure forte et frottement faible (usinage). Enfin, l'introduction de la notion de contact à trois corps, qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de vitesse, a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure [GODE90, DENA01].

II.1 Définition

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Elle présente trois aspects distincts : le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux en général.

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques *tribein* (frotter) et *logos* (parole, étude ou science), a été proposé en 1968 par G. Salomon pour désigner la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. La tribologie est ainsi une branche de la mécanique qui concerne le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces de contact entre deux solides [FREN01].

II.2 Système tribologique

La tribologie des interfaces concerne le milieu interfacial entre les deux corps en contact. On définit ainsi un contact tribologique ou tribosystème comme étant composé de trois éléments principaux (Figure II. 1): deux solides A et B en contact (premiers corps) et le milieu interfacial I désigné sous le terme de troisième corps. Ce troisième corps sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés

différentes de celles des premiers corps. L'origine de ce milieu interfacial peut être externe (lubrifiant solide ou liquide) ou interne par formation in situ (détachement de particules des premiers corps). Ce tribosystème se trouve dans un environnement E qui constitue l'ambiance de fonctionnement du contact. Des interactions entre cet environnement et le contact peuvent ainsi avoir lieu en fonction de sa composition, sa température, sa pollution éventuelle, ... [GOU104].

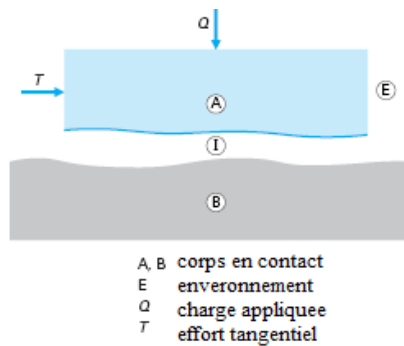


Figure I.1 : Représentation schématique d'un tribosystème [CART01].

II.3 Le circuit tribologique

Au cours du frottement, les particules du troisième corps sont constamment en mouvement et sont soumises à des gradients de vitesse. Cette circulation de matière à l'intérieur et à l'extérieur du contact est définie sous le terme de circuit tribologique, concept proposé par Y. Berthier [BERT90] [DESC02] pour compléter celui des mécanismes d'accommodation des vitesses et comprendre la relation entre le troisième corps et l'usure dans un contact donné. Il s'agit d'une représentation en deux dimensions des débits de troisième corps dans un contact élémentaire (Figure II. 2).

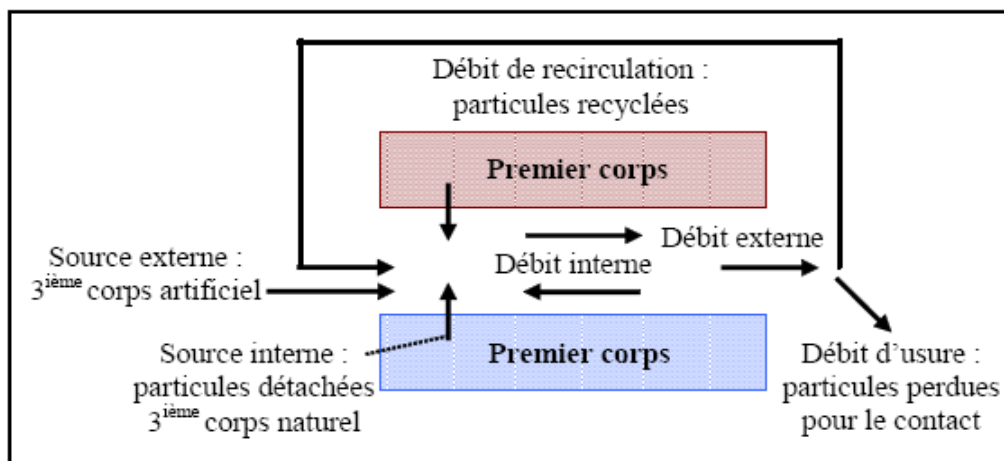


Figure II.2 : Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides [BERT90]

Suivant les mécanismes de dégradation de surface, des particules peuvent se détacher des premiers corps du fait de leur dégradation. Il s'agit d'une source interne qui conduit à la formation d'un troisième corps naturel dans le contact (débit source interne). L'introduction d'un troisième corps artificiel (lubrifiant solide ou liquide) correspond à une source externe (débit source externe). Ces particules de troisième corps peuvent rester piégées dans le contact ou bien être évacuées hors du contact. On parlera alors de débit interne et externe. Le débit interne représente la circulation du troisième corps dans le contact. Le débit externe est le débit de troisième corps qui s'échappe du contact. Il se divise en deux composantes : un débit de recirculation lorsque les particules sont réintroduites dans le contact et un débit d'usure lorsque les particules sont définitivement perdues pour le contact et ne participent plus à l'accommodation de vitesse [DELQ07].

II.4 Paramètres fonctionnels

Pour caractériser une situation tribologique, il importe dans un premier temps, d'identifier les différents contacts et d'extraire les variables opérationnelles qui définissent le fonctionnement de chaque contact.

II.4.1 Mode de contact

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participeront à l'évaluation du champ de contraintes imposé au contact. Par nature du contact on entend la définition générale de ce qui constitue le contact : solide/solide, liquide/solide, liquide + particules/solide, liquide + vapeur/solide...

La géométrie du contact caractérise la forme des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. On définit trois types de contact:

- les contacts de type ponctuel,
- les contacts linéiques,
- les contacts surfaciques.

II.4.2 La charge du contact

Il s'agit de déterminer le torseur dynamique, c'est-à-dire l'ensemble des forces et moments auquel est soumis le contact. La charge et la manière dont elle est appliquée permettent d'évaluer la nature et le niveau des contraintes auxquelles les couches superficielles sont soumises. La connaissance du champ de contrainte en profondeur est nécessaire pour justifier quantitativement la nature, la qualité et l'épaisseur des traitements ou revêtements de surface, pour évaluer les risques de fatigue de contact... La plage de variation

des charges mises en œuvre en génie mécanique est extrêmement large allant du millinewton au méganewton [HANS03].

II.4.3 La vitesse du contact

Ce paramètre consiste à préciser les différents éléments du torseur cinématique (ensemble des vitesses et moments cinétiques) appliqué au contact, c'est-à-dire la nature et la cinématique du mouvement. Suivant l'orientation des composantes de ce torseur au niveau du contact, le déplacement pourra s'effectuer en roulement, glissement ou pivotement.

La vitesse contribue à l'énergie dissipée dans le contact. Elle est aussi l'un des facteurs intervenant dans l'évaluation de la durée de vie des surfaces, combinée au temps de fonctionnement, elle permet le calcul de la distance à parcourir [HANS03].

II.4.4 Etats de surface

Le paramètre état de surface prend en compte deux éléments capitaux de description du contact :

- l'état de surface microgéométrique,
- l'état de surface physico-chimique.

La microgéométrie est l'un des éléments d'appréciation de l'aire réelle de contact, des raideurs normales et tangentielles du contact, des résistances mécanique, électrique et thermique de l'interface, de l'aptitude à l'adhésion et de la perméabilité du contact. Les paramètres à prendre en compte sont accessibles par la topographie des surfaces.

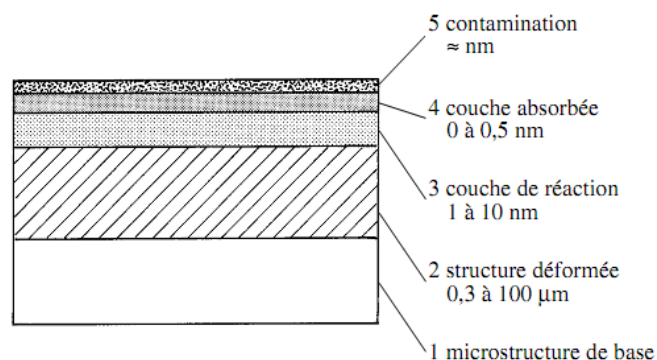


Figure II.3 : Représentation schématique d'une section des couches superficielles d'une surface technique [HANS03].

Les surfaces réelles sont, en effet, constituées par la superposition de plusieurs couches de nature, structure et composition qui peuvent être très différentes de celles du métal de base. La figure II. 3 donne une représentation schématique et un ordre de grandeur de l'épaisseur des principales couches que l'on rencontre généralement dans les surfaces

techniques. Leur présence et leur importance dépendent essentiellement du mode d'élaboration et de l'environnement. Ces couches peuvent évoluer ensuite en cours de service. Les moyens actuels d'analyse des surfaces et interfaces permettent de les caractériser tant du point de vue composition que structure [ISRA92].

II.4.5 Environnement

Il s'agit de préciser le milieu dans lequel évolue le contact. Ce milieu intervient sur le comportement tribologique du système par:

- sa nature: liquide ou gaz, composition chimique,
- sa température, son débit éventuel,
- ses propriétés mécaniques et physiques qui interviennent dans le comportement mécanique du contact, dans l'énergie mise en jeu et dans sa dissipation,
- ses propriétés chimiques: la réactivité du milieu ambiant avec les matériaux constituant les solides en contact est à l'origine de la création ou de la destruction des films superficiels dont la présence modifie considérablement le comportement du contact; un environnement oxydant favorise la formation ou la maintien de films, un milieu neutre limite leur durée, un milieu réducteur la diminue [HANS03].

II.4.6 Matériaux

Bien que les caractéristiques de frottement ne soient pas une propriété intrinsèque des matériaux, ceux-ci peuvent intervenir d'une manière décisive dans le comportement général du système tant par leurs propriétés mécaniques que physicochimiques [HANS03].

II.5 Le frottement

II.5.1 Définitions et notations

Le frottement peut être défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement [RABI65].

Pour présenter les différents phénomènes de frottements ainsi que leurs différents modèles, on s'intéresse à un mobile de masse m sur un plan horizontal. Il est soumis à son propre poids suivant l'axe (Oy) et subit une force u suivant l'axe (Ox) . Comme sur la figure II. 4, nous considérons un mouvement rectiligne.

Quel que soit le matériau d'un solide, sa surface n'est pas parfaitement lisse. Comme le montre la figure II.4, elle est rugueuse, comportant des irrégularités dues à l'usinage de la

pièce ou même à sa nature. Lorsque 2 pièces mécaniques en contact se déplacent l'une par rapport à l'autre, ces aspérités se déforment et s'entrechoquent, dissipant ainsi de l'énergie. Cette énergie est représentée de façon macroscopique par les frottements. Suivant les matériaux utilisés, il y aura soit plus de déformations élastiques soit plus de chocs pouvant aller jusqu'à arracher de la matière [NOUA09].

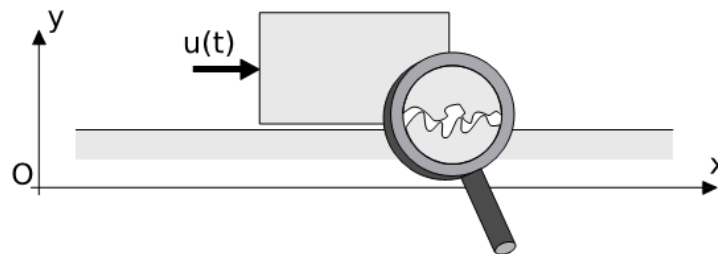


Figure II.4 : Solide sur un support horizontal [NOUA09].

Les normes ne définissent pas le frottement mais la force de frottement qui est la force résistante tangentielle à l'interface entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force extérieure, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à l'autre [ASTM90].

II.5.2 Lois empiriques du frottement

Les premiers travaux que l'on connaît sur le frottement sont ceux de Léonard de Vinci au début du 16ème siècle [DOWS79]. Mais, il faut attendre 200 ans pour que ces travaux aient un statut académique. En effet, Amontons, en 1699, puis Coulomb, en 1780, ont été les premiers à formuler les lois du frottement solide que nous connaissons actuellement.

Les lois d'Amontons se résument en deux postulats:

- La force de frottement F_t est proportionnelle à la charge normale appliquée F_n .
- La force de frottement F_t est indépendante de la surface apparente de contact.

La première loi d'Amontons montre qu'il n'y aura pas de glissement entre deux solides en contact, tant que la force tangentielle F_t , nécessaire pour déplacer le solide, est inférieure à une force minimale F_s . Lorsque la force tangentielle atteint cette valeur seuil, le solide glisse.

$$F_s = \mu_s F_n \quad (\text{II.1})$$

μ_s est appelé coefficient de frottement statique.

Une fois le solide mis en mouvement, une force F_d est nécessaire pour maintenir le glissement à vitesse constante. L'expérience montre que cette force est également proportionnelle à la charge normale appliquée:

$$F_d = \mu_d F_n \quad (\text{II.2})$$

μ_d définit le coefficient de frottement dynamique. μ_d est généralement plus petit que μ_s .

$$\mu \leq \mu_s \quad (\text{II.3})$$

Selon la deuxième loi, l'aire apparente de contact n'influe pas sur la force de frottement F_t . En reprenant les expériences de Léonard de Vinci (Figure II.5), Amontons a constaté empiriquement que quelque soit la surface glissante d'un bloc, son frottement est uniquement proportionnel à son poids [ABDE10].

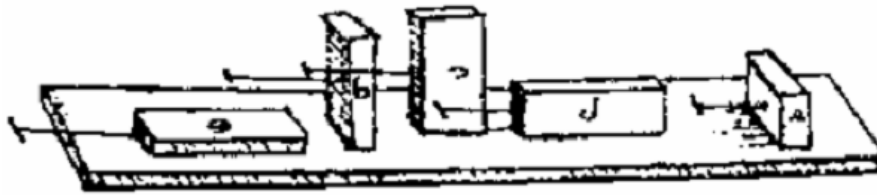


Figure II.5: Gravures originales illustrant les expériences de Léonard de Vinci [ABDE10].

Ce résultat très contre-intuitif a défié l'imagination des scientifiques plusieurs siècles avant que Bowden et Tabor [BOWD50] dans les années 50, proposent une explication tenant compte de l'effet de la rugosité des surfaces en contact (Figure II.6), paramètre non considéré dans la théorie d'Amontons –Coulomb.

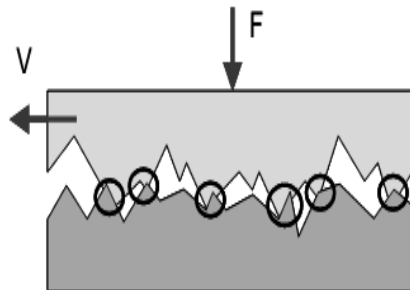


Figure II.6: Contact entre deux surfaces rugueuses [ABDE10]

II.5.3 Types de frottement

Il existe trois types de frottement :

II.5.3.1 Frottement sec

Le frottement sec désigne l'ensemble des phénomènes qui naissent dans la zone de contact entre deux corps, en l'absence de lubrification, et qui s'opposent au glissement de ces corps. S'il y a glissement relatif entre les deux corps en contact, on parle du frottement dynamique, sinon le frottement est dit statique. La compréhension des mécanismes entrant en jeu est restée longtemps très lacunaire, malgré l'intérêt porté à ce problème depuis déjà de nombreuses années. Ce n'est que ces dernières décennies, grâce à l'accumulation de données expérimentales et de résultats théoriques, que des progrès importants ont été faits [ABDE10]. Cependant, des progrès importants ont été réalisés à la suite des travaux de Holm en 1938, qui montrent que les aspérités en contact se déforment plastiquement et peuvent se souder, ainsi la force de frottement est directement reliée aux contraintes de cisaillement des jonctions formées.

Le modèle de Bowden et Tabor [BOWD50] suppose que le frottement sec entre deux surfaces rugueuses est dû essentiellement à deux processus physiques fondamentaux: le cisaillement des microjonctions adhésives formées au niveau des points de contact et le labourage des surfaces par les aspérités. La force du frottement sec est ainsi la somme d'une force de cisaillement due à l'adhésion et d'une force de déformation due au labourage [BOWD50, ZAMB98]

$$F_t = F_{ad} + F_{def} \quad (II.4)$$

II.5.3.2 Frottement hydrodynamique

Les surfaces en mouvement relatif ne sont pas en contact par leurs aspérités parce qu'elles sont séparées par un épais film de lubrifiant. Le coefficient de frottement est faible et ce type de frottement est indiqué pour l'utilisation à haute vitesse ou lorsque la force normale est élevée [BENG07].

II.5.3.3 Frottement onctueux

C'est un frottement de niveau intermédiaire entre le frottement sec et hydrodynamique: le film du liquide absorbé en surface ou formé par réaction chimique est de faible épaisseur. Le degré d'adhérence de ce film avec la surface détermine son efficacité. Ce régime offre un coefficient de frottement plus faible que le régime sec [BENG07].

II.6 L'usure

II.6.1 Introduction

La définition de l'usure est un problème difficile et sujet à discussion. Elle est souvent définie par la perte de matière ou de fonction d'un mécanisme suite à une détérioration due au frottement. Il n'existe pas d'unité standard de l'usure : l'unité la plus souvent utilisée est le taux d'usure généralement exprimé par la masse perdue rapportée à la distance parcourue ou à la surface de contact. Ce taux d'usure peut être inadapté dans plusieurs cas à cause de la diversité des mécanismes, des sollicitations et des mécanismes de dégradation.

II.6.2 Définitions

L'usure est la perte progressive de matériau due à l'interaction de surfaces en mouvement relatif (l'une par rapport à l'autre) [OCDE69].

L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces [KAPS01].

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles [BARR99].

II.6.3 Mécanismes d'usure

II.6.3.1 L'usure par transfert ou adhésion :

L'usure adhésive se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique (figure II.7). Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées. Les micro-aspérités présentes dans le contact peuvent conduire à la diminution des zones en contact et générer aux jonctions des énergies très élevées qui peuvent favoriser les réactions physico-chimiques (micro soudage des aspérités en contact).

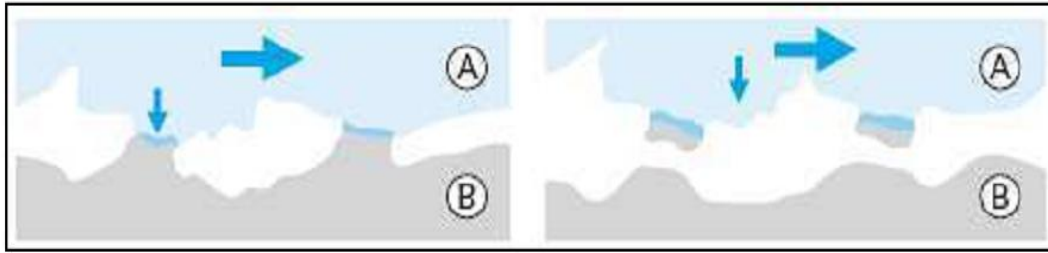


Figure II.7 : Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive d'après [KAPS01]

Lors du frottement, il existe entre les matériaux antagonistes une multitude de micro contacts qui supportent l'ensemble de la charge normale. En effet, dans ces régions, une constriction des lignes de forces engendre des concentrations de contraintes et l'augmentation de la température (températures flashes). L'évolution de ces aspérités dépend des conditions de sollicitations et de l'environnement.

Un équilibre est atteint dès que l'adhérence des films de transfert est supérieure à la force de frottement. Sinon, les contraintes de cisaillement générées provoquent la rupture à l'interface surface/film transféré et forme des débris. Ces derniers peuvent être progressivement évacués du contact en laissant une surface très réactive siège d'un nouveau processus de dégradation. Si les débris restent piégés dans le contact, les aires réelles de contact s'accroissent et assurent un rôle de portance (effet de séparation des antagonistes, les débris supportent les pressions, l'usure et le coefficient de frottement sont moindres) [BARR99].

II.6.3.2 L'usure par abrasion

Elle se caractérise par la présence dans le contact d'un état de surface rugueux ou par pénétration dans le matériau le plus tendre de particules dures provenant des débris d'usure du contact ou lié à la pollution du milieu. Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, devient rapidement une usure à trois corps (figure II.8). Cette forme d'usure se manifeste par des polissages, des griffures, des micro-labourages, des arrachements de particules. Le micro-labourage (ou micro-usinage) se manifeste par des rayures à la surface du matériau le plus tendre sans arrachement de matière mais provoquant sur les bords du sillon une déformation plastique. Le plus souvent pour lutter contre l'usure abrasive, on cherche à durcir les matériaux (au moins leur surface) [BARR99].

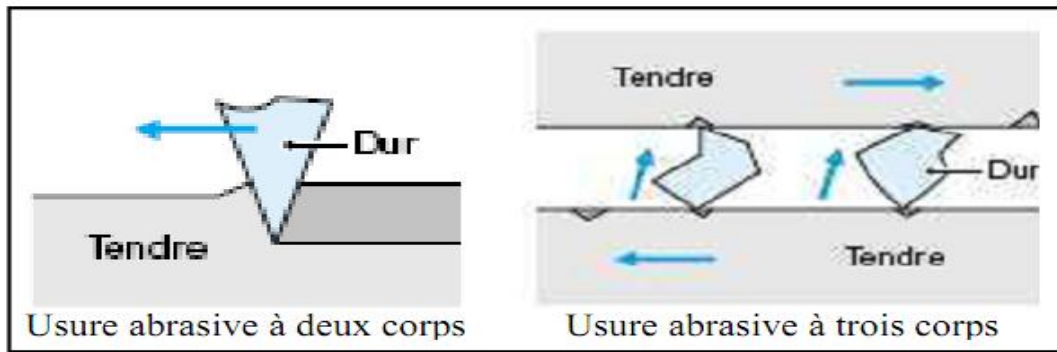


Figure II.8 : Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive d'après [KAPS01]

II.6.3.3 Usure érosive

L'usure érosive se définit comme la perte de matière provoquée par l'action de particules contenues dans un fluide en mouvement et qui viennent heurter une surface solide. Comme dans le cas de l'usure abrasive plusieurs paramètres influencent ce mode d'usure:

- La taille, le nombre, la morphologie et la vitesse des particules.
- L'angle d'impact qui définit le faciès des endommagements observés (figure II.9).

Un faible angle d'incidence favorise l'effet de coupe alors qu'une incidence normale entraîne plus de déformation. L'intensité des endommagements dépend de plus du comportement des matériaux (figure II.10). Les résultats montrent que l'érosion est maximale pour de faibles angles d'attaque dans le cas des matériaux à caractère ductile et qu'au contraire, elle est maximale sous incidence normale avec des matériaux fragiles [BAWD64].

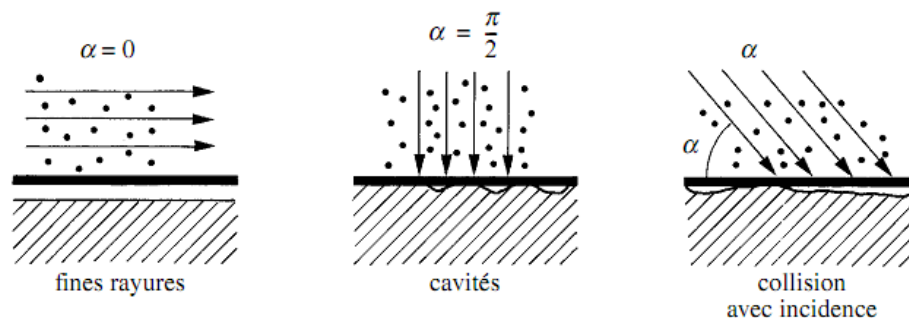


Figure II.9 : Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans un fluide en mouvement [BAWD64].

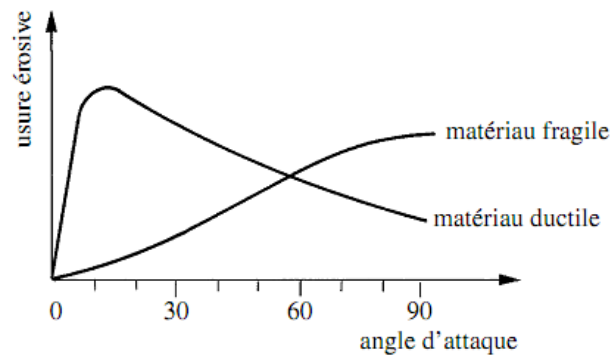


Figure II.10 : Erosion en fonction de l'angle d'incidence des particules [BAWD64].

II.6.3.4 L'usure par fatigue

Les contraintes mécaniques générées par le frottement peuvent entraîner la création et la propagation de fissures.

Dans le cas des matériaux ductiles (tels que les matériaux métalliques), il est question d'usure par fatigue superficielle ou par délamination. La rupture par fissuration a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales. A terme, des écailles dues à la propagation des fissures apparaissent dans les zones de frottement (Figure II.11).

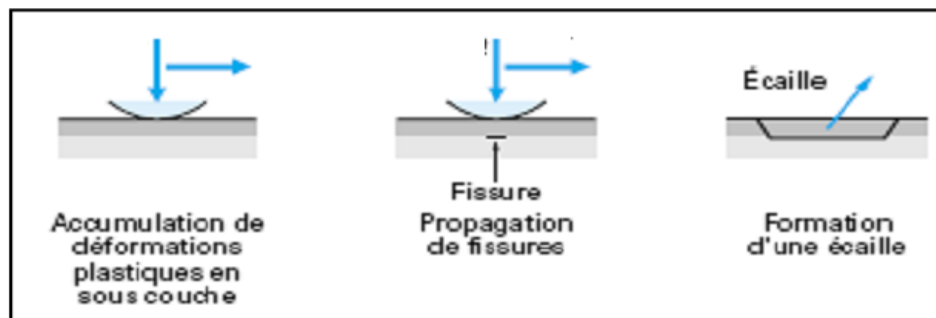


Figure II.11 : Usure par fissuration (cas des matériaux ductiles) d'après [KAPS01]

Pour les matériaux à comportement fragile (typiquement les céramiques), les fissures se créent dans les zones où les contraintes en tension sont les plus importantes. Elles sont associées à un dépassement local du seuil de rupture du matériau. Elles se situent à l'arrière du contact et se propagent perpendiculairement à la surface (Figure II.12). Il s'agit d'une usure par fracturation [KAPS01].

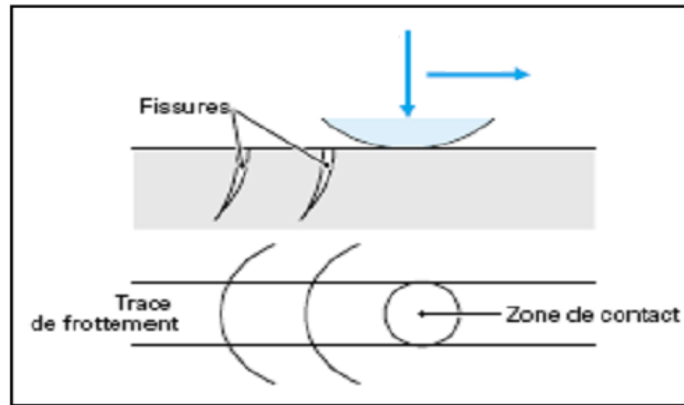


Figure II. 12 : Usure par fissuration (cas des matériaux fragiles) d'après [KAPS01]

II.6.3.5 L'usure par réactions tribochimiques

Cette forme d'usure apparaît lorsque le frottement a lieu dans un environnement réactif pour les matériaux en présence (atmosphère, lubrifiant,...). Dans ce cas, l'usure est régie par la réactivité chimique des premiers ou troisième corps avec l'environnement. Cette réactivité peut être également créée ou activée par l'énergie dissipée en frottement dans l'interface. Il y a tout d'abord création de débris d'usure provenant des premiers corps, initiée par un des mécanismes décrits précédemment (adhésion, abrasion, fatigue). Ensuite, l'oxydation de ces débris peut conduire à la formation d'un film d'oxydes, de faible épaisseur, adhérent au substrat, qui joue un rôle protecteur contre l'usure adhésive.

L'usure se manifeste lorsque les sollicitations de frottement au contact entraînent l'élimination des couches formées. La cinétique de ce phénomène est donc gouvernée par la compétition entre la formation du film réactionnel et sa destruction par frottement. La réactivité du milieu peut être primordiale dans la lutte contre l'usure adhésive car elle doit être suffisamment élevée pour former rapidement un film protecteur mais ne doit pas être excessive pour ne pas consommer les corps en contact [KAPS01].

II.6.4 Evaluation de l'usure

En 1953, Archard [Arch53] établit expérimentalement une relation permettant d'estimer pour un contact pion- disque le volume de matériau usé V dans le cas d'un contact glissant à vitesse constante et pour des matériaux de dureté très différente :

$$V = K \frac{F_n}{P_m} d \quad (\text{II.5})$$

En fonction d'un coefficient d'usure k sans dimension, de la force normale appliquée F_n de la dureté ou de la contrainte d'écoulement P_m du matériau le plus mou et de la distance de glissement d . La loi d'Archard s'exprime également sous la forme :

$$V = K F_n d \quad (\text{II.6})$$

Avec k vitesse d'usure ($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
 V le volume de matière perdue (m^3)
 F_n la charge appliquée (N)
 d la longueur de glissement (m)

II.7 Relation entre frottement et usure

L'usure et le frottement étant deux manifestations des interactions mécaniques entre deux corps. Il est naturel de chercher s'il existe des relations mutuelles, ne serait-ce que pour alléger le problème de la mesure de l'usure, beaucoup plus lourde et délicate que celle du frottement. Le tableau I.1 relatif au frottement à sec entre divers matériaux montre qu'il n'existe pas de relation universelle entre deux grandeurs : un frottement plus élevé peut s'accompagner d'une croissance ou d'une diminution de la vitesse d'usure. On y voit en outre le très large domaine de variation de la vitesse d'usure (5 ordres de grandeur) alors que le frottement varie seulement d'un facteur 3 [FELD89]. Par ailleurs, la vitesse d'usure k n'est pas inversement proportionnelle à la dureté du matériau H_v comme le prévoient les modèles mécaniques simples d'usure pour lesquels le volume d'usure est proportionnel à l'aire réelle de contact $A_r = \frac{P}{H_v}$; en conséquence, le facteur d'usure $K' = \frac{V H_v}{P L}$ n'est pas constant.

Tableau I.1 : Frottement et usure des pièces frottantes à sec
 (Cylindres croisés, $P=4 \text{ N}$, $v= 18 \text{ m/s}$) [ARCH56]

Matériaux (usure et dureté H_v du matériau de droite)	Matériaux antagonistes	μ	V_u/L (cm^2)	$K' = \frac{V H_v}{P L} = K H V$
Acier doux		0.62	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
Laiton 60/40	Acier à outil durci	0.24	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-4}$
PTFE		0.18	$2 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-6}$
Stellite		0.6	$3,2 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Inox ferritique		0.53	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Polyethylene		0.65	$3 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-8}$

Chapitre III :

Méthodes expérimentales

Au cours de ce chapitre, nous présenterons les moyens d'essai utilisés lors de cette étude. Cette présentation est importante pour la compréhension du déroulement de notre travail

Un essai de frottement de type « pion-disque » est mis en œuvre afin d'étudier le comportement tribologique des revêtements d'alumine projetés par plasma. La sensibilité de cet essai permet d'étudier le mécanisme d'usure obtenu.

III.1 Matériaux utilisés

Nous avons utilisé deux types de matériaux :

- ❖ le premier est un acier ordinaire Cylindrique de diamètre 25 mm revêtu par deux dépôts :
 - dépôt d'alumine Al_2O_3 ,
 - dépôt composite formé de 80% TiO_2 et 20% Al_2O_3 .

Cet échantillon a été réalisé par déposition plasma par le département Leader en Allemagne (plasma engineering and surface technologies). La figure III.1 donne les schémas des échantillons livrés avec leurs dimensions respectives.

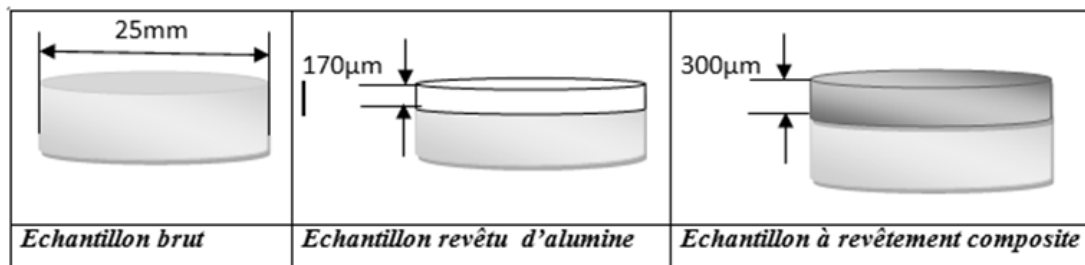


Figure III.1: Schémas des échantillons utilisés

- ❖ Le second est un alliage d'aluminium de nuance AU4G revêtu par un dépôt d'acier inoxydable obtenu par projection plasma. Cet échantillon a été élaboré par le laboratoire SPTS (Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surfaces) de l'université de Limoges (France). Les conditions de projection sont:

- courant de projection : 500A
- distance de tir : 100 mm
- matériaux de déposition : acier 316L, composite céramique
- épaisseur de la couche ~ 300µm

L'échantillon, est sous forme d'un cylindre de 40mm de diamètre et de 9 mm d'épaisseur. La surface revêtu est rectifiée pour servir de support d'essais tribologiques (Figure III.2). La

composition des matériaux de revêtement ne sont données que globalement. L'acier 316L (norme AISI) est un acier austénitique de composition technique : 0,03%C, 17%Cr, 12%Ni et 2,5%Mo.

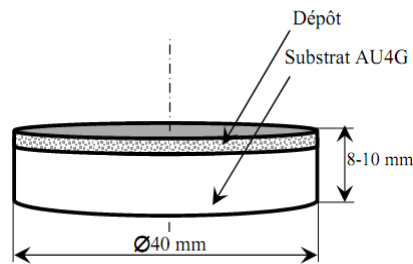


Figure III .2 : Schéma d'échantillon utilisé

III.2 Descriptions des appareils utilisées

2.1 Dispositif d'usure

C'est un amplificateur des forces, il est réalisé à l'institut d'Optique et de Mécanique de Précision et a été adapté à un tour horizontal. Son fonctionnement est basé sur le principe d'un levier à angle droit actionné par une force provoquant un couple sur une bille s'appuyant sur une surface tournante (figure III.3). La force F appliquée sur l'extrémité du levier crée une force, amplifiée et de direction perpendiculaire, appliquée sur la bille qui se trouve en contact direct avec la surface de l'échantillon. Etant en rotation, le contact glissant entre la bille et l'échantillon, et sous l'effet de la force d'application, crée une usure de la surface apparaissant sous forme de piste circulaire autour de l'axe de rotation (figure III. 4).

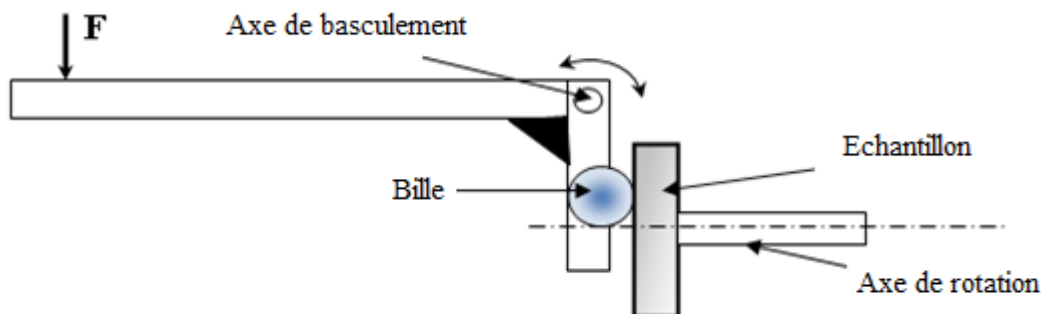


Figure III.3 : Schéma cinématique du dispositif d'usure

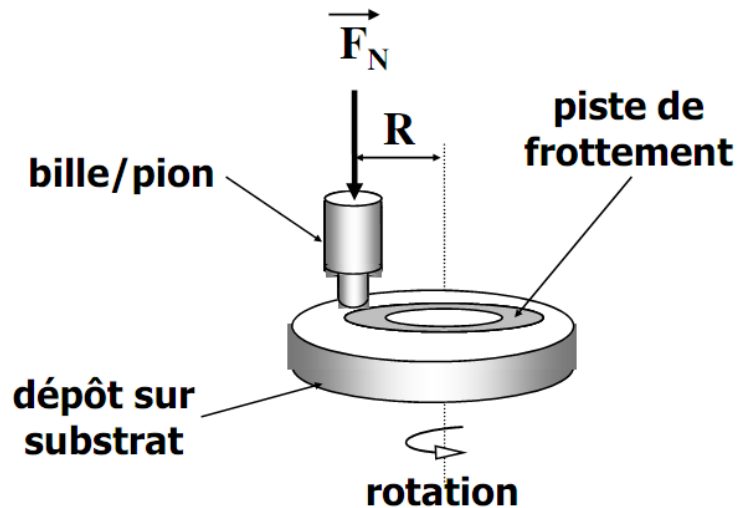


Figure III.4: Schéma de principe du tribomètre « pion-disque »

2.2 Caractéristiques du dispositif

Pour des conditions de commodité des matériaux et des dimensions des échantillons, nous avons choisi les caractéristiques suivantes :

- La distance entre le centre de la bille et l'axe de rotation : 10 mm ;
- La distance entre le point d'application de la force et l'axe de rotation : 60mm ;
- La longueur du bras : 70 mm ;
- Le diamètre de la bille : 6 mm ;
- Le diamètre d'échantillon : 40 mm ;

III.2.3 Conditions de travail

Les essais d'usure ont été effectués sous les conditions expérimentales suivantes :

- Vitesse de rotation de l'échantillon : 56trs/min,
- Force appliquée :
 - 100N pour le dépôt alumine et composite céramique;
 - 60N pour le dépôt d'acier inoxydable;
- Durée d'essais : 30min;
- contact ponctuel : bille/dépôt plasma ;
- Le pion est une bille d'alumine très dure de diamètre 6mm ;

Tous les essais sont réalisés à sec et dans des conditions normales de température et de pression atmosphérique.

La perte de masse (Δm) de l'échantillon est considérée comme un paramètre d'usure évoluant en fonction de temps. Pour calculer (Δm) on pèse l'éprouvette avant et après l'essai à l'aide d'une balance de précision à affichage digitale « SARTORUS » dont l'erreur est de l'ordre de 0.01 mg, la perte de masse est exprimée par la relation suivante :

$$\Delta m = m_i - m_t \quad (\text{III.1})$$

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

m_t : la masse de l'échantillon après un temps (t) d'usure (mg).

La vitesse d'usure est estimée en calculant le volume de matière perdue de l'objet considéré (bille ou disque) selon la loi d'Archard [Arch53]. Cette loi caractérise l'usure par le coefficient K nommé vitesse d'usure et donné par :

$$k = \frac{V}{F_n L} \quad (\text{III.2})$$

Avec

- k vitesse d'usure ($\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
- V le volume de matière perdue (m^3)
- F_n la charge appliquée (N)
- L la longueur de glissement (m)

III.3 Moyens et appareils utilisés

3.1 Projecteur de profil

Pour la mesure de la largeur de chaque piste, nous avons utilisé le projecteur de profil. Cet appareil est du type MP320 C'est un instrument optique qui projette l'ombre d'un objet sur une table graduée avec un grossissement 10 ou 100x (Figure III.5). La mesure est assurée par le déplacement d'une règle imprimée suivant deux axes perpendiculaires et un enregistreur micrométrique à affichage digital.

3.2 Duromètre

Les essais de dureté ont été effectués sur un duromètre de type ZHU 2.5 permettant de réaliser différentes formes de dureté (Figure III. 6). Il est piloté par microordinateur et peut donner le comportement du matériau en portant la variation de la profondeur de pénétration en fonction de la force d'application ou la dureté Martens suivant la loi de pénétration. La

plage des charges de ce duromètre est très large. Elle va de 1 μ N à 500N. Ces performances permettent de prendre la dureté de la couche de revêtement, la dureté du substrat et le profil de dureté substrat couche. On a réalisé des essais de dureté Vickers avec une charge de 5N et un temps de maintien de 15 secondes.



Figure III.5: Projecteur de profil



Figure III.6: Duromètre ZHU 2.5

III.4 Observations métallographiques

Pour les observations métallographiques, on a utilisé deux microscopes. Le premier est un binoculaire ordinaire pour des observations grossières et sert à la limitation des endommagements majeurs (figure III.7). Le deuxième est un microscope métallographique Axiovert 40 MAT «CARL ZEISS». Il est constitué de :

- un revolver de 4 à 5 objectifs
- une caméra
- un logiciel (intelligence intégrée)

Ce microscope permet l'observation des pistes d'usure, et les débris,..., (figure III.8).



Figure III.7: Binoculaire



Figure III.8 : microscope métallographique
Axiovert 40 MAT

III.5 Préparation des échantillons

Pour les observations métallographiques, l'échantillon a été minutieusement polit au papier verre différents grades jusqu'à 4000 sur une polisseuse rotative. Les échantillons sont ensuite attaqués chimiquement. La solution d'attaque est constituée de, 10cm^3 fluorhydrique, 15 cm^3 acide nitrique, et 90 cm^3 eau distillée. Le temps d'attaque est de l'ordre de 20 secondes.

III.6 Usure du disque

Les différentes caractéristiques permettant de quantifier l'usure du disque, la largeur l , la profondeur maximale P et l'aire S de la section de la piste d'usure (figure III.8).

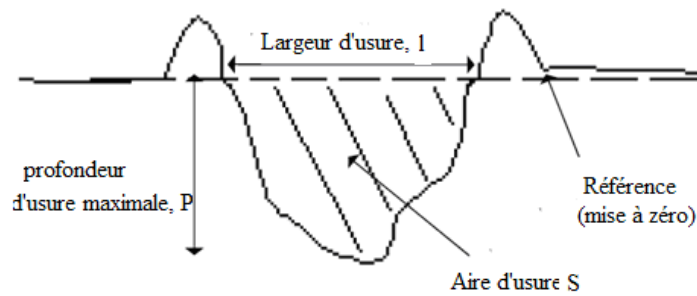


Figure III.8 : Aspect d'un profil de piste d'usure par rugosimétrie

Chapitre IV :
Résultats et discussions

Dans ce chapitre, on présente les résultats et les interprétations correspondantes. Les essais ont été réalisés au laboratoire des matériaux non métalliques de l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision de l'Université de Sétif. L'objectif du travail consiste à :

- 1 – étudier la tenue à l'usure d'un revêtement d'alumine et une composite céramique TA ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) par plasma sur un acier ordinaire,
- 2 – mener une étude comparative avec un revêtement d'acier par plasma sur un alliage d'aluminium déjà réalisée. Cette étude a été entamée par S. Aounallah [AOUN10] mais les conditions expérimentales doivent être plus sévères cette fois.

Le travail consiste à étudier l'effet de la vitesse de glissement sur l'usure. Pour cela, nous avons réalisé quatre essais à différentes vitesses de glissement sur le même échantillon.

Nous nous sommes également intéressés aux :

- ✓ caractéristiques du substrat et du revêtement ainsi que les mécanismes qui contrôlent l'usure
- ✓ étude des débris et les pistes obtenues en mesurant la largeur (l) et la profondeur de chaque piste.

IV.1 Etude de l'acier à revêtement alumine ou céramique composite

1.1 Caractérisation par mesure de dureté

Le matériau utilisé dans ce présent travail est un acier ordinaire, sur lequel on a déposé une couche d'alumine d'épaisseur (0.4 mm) par projection plasma.

Le tableau IV.I donne la dureté Vickers du substrat utilisé et du revêtement composite. Nous avons effectué trois mesures sur le substrat compte tenu de l'homogénéité du matériau. Pour le revêtement composite, nous avons effectué un profil de six mesures allant du cœur du substrat jusqu'à la couche déposée. Nous n'avons pas pu effectuer des essais de dureté sur la couche d'alumine par impuissance d'observation des empreintes.

On remarque que le substrat présente une dureté variant entre 216 et 320Hv. Cette différence est due à la différence entre un cœur sain et une couche thermiquement altérée. La valeur moyenne caractéristique de cet acier est de l'ordre de 250Hv équivalent à 22HRC. Pour le revêtement composite, on remarque un profil de dureté entre le substrat et la couche superficielle. Ce profil se présente comme suit :

Tableau. IV.1 : Dureté des échantillons

N°	Substrat acier			Revêtement composite		
	F _{max} (N)	d(mm)	HV	F _{max} (N)	d(mm)	HV
1	5,03	0,05	320,09	5,03	0,05	320,09
2	5,03	0,05	320,99	5,02	0,07	207,08
3	5,00	0,07	216,26	5,01	0,07	187,81
4				5,02	0,03	798,92
5				5,03	0,03	1165,41
6				5,03	0,03	1125,21

- La dureté est de 320Hv caractéristique de la zone altérée thermiquement.
- La dureté baisse progressivement 207 et 187Hv signe des essais de la zone intermédiaire entre la substrat et la couche déposée.
- La dureté augmente de nouveau et atteint une valeur moyenne de 1145.31Hv de la couche déposée.

Cette constatation montre l'existence d'une couche intermédiaire importante séparant la couche déposée du substrat.

Les figures IV.1 et IV.2 donnent le profil de pénétration de l'indenteur dans le substrat et le revêtement composite respectivement. Il exprime la variation de la charge en fonction de la profondeur de pénétration pendant le cycle charge décharge. La figure IV.1 montre une pénétration progressive de l'indenteur pendant le chargement suivie retrait rapide pendant le déchargement. Un tel comportement prouve une plasticité importante du substrat. Cela est en parfaite cohérence avec le comportement d'un acier doux. Au contraire, le cycle charge décharge sur le revêtement composite montre une pénétration très faible, signe d'un comportement fragile. La plasticité dans ce cas est presque absente étant donné que la couche est une composite céramique. Par contre, la dureté de la couche est très inférieure de celle d'une céramique composite [$Hv(Al_2O_3)=16GPa$], $Hv(TiO_2)=12GPa$]. Cette différence réside dans la nature de la couche déposée qui présente des défauts : porosité, hétérogénéité de dépôts, inhomogénéité de dilatation, ...

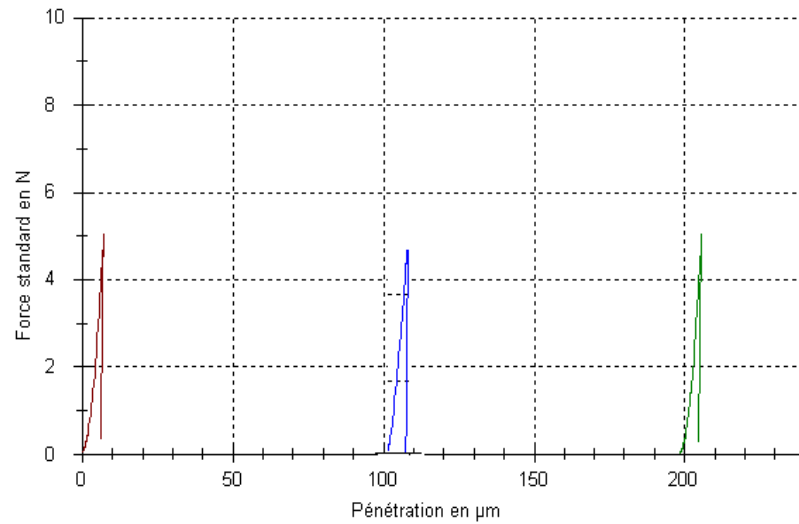


Figure IV.1 : Profil de pénétration force – profondeur de l'indenteur vickers
Sur le substrat

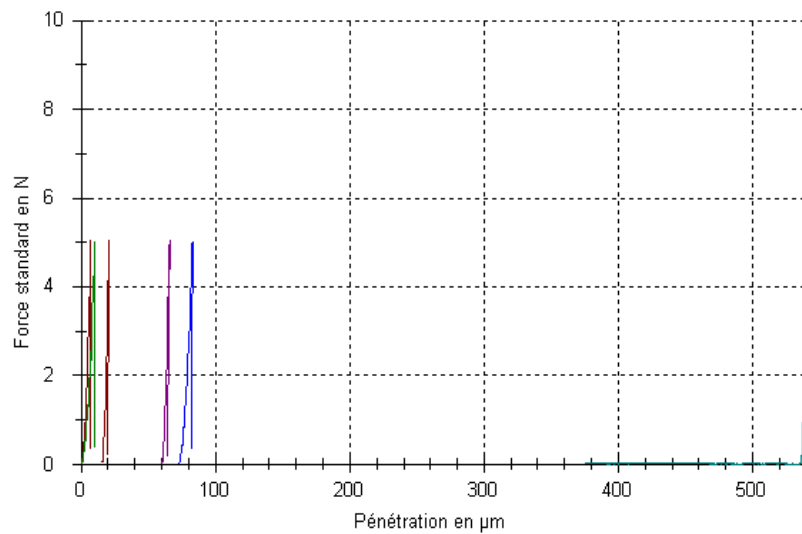


Figure IV.2 : Profil de pénétration force – profondeur de l'indenteur vickers
Sur le revêtement composite

1.2 Tenue à l'usure

Le tableau IV.2 rassemble toutes les données relatives à l'essai d'usure pour chaque type d'échantillon. Nous avons omis toute grandeur relative à la bille étant donné qu'elle n'a enregistré aucune perte de masse. Nous avons suivi l'usure des échantillons par la mesure des grandeurs suivantes :

D : diamètre moyen de la piste en mm,

v : vitesse de glissement relative en mm/s,

l : la largeur moyenne des pistes en mm,

L : longueur (distance) parcourue au cours de l'essai en m,

Δm : perte de masse après un essai d'usure en mg,

V : volume perdu en mm³,

K : le coefficient d'usure selon l'équation d'Archard.

Tableau IV.2 : Résultats expérimentaux

Substrat							
Piste	D [mm]	v [mm/s]	l [mm]	L [m]	Δm [mg]	V [mm ³]	K [10 ⁻⁵ g. N ⁻¹ m ⁻¹]
1	6,36	13,089	1,51	23,55	98,9	12,68	4,2
2	15,712	39,54	1,62	71,16	104,6	13,41	1,4
3	22,168	58,76	1,64	105,78	120,9	15,5	1,1
Echantillon revêtu en Al ₂ O ₃							
Piste	D [mm]	v [10 ⁻³ m/s]	l [mm]	L [m]	Δm [mg]	V [mm ³]	K [10 ⁻⁵ g. N ⁻¹ m ⁻¹]
1	7,166	20,48	2,089	36,86	93,6	24	2,51
2	16,092	43,34	2,23	78,012	199,1	51,05	2,5
3	-	-	-	-	-	-	-
Echantillon à revêtement composite							
Piste	D [mm]	v [10 ⁻³ m/s]	l [mm]	L [m]	Δm [mg]	V [mm ³]	K [10 ⁻⁵ g. N ⁻¹ m ⁻¹]
1	6,1955	18,17	1,63	31,69	87,7	19,48	2,7
2	15,8146	47,84	1,70	86,11	165	36,67	1,9
3	21,068	61,79	1,733	111,21	192,7	42,82	1,7

1.2.1 Etude de la perte de masse

La figure IV.3 donne la variation de la perte de masse relative à la distance parcourue pour les trois types de matériaux. On remarque d'une manière générale que cette variation est importante à faible vitesse puis diminue aux grandes vitesses pour le substrat et le revêtement composite. Pour le revêtement alumine, la courbe reste constante pour les deux vitesses utilisées. Ceci montre que la tenue à l'usure des deux revêtements est plus faible que celle du substrat. Ce comportement peut être expliqué par deux raisons :

- la mauvaise qualité de l'adhérence des revêtements au substrat. En effet, l'existence d'une zone intermédiaire entre le substrat et la couche déposée facilite l'écaillage et l'effritement des revêtements.

- la nature des revêtements puisqu'ils peuvent contenir des défauts de déposition (porosité, splatchs, ..). Ces défauts sont dus à un mauvais choix des conditions de déposition.

L'allure des courbes montre que l'usure obéit à la loi d'Archard. Ainsi, le calcul du coefficient d'usure k pour les trois matériaux sont :

- substrat : $k=1,25.10^{-5} \text{ g. N}^{-1} \text{ m}^{-1}$
- revêtement alumine : $k=2,5.10^{-5} \text{ g. N}^{-1} \text{ m}^{-1}$
- revêtement composite : $k=1,8.10^{-5} \text{ g. N}^{-1} \text{ m}^{-1}$

Il est nécessaire d'évoquer aussi que la perte de masse du substrat est minimum car l'usure du substrat est toujours accompagnée par une déformation plastique de type labourage. Alors que l'usure des revêtements est vraisemblablement contrôlée par cisaillement des débris, d'où l'écaillage observé. L'effritement est dû à une faible ténacité de la couche.

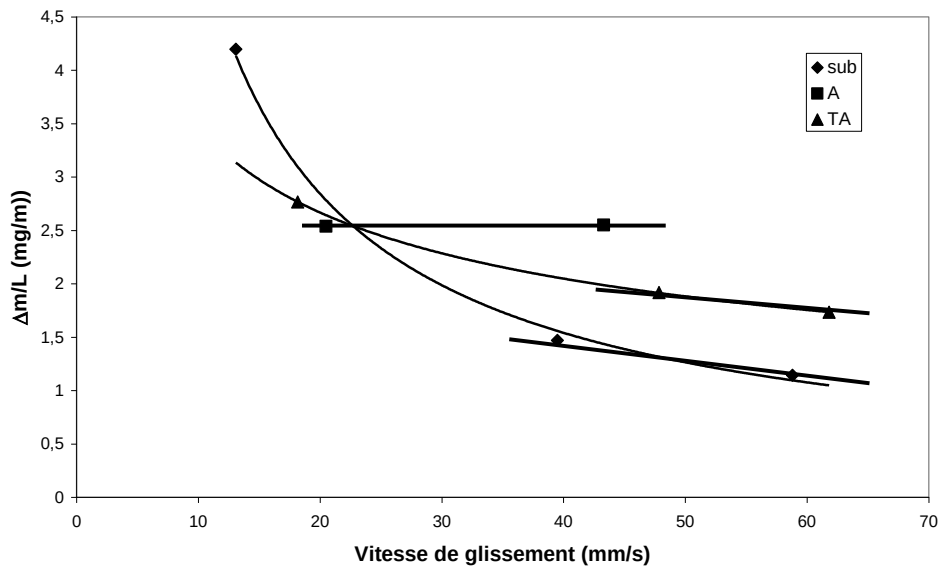


Figure IV.3 : Variation de la perte en masse relative en fonction de la vitesse de glissement

1.2.2 Etude des dimensions des pistes

Les figures IV.4 et IV.5 présentent la variation de la largeur et de la profondeur des pistes respectivement du substrat (Sub.) et des revêtements alumine (A) et composite (TA). Nous n'avons pas pu mesurer la profondeur des pistes du revêtement alumine à cause des détachements violents des débris et l'atteinte du substrat. On remarque que ces variations sont linéaires en fonction de la vitesse de glissement. Le comportement du substrat et du revêtement composite sont similaires, les droites ont la même pente. Par contre, la courbe de variation du revêtement alumine présente une pente plus grande à cause de la fragilité du dépôt. La

similarité des pentes du substrat et du revêtement composite est aussi observée dans la variation de la profondeur en fonction de la vitesse de glissement (Figure IV.5).

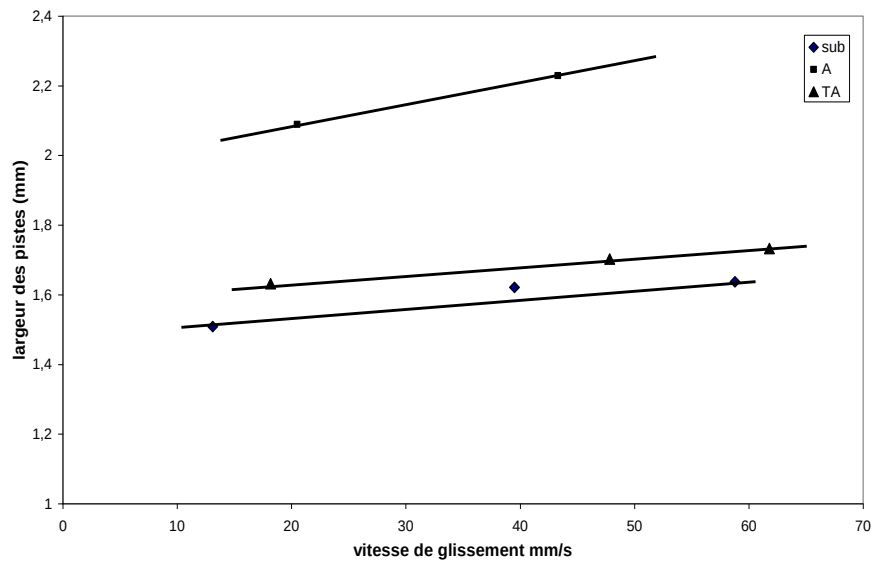


Figure IV.4 : La variation de la largeur de pistes en fonction de la vitesse de glissement

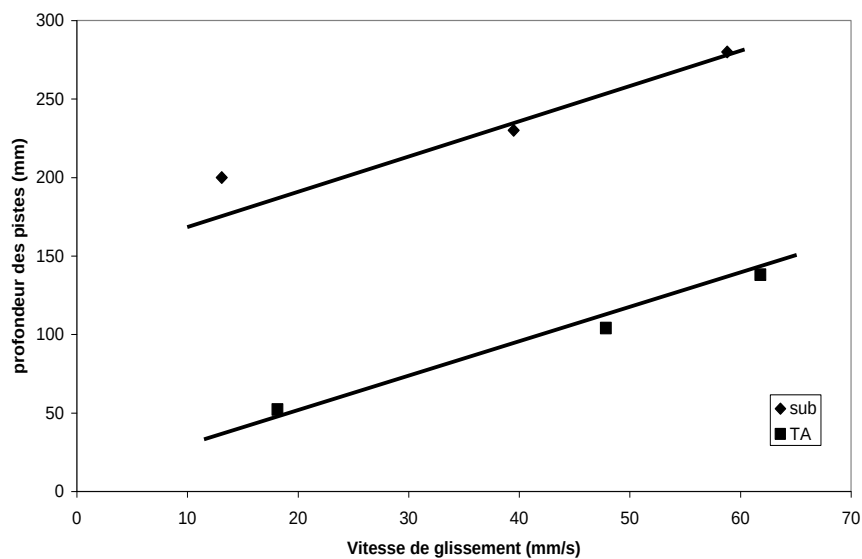


Figure IV.5 : Résultats des mesures de la profondeur des pistes

1.2.3 Observations métallographiques

Pour identifier les mécanismes qui contrôlent l'usure des matériaux étudiés, nous avons effectué deux types d'observations métallographiques afin de mettre en évidence les faciès de détachement des débris :

a - observation perpendiculaire des pistes,

b - observation latérale des sections.

Les figures IV. 6-8 donnent les micrographies optiques des pistes pour différents matériaux sous différentes conditions. On remarque que les pistes du substrat sont uniformément usées, les bords sont régulièrement délimités (Figure IV.6). Ceci prouve que l'usure est du type usure douce. Cependant, les micrographies des pistes des revêtements montrent une hétérogénéité importante dans le détachement des débris, les bords des pistes ne sont pas réguliers et les fonds des pistes sont déchiquetés (Figure IV.7 - 8). Ces remarques laissent supposer que l'usure est de type sévère. Ce type d'usure n'est pas dû à la qualité du matériau mais certainement aux mauvaises conditions de déposition des revêtements.

Les observations sur les coupes des échantillons n'ont pas donné d'informations significatives compte tenu de la nature des pistes et la difficulté de préparation métallographique. La figure IV.9 présente les micrographies optiques de la coupe des pistes d'usure du revêtement composite pour les différentes conditions d'usure. La figure IV.9-a présente un profil de piste régulier du fait de la faible vitesse de glissement qui ne provoque pas un endommagement important et sans que le pion n'a atteint la zone intermédiaire. Pour des vitesses importantes (47,839 et 61,783mm/s), l'usure devient de plus en plus sévère et le profil des pistes devient déformé (Figure IV.9-b et c).

1.2.4 Analyse des débris

L'analyse des débris nous donne des informations supplémentaires à l'analyse des pistes, donc sert à identifier le mécanisme qui contrôle le détachement des débris et le mécanisme qui contrôle l'endommagement de la surface. Il nous a été très difficile de collecter et classer tous les débris selon les conditions opératoires à cause de la faible quantité. La figure IV.10 présente les débris collectés pour chaque type de matériaux sans distinction entre les conditions d'essais. On remarque que les débris du substrat sont uniformes et de tailles proches. Alors que les débris détachés des revêtements sont très hétérogènes et de formes diverses. En plus, ils se rassemblent en amas. Cette morphologie montre que ces débris sont détachés sévèrement. En conclusion, les différentes analyses, des pistes et des débris, sont cohérentes et l'usure douce du substrat et sévère des revêtements se confirment.

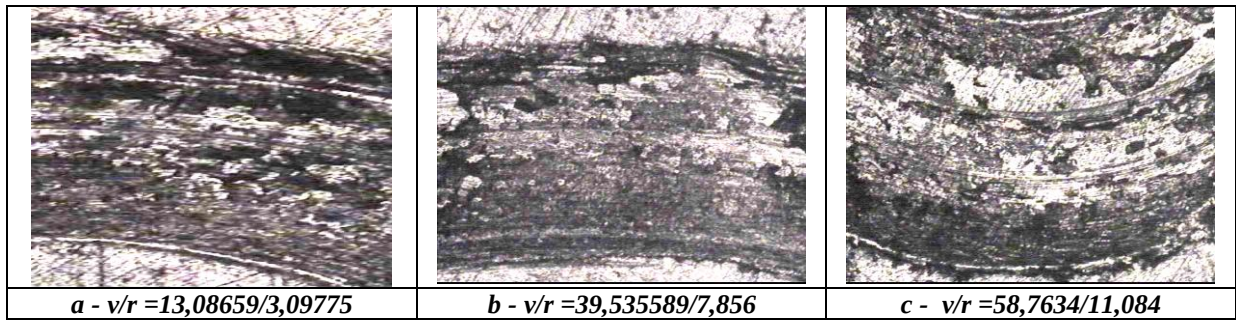


Figure IV.6 : Micrographie optique des pistes d'usure du substrat pour différentes conditions d'essai, $G=5x$

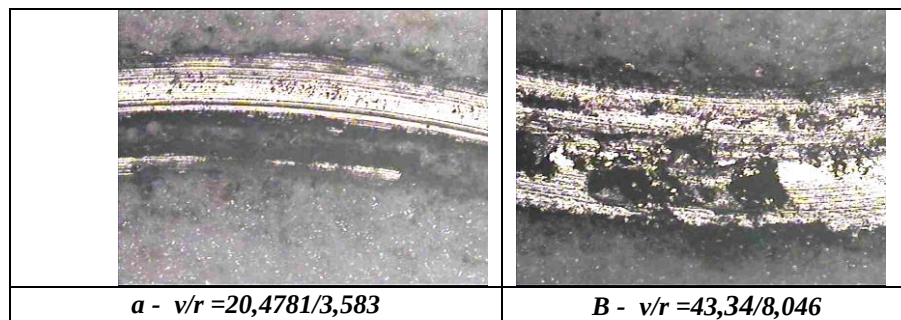


Figure IV.7 : Micrographie optique des pistes d'usure du revêtement alumine pour différentes conditions d'essai, $G=5x$



Figure IV.8 : Micrographie optique des pistes d'usure du revêtement composite pour différentes conditions d'essai, $G=5x$

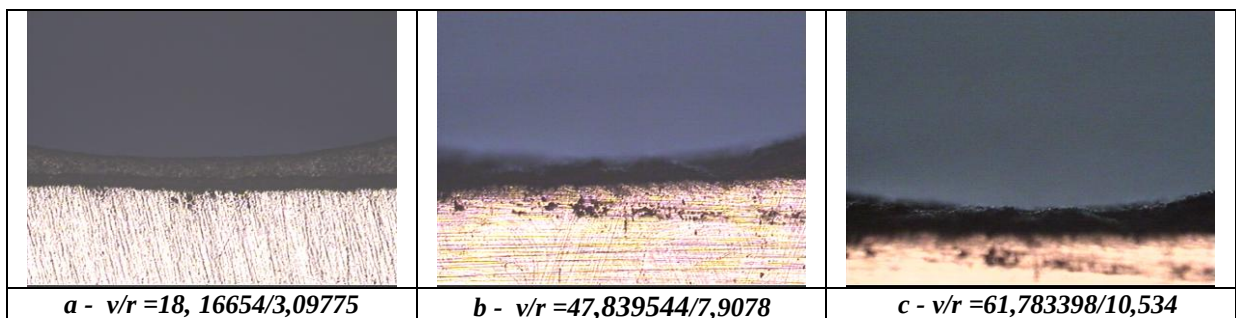


Figure IV.9 : Micrographies optique de la coupe des pistes d'usure du revêtement composite Pour différentes conditions d'essais, $G=10X$

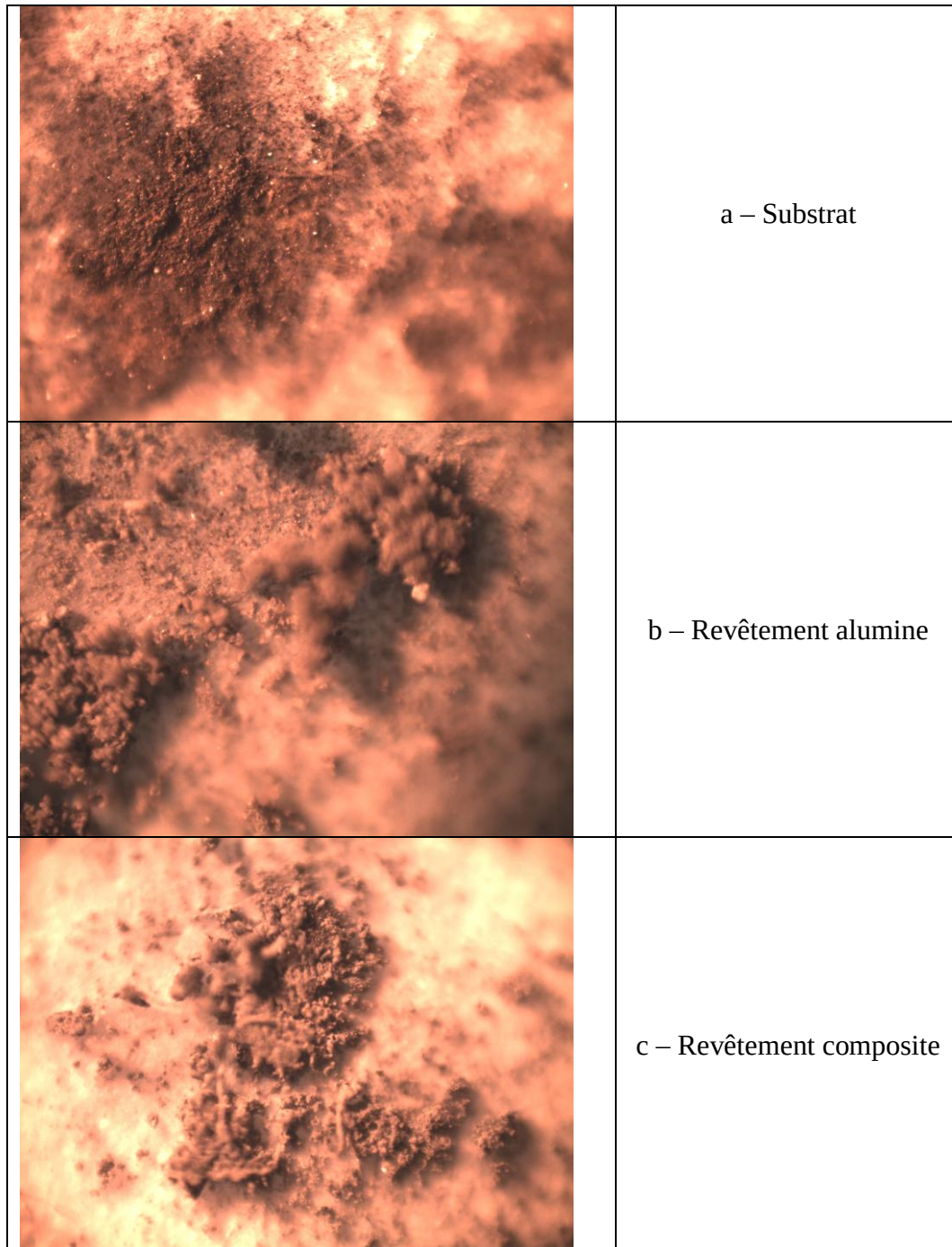


Figure IV.10 : Micrographies optiques des débris des différents matériaux

1.2.5 Analyse par DRX

L'analyse par diffraction des rayons X des débris traite la nature des débris détachés et l'identification d'éventuelle phase nouvelle suite à une réaction entre les échantillons et le pion. Selon la figure IV.10, qui rassemble les spectres des trois matériaux, on peut avancer les remarques suivantes :

- les spectres prouvent les composés formant chaque matériau à part,

- la présence de pics de faibles intensités relatifs au carbure de tungstène, signe de fine quantité de masse perdue par la bille mais n'a été identifiée par pesée,
- aucune nouvelle phase n'a été mise en évidence, d'où l'exclusion de réaction entre le pion et les matériaux étudiés,
- le large pic situé entre 15° et 17° n'a pas été identifié. Il se peut qu'il est dû au porte échantillon du diffractomètre.

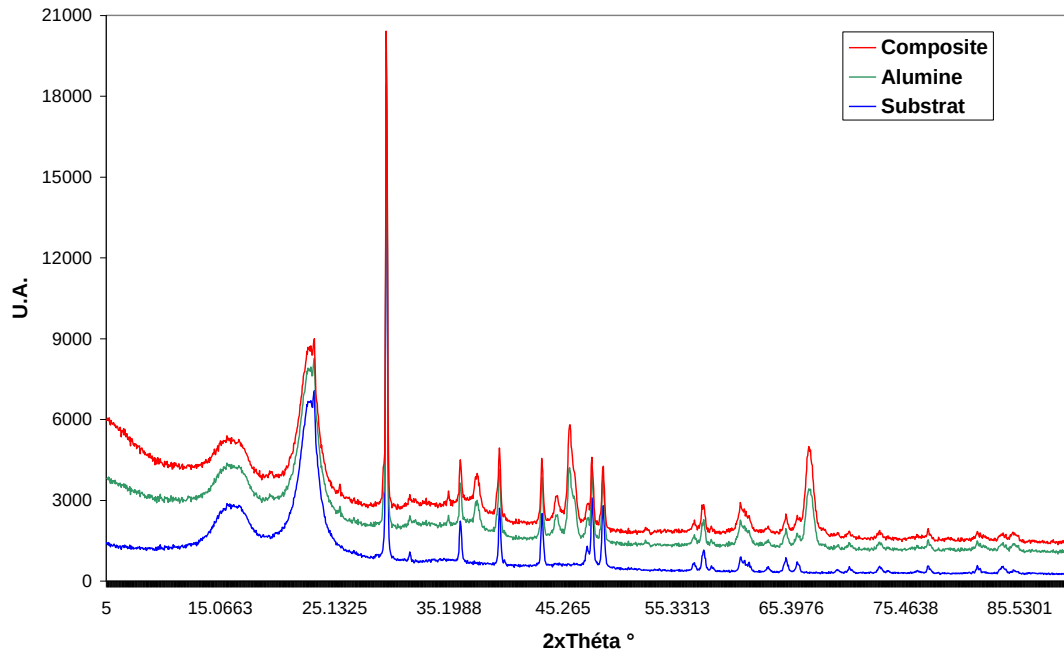


Figure IV.11 : Spectre de diffraction des rayons X des débris de différents matériaux étudiés

IV.2 Etude de l'alliage d'aluminium à revêtement d'acier

2.1 Caractérisation du substrat

2.1.1 Mesure de dureté

Le tableau IV.3 donne la dureté vickers du substrat utilisé et les données relatives à la pénétration de l'indenteur sous une force de 10N ainsi que les valeurs de la profondeur, max et min, durant la durée de maintien sous charge. Les valeurs de la dureté données sont très proches et prouvent une homogénéité suffisante de l'alliage. On calcule une moyenne de 118 Hv pour le substrat.

Pour les valeurs de la profondeur de pénétration (h_{max} et h_{min}) données par le tableau, on remarque que les valeurs sont très proches et la différence entre la valeur maximale et minimale ne dépasse dans les meilleurs des cas $3 \mu m$. Ceci confirme donc l'homogénéité du matériau utilisé.

De point de vue profil de pénétration, on peut avoir une idée sur le comportement mécanique de cet alliage au cours de l'enfoncement et le retrait de l'indenteur. Les courbes données par la figure IV.11 montre un comportement élastoplastique très claire surtout pendant le déchargement de l'indenteur. La dizaine d'essais réalisés montre une similitude des profils force pénétration. Ce qui confirme les remarques avancées par les valeurs de dureté ci-dessus.

Tableau IV.3 : Valeurs de dureté du substrat

	$F_{\max}$	$h_{\max}$	$h_{\min}$	d_h	d_v	d	HV
Légende	N	μm	μm	μm	μm	μm	
“	10.02	23.286	20.995	123.85	122.20	123.025	122.49
“	10.02	20.228	17.697	124.53	126.34	125.435	117.83
“	10.03	20.255	17.563	125.06	127.79	126.425	115.99

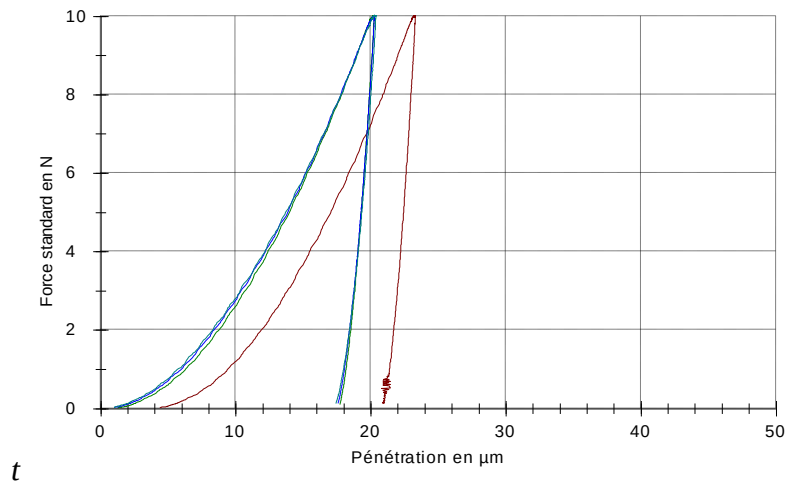


Figure IV.12 : Profil de pénétration force – profondeur de l'indenteur vickers
Sur le substrat

2.2 Revêtement

2.2.1 Identification du revêtement

Le spectre de diffraction des rayons X montre que le revêtement est un acier austénitique de composition typique AISI 316L (figure IV.12). En effet, par comparaison à la fiche ASTM, la composition du revêtement est Fe-0.06C-29Cr-16Ni.

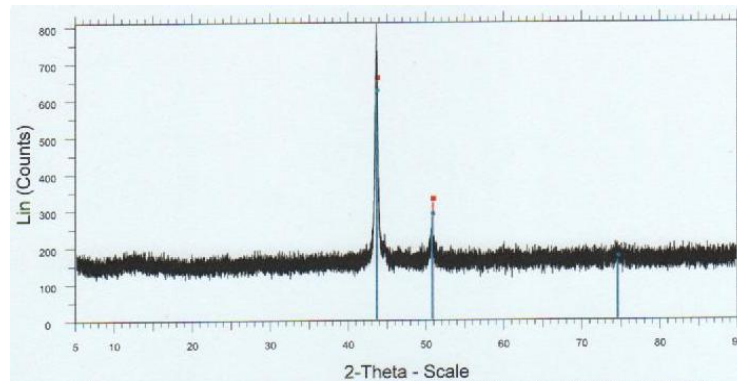


Figure IV.13 : Spectre de diffraction du revêtement en acier

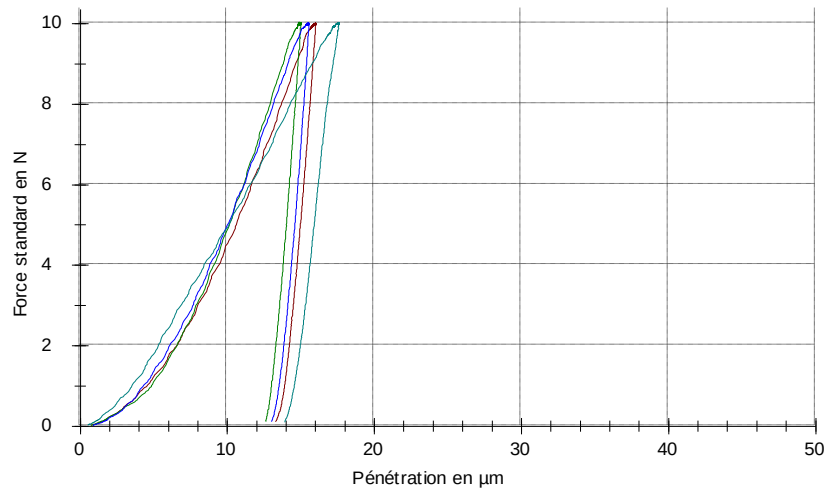
2.2.2 Mesure de dureté

Les résultats d'essais présentés par le tableau IV.4 présente une dispersion des valeurs de dureté qui vont de 173Hv à 214Hv. Ces valeurs montrent une hétérogénéité de structure malgré l'uniformité observée par micrographie. A propos des hauteurs, maximale et minimale, on enregistre aussi des dispersions qui vont jusqu'à 7 μm de différence. Ce qui confirme les valeurs de la dureté vickers. Ainsi, on conclut que malgré les observations métallographiques ne montrent pas des hétérogénéités majeures, en fait, il n'est pas comme on le prétend. Ces hétérogénéités peuvent trouver réponse avec des analyses plus profondes ou certainement la couche peut se comporter dans certaines zones comme un acier massif.

Les courbes du profil force pénétration montrent des pentes importantes lors de la décharge de l'indenteur (figure IV.13).

Tableau IV.4 : Valeurs de dureté du revêtement

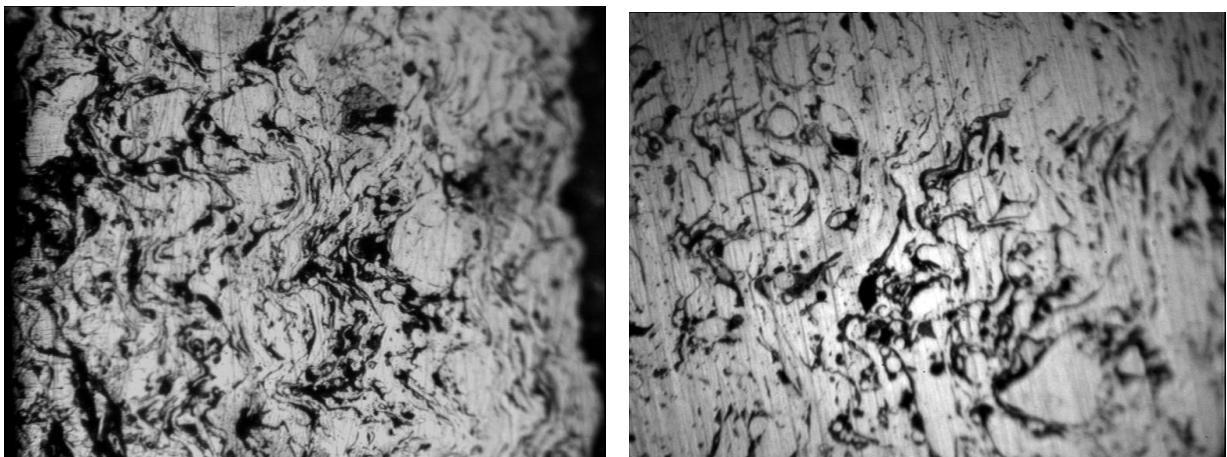
	F_{max}	h_{max}	h_{min}	d_h	d_v	d	HV
Légende	N	μm	μm	μm	μm	μm	
"	10.04	14.999	11.608	94.68	95.57	95.125	204.88
"	10.03	15.547	13.016	92.01	93.76	92.885	214.87
"	10.02	17.589	10.914	100.69	105.83	103.26	173.87



*Figure IV.14 : Profil de pénétration force – profondeur de l'indenteur vickers
Dans la couche d'acier*

IV.1.3 Observation métallographique

La figure IV.14 donne des micrographies optiques de la couche en acier déposée par plasma. D'une manière générale, la couche présente une épaisseur sensiblement uniforme, cependant, les défauts sont moindres. En effet, la couche présente des défauts de superposition de couches similaires à des strates. En outre, la couche présente des pores ou des cavités des gaz plasmagènes. Les particules solides n'ont pas été observées.



*Figure IV.15 : Micrographies optiques du revêtement d'acier
sur un substrat d'alliage d'aluminium AU4G*

2.3 Tenue du matériau à l'usure

Pendant tout notre travail nous avons appliqué une charge de 60N dans tous les essais. Le tableau IV.5 donne les résultats d'usure de la couche d'acier sur le substrat de l'alliage d'aluminium AU4G. Les valeurs données par le tableau sont définies comme suit :

D : diamètre moyen de la piste en mm,

v : vitesse de glissement relative en mm/s,

l : la largeur moyenne des pistes en mm,

L : longueur (distance) parcourue au cours de l'essai en m,

P : la profondeur des pistes en μm ,

Δm : perte de masse après un essai d'usure en mg,

K : le coefficient d'usure selon l'équation d'Archard.

Nous avons omis toute grandeur relative à la bille étant donné qu'elle n'a enregistré aucune perte de masse.

Tableau IV.5 : Résultats expérimentaux

Pistes	D (mm)	l (mm)	Δm (mg)	L (m)	V (mm/s)	P (μm)	K ($\text{g} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) $\times 10^{-6}$
(1)	6	1,30823	6,7	31,6512	17,6	57,45	3.53
(2)	14	1,52237	24,4	73,8527	41,0	85,11	5.5
(3)	24	1,70492	49	126,6048	70,4	104,03	6.4
(4)	32	2,19363	162	168,8058	93,8	144,70	16

2.3.1 Variation de la de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement

La figure IV.16 donne la variation de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement. La courbe obtenue montre que la variation la perte de masse est presque linéaire avec la vitesse de glissement. Ci qui montre qu'elles obéissent à la loi d'Archard appliquée aux métaux.

2.3.2 Variation de la largeur des pistes en fonction de la vitesse de glissement

Les résultats obtenus sont illustrés par la courbe suivante pour les différentes vitesses de glissement. On remarque que la longueur de glissement dépend de la vitesse de glissement, c'est-à-dire que la longueur de glissement augmente avec l'augmentation de la vitesse de glissement (figure IV.17).

2.3.3 Variation de la profondeur en fonction de la vitesse de glissement

A partir de la courbe (figure IV.18), on observe l'effet de la vitesse de glissement sur la profondeur des pistes. On remarque que la profondeur de pistes dépend de la vitesse, c'est-à-dire elle augmente avec l'augmentation de la vitesse de glissement.

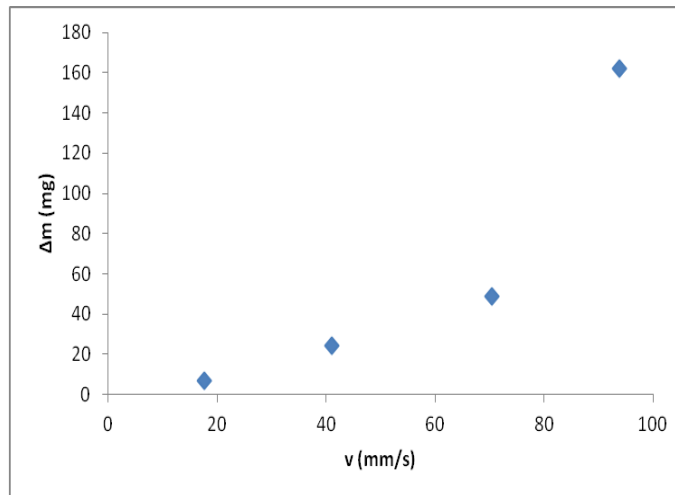


Figure IV.16 : variation de la perte de masse en fonction de la vitesse de glissement

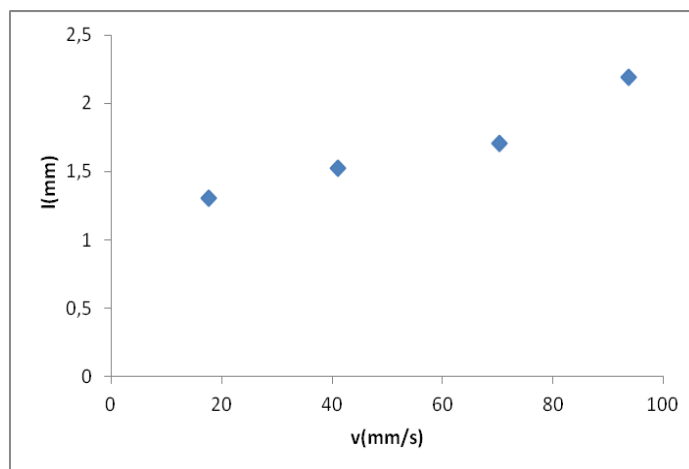


Figure IV.17 : Variation de la largeur des pistes en fonction de la vitesse de glissement

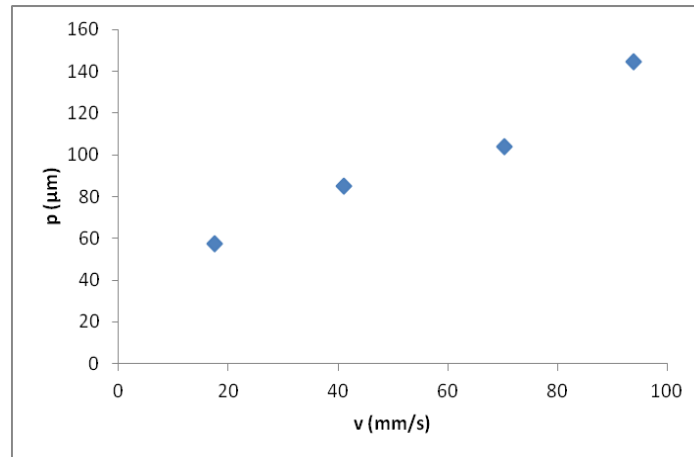


Figure IV.18 : Variation de la profondeur des pistes en fonction de la vitesse de glissement

2.3.4 Conclusion

Les variations de la perte en masse, la largeur des pistes et la profondeur des pistes, montrent qu'il y a une variation presque linéaire entre ces paramètres et la vitesse de glissement, ce qui implique que la loi d'Archard [ARCH56] est vérifiée et le calcul du coefficient K de la vitesse d'usure est justifié. D'après le tableau IV.2 le calcul donne une valeur moyenne $K = 7.85 \times 10^{-6}$. Par conséquent, l'usure peut être qualifiée d'usure douce et contrôlée par un mécanisme d'abrasion. Ceci explique le contact instable entre le pion et la couche accompagné des grincements et de glissement par à-coups lors des essais.

2.3.4 Observations métallographiques

A- Etude des pistes d'usure

Des observations au microscope métallographique d'usure sont réalisées en surface (observation de la zone de contact). Les stries d'usure observées sur la piste d'usure indiquent la présence de débris d'usure due très certainement à l'élimination des aspérités par cisaillement ou par déformation plastique, l'observation des pistes d'usure montre la présence, de quelques zones oxydées et de débris d'usure. Les zones oxydées apparaissent sous la forme de fines couches d'oxyde d'épaisseur hétérogène (quelques microns), étalées sur la surface lors du frottement par le pion en alumine (figure IV.19).

B - Etude des débris d'usure

Les débris d'usure recueillis à la fin des essais de frottement ont été observés par microscopie lors de l'arrêt des essais. Les débris d'usure situés autour et dans les pistes

d'usure présentent deux types de morphologies : ils sont soit sous la forme de plaquettes de quelques microns, soit sous la forme de fins débris dont la taille varie ne dépasse pas quelques microns (Figure IV.20).

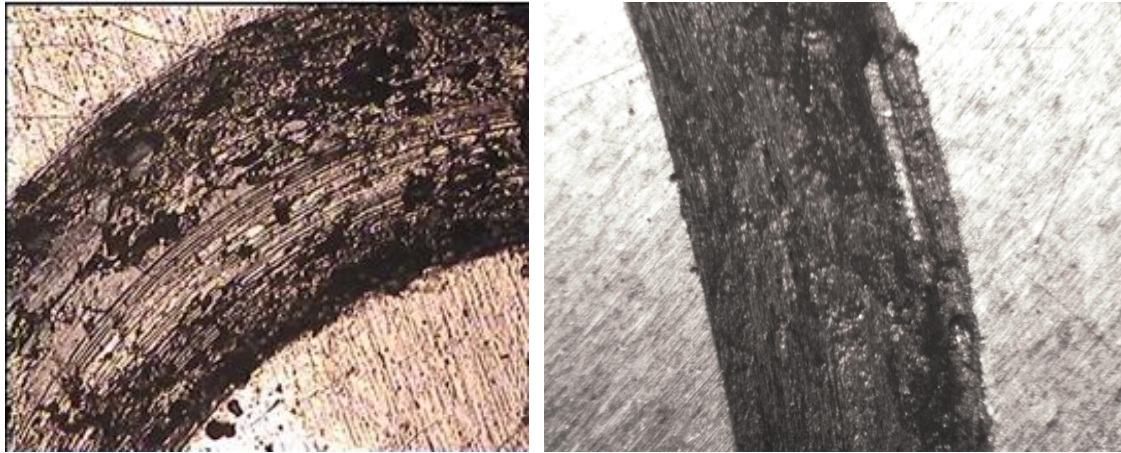


Figure IV.19 : Observation microscopiques des pistes d'usure

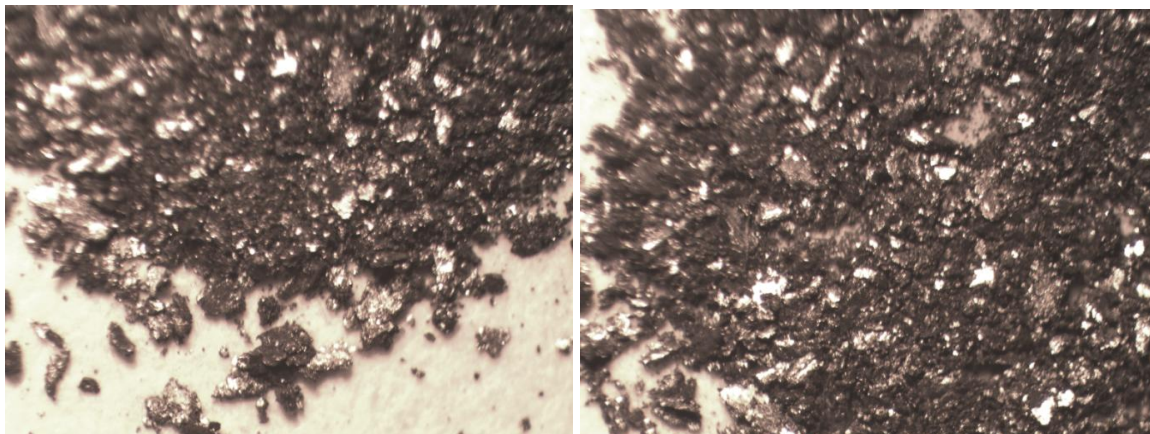


Figure IV.20 : Observation microscopiques des débris

2.3.5 Etude du profil de dureté

Etant une couche ductile, nous avons voulu vérifier l'éventuel durcissement de la couche en dessous de la piste. A cet effet, nous avons suivi le profil de dureté à partir du fond de piste. Le tableau VI.6 donne la variation de la dureté en fonction de la profondeur en dessous de la piste des différentes pistes réalisées. La figure IV.21 présente le profil de dureté à partir du fond des pistes d'usure. On montre effet que la dureté s'élève au fond de la piste puis diminue graduellement en se dirigeant vers le cœur de la couche déposée où le matériau est sein ($H_v=180$). Ceci prouve l'existence d'un durcissement dû vraisemblablement à un

écrouissage de la couche en dessous de la piste. Cet écrouissage peut être provoqué par le matage causé par le passage cyclique du pion.

Tableau VI.6 : Dureté pour différentes profondeurs à partir du fond de pistes d'usure

Profondeur (μm)	Hv			
	Piste 1 R=3mm	Piste 2 R=7mm	Piste 3 R=12mm	Piste 4 R=16mm
16				255
40				239
80	221		200	215
110		172	184	
150	207			
175		190		
275	181		202	
340		190		

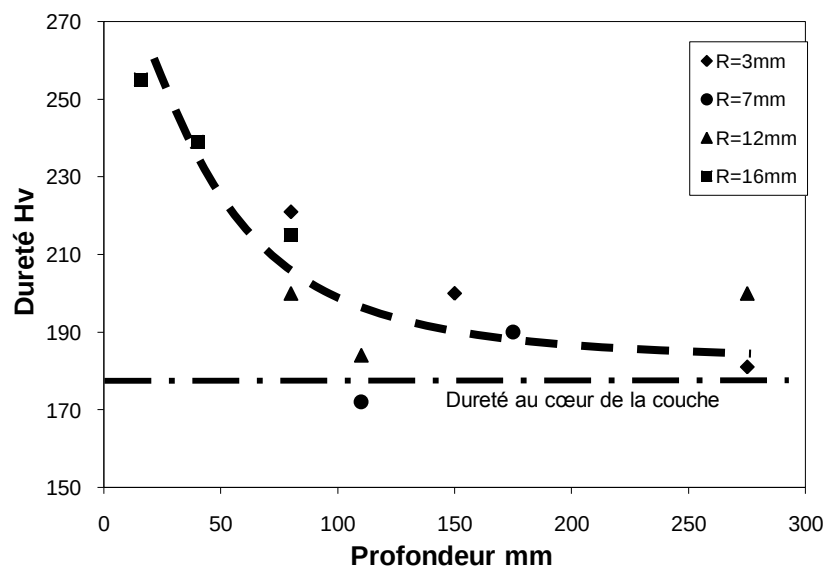


Figure IV.21 : Profil de dureté à partir du fond des pistes d'usure

Conclusion générale

Le travail entrepris dans ce mémoire consiste à étudier principalement la tenue à l'usure de deux aciers ordinaires, l'un revêtu par plasma d'une couche d'alumine et l'autre d'une couche composite alumine et oxyde de titane. Cette étude a été accompagnée d'une étude comparative avec un alliage d'aluminium revêtu aussi d'une couche d'acier austénitique par déposition plasma. La procédure expérimentale suivie dans cette étude s'est déroulée de la manière suivante :

- caractérisation du substrat,
- caractérisation des couches,
- étude comparative.

Cette caractérisation a été effectuée par des observations métallographiques, essais de dureté et essais d'usure, dont l'étude de cette dernière représente le travail principal de ce mémoire.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

Les couches déposées par plasma présentent des hétérogénéités intenses de leurs structures suite à la composition initiales des poudres déposées ou aux conditions expérimentales de déposition.

L'amélioration apportée par la déposition plasma concerne en premier lieu l'augmentation de la dureté. On a signalé que la dureté de la couche de composite est de 1100Hv. Cependant, la couche renferme des défauts vulnérables à l'usure dans les conditions sévères. Les couches d'alumine ou la composite céramique n'ont pas une bonne tenue à l'usure dans les conditions présentes de déposition ou d'essais. Leurs coefficients d'usure est très proches de celui du substrat. Ainsi, on peut dire que cette déposition n'a pas amélioré la tenue à l'usure de l'acier. Le détachement des débris s'est effectué par effritement de la couche.

Les mesures prises montrent que cette usure n'est pas profondément influencée par la vitesse de glissement malgré la relation établie entre la perte de masse ou la largeur des pistes en fonction de la vitesse de glissement.

Les observations métallographiques montrent que le substrat a été rapidement atteint. Ce qui confirme les constatations relevées ci-dessus d'une part et d'autre part l'adhérence des couches à l'acier n'est pas parfait. Les micrographies montrent des décohésions clairement apparentes entre le substrat et les couches.

A partir des travaux effectués sur l'alliage d'aluminium revêtu d'acier, on peut avancer les conclusions suivantes :

- Le substrat utilisé est un matériau ductile, sa dureté vickers moyenne est de l'ordre de 100HV et sa tenue à l'usure est très faible. Le coefficient de la vitesse d'usure est de l'ordre de $0.126 \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.
- Les couches déposées par plasma présentent des hétérogénéités intenses de leurs structures suite à la composition initiales des poudres déposées ou aux conditions expérimentales de déposition.
- Les observations métallographiques ont permis de mettre en évidence différentes formes d'endommagement: écrouissage, écoulement plastiques.

Le profil de dureté en fond des pistes a mis en évidence un durcissement par écrouissage dû au passage cyclique du pion sur la couche.

Références bibliographiques

- [ABDE10] H. B. ABDELOUNIS, dynamique et vibroacoustique du contact rugueux: expérimentation et modélisation, thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, 2010
- [ALKH00] A. P. ALKHIMOV, V. F. KOSAREV, S. V. KLINKOV, The Features of Cold Spray Nozzle Design, J. Thermal Spray Technol., 10(2), p. 375-381, 2000
- [AOUN10] S. AOUNALLAH, caractérisation tribologique de deux revêtements : acier inoxydable et alumine sur substrat d'aluminium obtenu par plasma, thèse de Magister, université de SETIF, 2010
- [ARCH56] J. F. ARCHARD, W. HIRST, The wear of metals under unlubricated conditions, Proc. Roy. Soc, Lond.A236(1956) p. 397-410
- [ASTM90] ASTM: Norme G40-90A(1990)
- [AUCI97] O. AUCIELLO, Handbook of Crystal Growth. Vol. A. 1997. 375.
- [AUDI98] S. AUDISIO, M. CAILLET, A. GALERIE et H. MAZILLE, Revêtements et Traitements de Surface, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1998
- [AUDI99] S. AUDISIO, M. CAILLET, A. GALERIE, H. MAZILLE, Revêtement et traitement de surface. Fonctionnalités, durabilité, procédés, Lausanne, Swiss, p489-496,1999
- [BARR99] O. BARRAU, Etude tribologique de revêtement en régulation de turbines, Rapport de stage Turboméca, ENIT, 1999
- [BEAU03] S. BEAUVAIS, Etude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003
- [BENG07] N. KHANAFI-BENGHALEM, Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4 (Etude comparative), thèse de doctorat, université de SETIF, 2007
- [BERT90] Y. BERTHIER, Experimental evidence for friction and wear modelling, Wear 139, p. 77-92, 1990
- [BOWD50] F. P. BOWDEN, D. TABOR, The Friction and Lubrication of Solids I, Clarendon Press, Oxford 1950
- [BOWD64] F.P. BOWDEN, D. TABOR, The Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford, 1964
- [CAMM05] R. CAMMARATA, surface modification and mechanisms, friction, stress, and reaction engineering (stress in thin films), Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, USA. 2005

- [CART01] M. CARTIER, P. KAPSA, Usure des contacts mécaniques – Eléments de tribologie, Techniques de l'Ingénieur BM5066, p. 1-13, 2001
- [DELQ07] M. DELQUÉ, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma, Ecole des Mines de Paris, 2007
- [DENA01] J.DENAPE, Y.BERTHIER, L.VINCENT, Wear particles life in a Sliding Contact under dry conditions: Third body Approach. Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between Macro, Micro and Nanoscale, Nano Science Series II, volume 10, p. 393-411, 2001
- [DESC02] S. DESCARTES, Y. BERTHIER, Rheology and flows of solid third bodies: background and application to a MoS 1.6 coating, Wear 252, p. 546-556, 2002
- [DIJK87] D. DIJKKAMP, et AL., Preparation of Y-Ba-Cu oxide superconductor thin films using pulsed laser evaporation from high Tc bulk material. Applied Physics Letters. 51(8): p. 619-621, 1987
- [DOWS79] D. DOWSON, History of Tribology, Longman, New York , 1979
- [ESER78] E. ESER, R.E. OGILVIE, K.A. TAYLOR, J.VAC, Sci Technol, 15(1978)396
- [FAUC04] P. FAUCHAIS, Understanding plasma spraying, Journal of Physics D: Applied Physics 37, p. R86-R108, 2004
- [FELD89] E. FELDER, Thermique du contact” cycle de cours, Groupe surface et tribologie CEMEF Sophia Antipolis (1989)
- [FRED93] E. FREDRIKSSON AND J.-O. CARLSSON, Chemical vapour deposition of aluminium oxides from various gas mixtures, Journal of Chemical Vapor Deposition, vol.1, p. 333-417, 1993
- [FREN01] J. FRENE, La tribologie de l'antiquité à nos jours, Mécanique et Industrie, Vol. 2, p.263-282, 2001
- [GODE90] M.GODET, L.VINCENT, Propriétés tribologiques–Frottement–Usure, Pratique des Matériaux Industriels, Chapitre 2.2.4, 1990
- [GOU104] M. GOUIDER, Tribologie des composites Carbone/Carbone : Echelles et contributions de la mécanique et de la physico-chimie, Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004
- [GRIL99] A. GRILL, « Diamond-like carbon: state of the art », Diamond Relat. Mater. p 428-434.1999.
- [HANS03] J. HANS MATHIEU, E. BERGMANN, R. GRAS, Traité des Matériaux :Analyse et technologie des surfaces, couches minces et tribologie, presses polytechnique et universitaires Romandes.Vol 4, 2003, p. 357-360

- [HERM88] H. HERMAN, Les revêtements par projection plasma , Pour la Science 133, p 48-55, 1988
- [HIDA03] H. HIDALGO, Dépôt chimique en phase vapeur de couches minces d'alumine dans une post-décharge micro-onde, thèse de doctorat, Université de Limoges, 2003
- [ISRA92] J. ISRAELACHVILI, Adhesion, friction and lubrication of molecularly smooth surfaces, Fundamental of friction, Ed. Singer and Pollock, NATO ASI, sér. E, vol. 220, Kiever, 1992
- [JIAN92] Y. M. JIANG, pulvérisation cathodique assisté par ordinateur, thèse de doctorat, Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, 1992
- [JOHA89] S. Johansson, F Ericson, and J-Å Schweitz. Influence of surface coatings on elasticity, residual stresses, and fracture properties of silicon microelements. J. Appl. Phys., 65(1): 122-128, January 1989.
- [KADY96] E. KADYROV, Gas-particle interaction in detonation spraying systems, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 5, No 2, 1996, p. 185-195
- [KAPS01] P. KAPSA, M. CARTIER, Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure, Techniques de l'Ingénieur BM5067, p. 1-13, 2001
- [KREY89] H. KREYE, Characteristics of coatings produced by high velocity flame spraying, P 24.1-24.9, 12th International Thermal Spraying Conference, London, 4-9 June, 1989
- [MEND03] C. MENDEBIDE, caractérisation de revêtement PVD nanostructurés à base de nitrures de métaux de transition pour application mécanique, thèse de doctorat, l'institut national des Sciences Appliquées de Lyon, 2003
- [NOUA09] R. NOUAILLETAS, Modélisation hybride, identification, commande et estimation d'états de système soumis à des frottements secs – Application à un embrayage robotisé, thèse de doctorat, Grenoble INP, 2009
- [NOUR04] S. NOUROUZI, "Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive", thèse de l'Université de Limoges, 2004
- [OECD69] OECD, Glossary of terms and definition in the field of friction, Organisation for economic cooperation and development (1969)
- [PAWL 95] L. PAWLOWSKI, The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings, John Wiley and Sons, Chichester, 1995
- [PRON99] A. PRONER, Revêtements par Projection Thermique, (éd.) Techniques de l'Ingénieur, M 1645, p. 1-20, 1999

- [RABI65] RABINOWICZ.E, friction and wear of materials, John Wiley and sons Inc.,) New York - London – Sydney (1965)
- [SAMP98] E. R. SAMPSON, Cored wire application using electric arc spray, p 133-137 of Thermal Spray Meeting the Challenges of the 21st Century, Pub. ASM international, Materials Park, OH-USA, 1998
- [SÁNC05] F. SÁNCHEZ, U. LÜDERS, G. HERRANZ, I.C. INFANTE, J. FONTCUBERTA, M.V. GARCIA-CUENCA, C. FERRATER, M. Varela, Self-organization in complex oxide thin films: from 2D to OD nanostructures of SrRuO₃ and CoCr₂O₄, Nanotechnology 16 (2005) S190
- [SHEN95] Y-L Shen and S Suresh. Thermal cycling and stress relaxation response of si-al and si-al SiO₂ layered thin films. Acta Metall. Mater., 43(11) :3915–3926, 1995.
- [SMIT74] C.W. SMITH, The basic principles of flame spraying. Science and Technology of Surface Coating, 1974, pp 262-270
- [SOKO09] D. E. SOKOLOV, Contribution au développement de la projection thermique à très faible pression, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort, 2009
- [ŞOVA06] M. Magdalena ŞOVAR, Du tri-isopropoxyde aux oxydes d'aluminium par dépôt chimique en phase vapeur : procédé, composition et propriétés des revêtements obtenus, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [SYED04] A.A SYED, Co-projection d'alumine et d'acier inoxydable par plasma d'arc, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2004
- [TAYL77] K. A. TAYLOR, thin solid films, 40 (1977) 189.
- [VENK02] N. VENKATRAMANI, Industrial plasma torch and application, Current Sciences, 83 (3), p 254-262, 2002
- [VOSS78] J. L. VOSSSEN, K. WERNER, Thin film processes, Academic Press, 1978 ed, W.K. edited by John L. Vossen, New York, 1978
- [ZAMB98] G. ZAMBELLI, L. VINCENT, Matériaux et contacts, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998

Résumé

Le travail entrepris dans ce mémoire consiste à étudier principalement la tenue à l'usure de deux aciers ordinaires, l'un revêtu par plasma d'une couche d'alumine et l'autre d'une couche composite alumine et oxyde de titane. Cette étude a été accompagnée d'une étude comparative avec un alliage d'aluminium revêtu aussi d'une couche d'acier austénitique par déposition plasma.

Après caractérisation du substrat, où on a montré que ce matériau possède une bonne ductilité du cœur, sa tenue à l'usure est très médiocre. L'amélioration apportée par la déposition plasma concerne en premier lieu l'augmentation de la dureté. Les couches d'alumine ou la composite céramique n'ont pas une bonne tenue à l'usure dans les conditions présentes de déposition ou d'essais. Leurs coefficients d'usure est très proches de celui du substrat. Le détachement des débris s'est effectué par effritement de la couche.

D'autre part, L'amélioration des propriétés de surface d'alliage d'aluminium par la déposition plasma a été clairement prouvée. En effet, la couche d'acier a conduit à une augmentation de la dureté, et une réduction importante de l'usure. On a montré que l'usure est douce et contrôlée par un mécanisme d'abrasion.

Le profil de dureté en fond des pistes a mis en évidence un durcissement par écrouissage dû au passage cyclique du pion sur la couche.

Mots Clés

Revêtement, Usure, Tribologie, Frottement, Revêtement dur

الملخص

العمل المنجز في هذه المذكرة هو دراسة مقاومة التآكل للفولاذ المغطى بطبقة من أكسيد الألومنيوم وطبقة من مركب من الألومينا والتيتانيوم. ورافق هذه الدراسة دراسة مقارنة مع سبيكة الألومنيوم المطلي بطبقة من الفولاذ الأوستنيتي عن طريق البلازما.

بعد الدراسة المقامة على الفولاذ، تبين أن لديه ليونة جيدة، ومقاومة معتبرة للتآكل، التغطية بالبلازما أعطت تحسين كبير للصلادة، في حين لم نلاحظ أي تحسن فيما يخص مقاومة التآكل في ظل الظروف الحالية للتغطية، وهذا راجع إلى الظروف السيئة الطلي.

من ناحية أخرى، فقد تجلّى بوضوح تحسين خصائص السطح لسبائك الألومنيوم المطلية بطبقة من الصلب الأوستنيتي عن طريق البلازما. في الواقع، أدت هذه الطبقة إلى الزيادة في الصلابة، وتحسن كبير في مقاومة التآكل. وقد أظهرت البيانات الخاصة بالصلادة، أن هناك صلابة في أسفل أماكن التآكل وهي تتناقص كلما اتجهنا إلى قلب المعدن.

الكلمات المفتاحية : التآكل، الإحتكاك، ميكرو صلادة، الطلي و التغطية.

Abstract

The work undertaken in this memory consists in studying mainly the behavior with wear of two steels ordinary, one covered by plasma of a layer of alumina and the other of a composite layer titanium alumina and oxide. This study was accompanied by a comparative study with an aluminium alloy also covered with a layer of austenitic steel by deposition plasma.

After characterization of the substrate, where it was shown that this material has a good ductility of the heart, his behavior with wear is very poor. The improvement made by the deposition plasma relates to the increase in hardness initially. The layers of alumina or it composite ceramics do not have a good behavior with wear under the conditions present of deposition or tests. Their coefficient of wear is very close to that of the substrate. The detachment of the remains was carried out by crumbling of the layer.

In addition, the improvement of the properties of aluminium alloy surface by the deposition plasma was clearly proven. Indeed, the layer of steel led to an increase in hardness, and a significant reduction of wear. It was shown that wear soft and is controlled by a mechanism of abrasion.

The profile of hardness in bottom of the tracks highlighted a hardening by work hardening due to the cyclic passage of the pawn on the layer.

Keywords: Coating, Wear, Tribology, Friction, Cover hard