**République Algérienne Démocratique et Populaire**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université ABDERRAHMANE MIRA-Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie mécanique

# Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

**Option : Génie des Matériaux**

## Thème

*Tenue à l'usure d'un revêtement en Alumine obtenu par projection thermique flamme-fil.*

Présenté par :

Mr Ghilas BOUZIDI

Encadré par :

Pr Bradai M.A.

Soutenu devant le jury composé de :

| | |
|---|---|
| Président | Dr Amari Djamel |
| Examinateur | M.C.A Younes Rassim |
| Promoteur | Pr Bradai Mohand Amokrane |

**2020-2021**

# Dédicaces

*Je dédie ce mémoire à :*

*A ceux qui ont tant éveillé la nuit, tant sacrifié de leurs temps pour nous instruire et qui ont su faire face aux difficultés de tous les jours avec vaillance et qui ont pu les surmonter malgré tout et cela dans le seul souci de notre bien être, à vous mes très chers parents Que Dieu Vous Protège.*

*Mes Enseignants de la faculté*

*Génie Mécanique.*

**Ghilas**

# Remerciements

*Toute mon estime et ma respectueuse gratitude vont à Monsieur BRADAI M.A. d'avoir accepté d'être mon promoteur. Ce travail témoigne de sa confiance et de son soutien dans les moments les plus difficiles. Qu'il trouve ici l'expression de ma haute considération et ma profonde reconnaissance.*

*Mes remerciements vont également aux personnels du Hall de technologie pour leurs disponibilités.*

*J'adresse mes plus sincères remerciements au docteur AMARI D. de m'avoir fait l'honneur de présider le jury et d'évaluer ce mémoire.*

*Un merci particulier à Mr BOUKELLOUCHE I. pour sa gentillesse, ses conseils durant toute la période de préparation de ce mémoire et pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à mon cycle de formation et notamment Mr BOUZIDI A. pour son soutien à ma procédure de ma réintégration à l'université et acquérir mon diplôme*

# Tables des Matiéres


I. La projection thermique ..... 2
I.1 Historique ..... 2
I.2 Principe du procédé ..... 3
I.3 Différents types de projection ..... 3
I.3.1 Projection flamme ..... 3
I.3.2 Projection flamme poudre ..... 4
I.3.3 Projection flamme fil ..... 4
I.3.4 Flamme hypersonique ..... 5
I.3.5 Projection au Canon à détonation ..... 5
I.3.6 HVOF ..... 6
I.3.7 Projection par arc électrique entre deux fils ..... 7
I.3.8 Plasma ..... 7
I.4 Différentes techniques de préparation de surfaces ..... 8
I.4.1 Influence de la rugosité ..... 8
I.4.2 Dégraissage ..... 9
I.4.4 Sablage ..... 9
I.4.5 Préchauffage ..... 9
I.5 Construction d'un dépôt ..... 9
I.6 Paramètres de projection influant sur le dépôt ..... 13
I.7 Les céramiques ..... 14
I.7.2 Classification des céramiques ..... 15
I.7.3 Alumine ..... 16
I.7.3.1 Les structures cristallographiques des alumine ..... 17
I.7.4 le titane ..... 17
I.7.4.1 La phase rutile ..... 18
I.7.4.2 La phase brookite ..... 19
I.8 Alumine titane ..... 20
II. Tribologie des surfaces ..... 21
II.1 Généralités ..... 21
II.2 Force et coefficient de frottement ..... 22
II.3 Mécanismes d'usures ..... 23
II.3.1 Paramètres agissant sur le frottement et l'usure ..... 24
II.4 Comportement tribologique des dépôts d'alumine ..... 25
III. Matériau et technique expérimentales ..... 26

III.1 Introduction ..... 26
III.2 Matériaux utilisés ..... 26
III.2.1 Substrat : ..... 26
III.2.2 Élaboration des échantillons ..... 26
III.2.3 Elaboration de revêtements à base d'alumine : ..... 27
III.2.4 Procédé d'élaboration des revêtements par flamme oxyacétylénique : ..... 27
III.2.5 Paramètres utilisés pour la projection thermique ..... 28
III.2.6 Traitement thermique ..... 29
III.3 Technique expérimentale ..... 29
III.3.1 Test d'usure (perte de masse relative) ..... 29
IV. Résultats et discussions ..... 31
IV.1 Introduction ..... 31
IV.2 Perte de masse relative des trois types de dépôts (test d'usure ..... 31
IV.2.1 Résultats des Test d'usure ..... 32
IV.2.2 Discussions des résultats de perte de masse relative : ..... 34
IV.3 Evolution de la température en fonction de la charge ..... 35
IV.4 Taux d'usure en fonction de la charge ..... 35
IV.5 Evolution de la température en fonction du temps ..... 36
IV.6 Observation des traces d'usure ..... 36
IV.6.2 Métallographie des dépôts avant le test d'usure ..... 37
IV.6.2 Echantillon d'alumine (Témoin) V2 ..... 38
IV.6.2 Echantillon d'alumine renforcé V2 ..... 39
Conclusion générale ..... 40
Refferences bibliographiques ..... 42
Annexe ..... 44

# *Liste des figures et tableaux*

# *Liste des figures*

**Figure I.1 :** Représentation schématique de la projection thermique……. 2

**Figure I.2 :** Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre…….. 3

**Figure I.3** : Schéma d'un pistolet flamme fil……... 4

**Figure I.4** : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation……... 5

**Figure I.5** : Principe de fonctionnement de HVOF……. 5

**Figure I.6** : Principe de fonctionnement de projection arc-fil……. 6

**Figure I.7** : Principe de fonctionnement de projection plasma……... 7

**Figure I.8** : Schéma de l'étalement d'une particule sur un substrat en présence d'adsorbats et de condensats [4] ……. 9

**Figure I.9** : Schéma de la taille relative des rugosités par rapport à la taille des particules Projetées [4]……. 10

**Figure I.10** : Schéma de la formation d'un dépôt par projection thermique…….. 10

**Figure I.11** : Microstructure réelle d'un dépôt en surface [5]……. 11

**Figure I.12** : Schéma des différentes zones de contact à l'empilement des lamelles [4]… 11

**Figure I.13** : Micrographie électronique en champ clair de la section d'une barre d'Al(431) oxydée pendant $20 \cdot 10^{3}$ s à 773 K. Nous voyons le substrat Al avec la couche d'oxyde dont une partie est amorphe et l'autre cristallisée en alumine-γ [7]…….. 16

**Figure I.14** : (a) Structure de la phase rutile de TiO2. (Ti en bleu, O en rouge) (b) structure de l'octaèdre constitutif du rutile [9]…… 17
.

**Figure I.15** : (a) Structure de la phase brookite de TiO2. (Ti en rouge, O en bleu). (b) structure de l'octaèdre constitutif de la brookite [10]..... 18

**Figure I.16** : Diagramme des phases du système Al2O3-TiO2 [10]……... 19

**Figure II.1** : Tribomètre à configuration pion / disque……... 21

**Figure II.2** : Tribomètre à configuration pion / disque……... 22

**Figure II.3** : Schéma d'usure par abrasion……. 22

**Figure II.4** : Usure par érosion…… 23

**Figure II.5** : Usure par fatigue…… 23

**Figure II.6** : Usure par corrosion…… 23

**Figure III.1** : Échantillon utilisé pour la projection…… 26
**Figure III.2** : Dispositif de projection flamme cordons…… 27
**Figure IV.1 :** Perte de masse relative en fonction de la charge à V1…….. 31
**Figure IV.1 :** Perte de masse relative en fonction de la charge à V2…….. 32
**Figure IV.3 :** Perte de masse relative en fonction de la charge. ……..... 33
**Figure IV.4 :** Température en fonction de la charge. ……. 34
**Figure IV.5 :** Taux d'usure en fonction de la charge……. 34
**Figure IV.6 :** Température en fonction du temps…… 35
**Figure IV.7 :** Observation des traces d'usures au microscope optique. a) Al2O3 seul b), Al2O3 10 N, c) Al2O3 15 N, d) Al2O3 30 N……. 37
**Figure IV.8 :** Observation des traces d'usures au microscope optique. a) Al2O3 -3%TiO2 polie, b) Al2O3 -3%TiO2 5 N, c) Al2O3 -3%TiO2 10 N, d) Al2O3 -3%TiO2 15 N, e) Al2O3 -3%TiO2 30 N…… 37
**Figure IV.9 :** Observation des traces d'usures au microscope optique., b) Al2O3 -3%TiO2 5 N, c) Al2O3 -3%TiO2 10 N, d) Al2O3 -3%TiO2 15 N, e) Al2O3 -3%TiO2 30 N……. 38

# *Liste des tableaux*


| |
|---|
| **Tableau I.1 :** Caractéristiques de quelques céramiques techniques [5].…….....16 |
| **Tableau I.2 :**Quelques propriétés des différentes phases d'Al2O3 [6]……17 |
| **Tableau III.1** : Analyse du substrat par la fluorescence des rayons X.……....26 |
| **Tableau III.2** : Compositions chimiques des matériaux de projection utilisés…….....27 |
| **Tableau III.3** : paramètres de projection……..28 |

# *Introduction générale*

# Introduction générale :

La projection thermique a débuté en 1910 au travers du Dr. Schoop qui utilisé une flamme comme source de chaleur pour fondre un matériau pulvérulent. Par son principe de base, les matériaux sous forme de poudres ou de fils sont injectés dans une source de chaleur ou ils sont chauffés, accélérés puis déposés sur un substrat pour former un revêtement. Toutes les techniques de projection mettent en œuvre le même principe, sont définis principalement par la source de chaleur utilisée pour l'obtention de la fusion. La diversité des matériaux susceptibles d'être projetés ainsi que la diversité de leurs supports ont permis l'extension des applications à de très nombreux domaines industriels comme la chimie, la médecine, l'électronique, le transport et l'aéronautique.

Les céramiques possèdent d'excellentes propriétés intrinsèques telles que la rigidité diélectrique, le comportement réfractaire et l'inertie chimique. Cette polyvalence permet la sollicitation de ces matériaux dans des environnements extrêmes. Les dépôts en céramiques durs sont des candidats très bons pour les applications anti-usure et anticorrosion. La diversité des revêtements utilisés pour les pièces usées continue de faire l'objet d'une recherche intense sur leur caractérisation tribologique.

Ce travail a pour objectif d'examiner le comportement tribologique de dépôts en céramique à base d'alumine déposé sur un acier à bas carbone non allié d'usage courant de nuance E335, en utilisant le procédé de projection flamme-fil.

Dans le premier chapitre purement théorique, nous présentons : la définition de la projection thermique, Différents types de procédés de projection thermique, les techniques de préparations de surface, la construction du dépôt, les matériaux utilisés lors du dépôt, et les paramètres de projection sur le dépôt.

Le deuxième chapitre est concentré sur la tribologie des surfaces, il contient des généralités sur l'usure, les mécanismes d'usures, les paramètres agissant sur le frottement et l'usure ainsi que le comportement tribologique de l'alumine.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le matériau à revêtir, les techniques expérimentales mises en œuvre pour effectuer le dépôt d'alumine renforcé avec les paramètres de projection flamme fil utilisées ainsi qu'une brève explication du test d'usure.

Dans le quatrième chapitre nous décrivons les résultats expérimentaux des mesures et observations réalisées.

En fin nous présentons une conclusion générale retraçant l'ensemble des résultats importants obtenus.

# *Chapitre I :*

# *Projection thermique*

# I. La projection thermique

## I.1 Historique

La projection thermique [1-2] fait partie des techniques de traitement de surface par voie sèche. Cette technique regroupe un ensemble de procédés utilisés pour réaliser des revêtements épais (quelques dizaines de micromètres à quelques centaines généralement) de nature très variées sur des substrats (pièce à revêtir) tout aussi variés.

Tout commence en 1901, lorsque l'ingénieur suisse Max Ulrich Schoop constate un dépôt de plomb sur un mur laissé par une balle après son impact.si le plomb avait adhéré au mur, c'est grâce à son point bas de fusion (327°C). le plomb pouvait fondre localement lors de l'impact [51-52]. L'énergie cinétique se transforme en énergie thermique au moment de l'impact. Dès lors, Schoop eut l'idée de faire fondre le métal avant de projeter sur les pièces à traiter. Le revêtement de surface par projection thermique était né, plus connu par la suite sous le nom de « métallisation ».

Ayant pour difficulté principale celle de maintenir le métal en fusion lors de l'opération, c'est en 1911 qu'il eut l'idée de remplacer le métal fondu par une poudre métallique, qui en passant au centre d'un chalumeau 'oxyacétylénique' était mise en fusion avant sa projection, la métallisation avait fait une première importante innovation. Une année après, ce même concept s'est vu optimisé en remplaçant la poudre par un fil métallique et l'utilisation du chalumeau comme source d'énergie et d'un métal en poudre a été qualifié et brevetée en 1911 comme « processus pour fondre un matériau dans la zone de chauffage et pour propulser à l'état fondu et/ou ramolli par la chaleur, sur une cible pour y former un enduit ».

L'autre importante innovation du procédé a été proposé par Hermann, celle-ci propose un appareil de chauffage par un arc électrique. Depuis, l'utilisation de l'arc n'ont pas cessé d'évoluer.

En 1912 Schoop remplace la poudre par un fil métallique en créant un véritable pistolet de projection. En 1915, il dépose un brevet sur le principe de la projection par arc électrique entre deux fils. EN 1914 les premières applications industrielles de la métallisation voient le jour, dans le domaine militaire d'abord, puisque cette année rime avec le début de la guerre mondiale (projection d'étain sur la face arrière des obus), puis dans le domaine de l'anticorrosion et de la décoration. Son inventeur reçoit une récompense de mérite en 1915 et de la technologie est mondialement connue depuis sous le nom de « Schoopage ».

C'est après la deuxième guerre mondiale que le domaine d'application de la projection thermique s'est élargi à l'industrie mécanique, puis à l'industrie aéronautique. La combustion a étau départ le procédé le plus développé, marqué par l'apparition du canon à détonation (D-Gun Coatings) brevet par Praxair Surface Technology dans la année 50. La nécessité d'utiliser des matériaux réfractaires, notamment dans le domaine de l'aérospatial, entrainé le développement de nouvelles techniques, en particulier l'utilisation de l'énergie du plasma appelé APS (Atmospheric Plasma Spraying). Dans les année 60, apparurent les premiers pistolets plasma qui permettent de fondre les matériaux plus réfractaire (céramiques, carbure …). Les années 70 montrent le développement de la projection plasma sous faible pression résiduelle. Le premier dépôt a été obtenu par Muehlberger en utilisant la technique baptisée par la suite Vacuum Plasma Spraying (VPS) ou Low Pressure Plasma Spraying (LPPS). Elle permit d'exploiter le procédé pour l'obtention de dépôts métalliques denses sans présence d'oxydes et avec une meilleure adhérence.

Durant les décennies 1980 et 1990, de grands progrès ont été fait avec le développement des techniques HVOF (High Velocity Oxyfuel Flame) et HVAF (High Velocity Air-fuel Flame).En 2006, le marché des dépots céramiques de haute performance, élaborés par projection thermique aux Etats Unis était de 1.3 milliards de dollars et pourrait augmenter en 2018 à 2.5 milliards de dollars. 65 % des dépôts céramiques dits épais (>50µm) ont été obtenus par projection thermique. La plus grande partie de ces revêtements est utilisée pour protéger des pièces de moteurs (environ 64 %), dans les outils de coupe (17 %) et comme protection contre l'usure (14,6 %).

## I.2 Principe du procédé

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

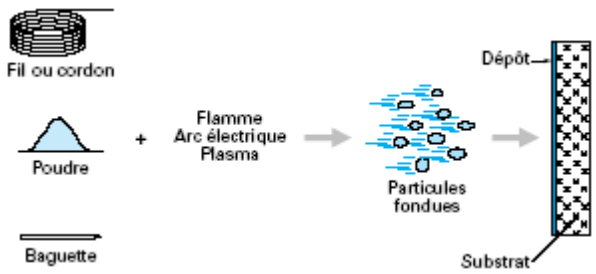



**Figure I.1** : Représentation schématique de la projection thermique.

## I.3 Différents types de projection

### I.3.1 Projection flamme

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

Il existe deux types de projection par flamme qui sont à flamme poudre et fil :

### I.3.2 Projection flamme poudre

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

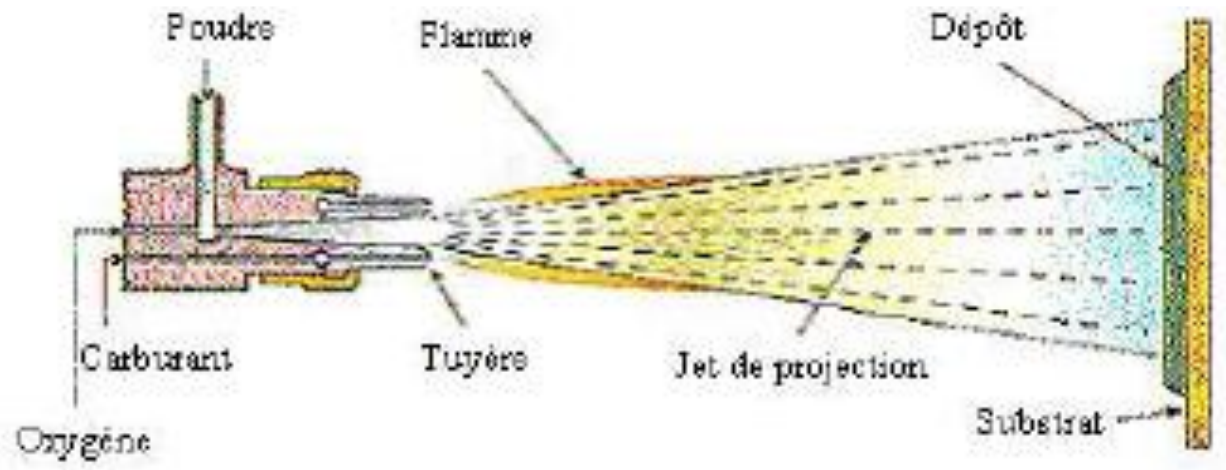



**Figure I.2** : Schéma du principe d'un pistolet flamme poudre.

### I.3.3 Projection flamme fil

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

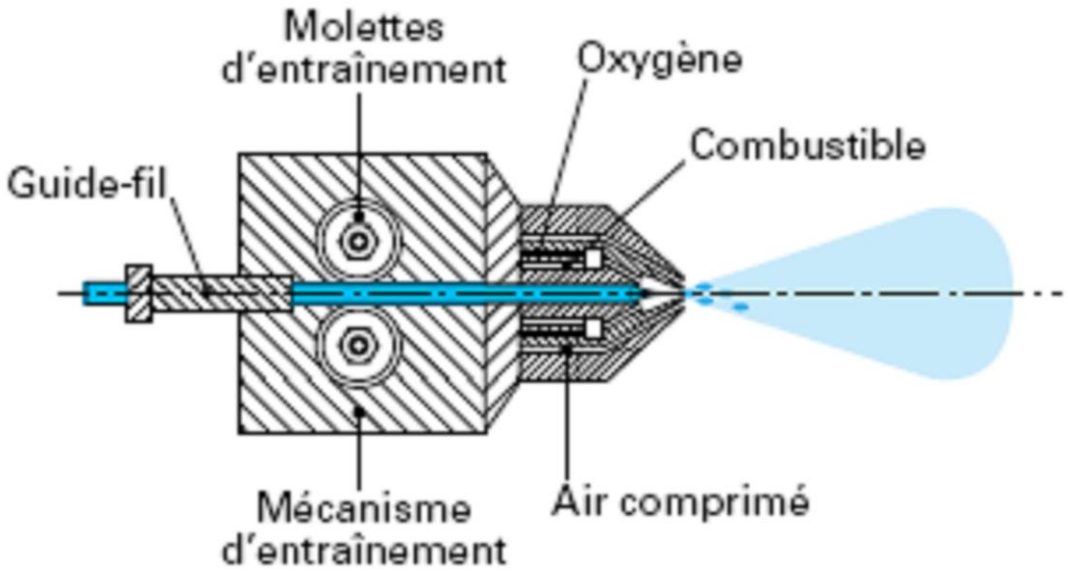



**Figure I.3** : Schéma d'un pistolet flamme fil.

### I.3.4 Flamme hypersonique

Cette projection tient son nom de la vitesse très élevée de sortie des gaz qui se situe entre Mach 1 et Mach 2, et est présentée par de procédés qui sont :
- La projection hypersonique à tir discontinu : canon à détonation.
- La projection hypersonique à tir continu : HVOF (High Velocity Oxy Fuel).

### I.3.5 Projection au Canon à détonation

Dans ce procédé le matériau d'apport, sous forme de poudre, est introduit dans un tube fermé à une extrémité appelé canon à détonation, en même temps que les gaz de combustion (généralement oxygène et acétylène). Ce mélange explose grâce à une étincelle, à la fréquence de 6 à 8 allumages par seconde. La poudre est ainsi chauffée est éjectée à très grande vitesse (950 m/s) par l'onde de choc créée et qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa. Le régime de projection est donc discontinu et entre chaque tir, un balayage avec un gaz neutre est pratiqué. Les dépôts réalisés avec ce procédé possèdent des caractéristiques remarquables telles que la porosité qui est inférieur à 1% et une adhérence qui est souvent supérieur à 80 MPa, à des taux horaires de dépôts de l'ordre de 3 à 5 kg/h.

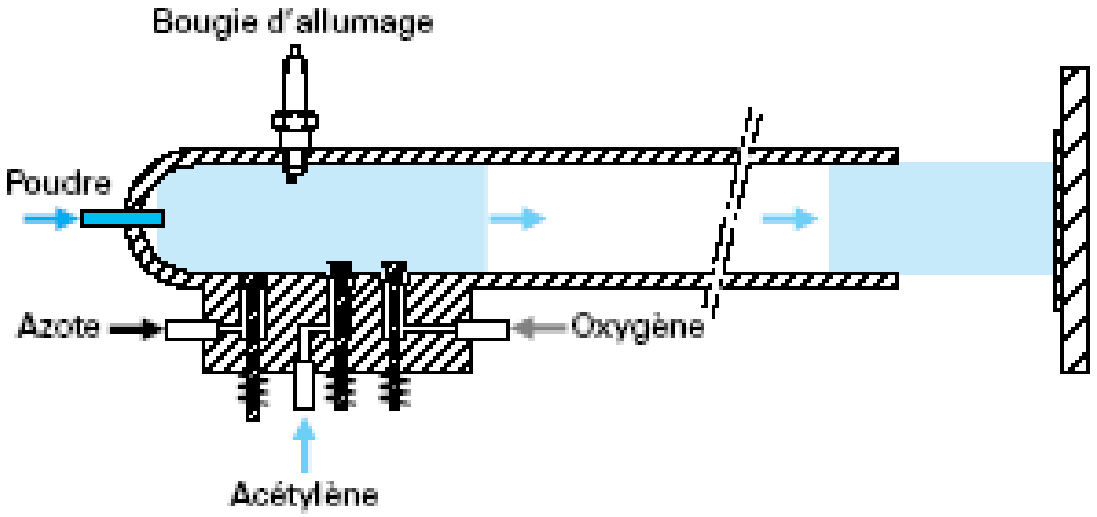



**Figure I.4** : Principe de fonctionnement d'un canon à détonation.

### I.3.6 HVOF

Elle utilise également une torche à flamme mais la géométrie spéciale de la tuyère et l'ajout d'une chambre de combustion (où règne une pression de 5 à 7 bars), suivie d'une tuyère convergente-divergente, permettant d'atteindre des vitesses de gaz supersoniques de 1800 à 2200 m/s et des températures de 2500 à 2800°C. Le matériau à projeter, généralement sous forme de poudre, est injecté à l'aide d'un gaz neutre dans la flamme où il est fondu et accéléré dans la tuyère à une vitesse de 300 – 600 m/s. Les pressions importantes atteintes dans le pistolet n'autorisent pas l'utilisation de l'acétylène comme gaz combustible (risque d'explosion).

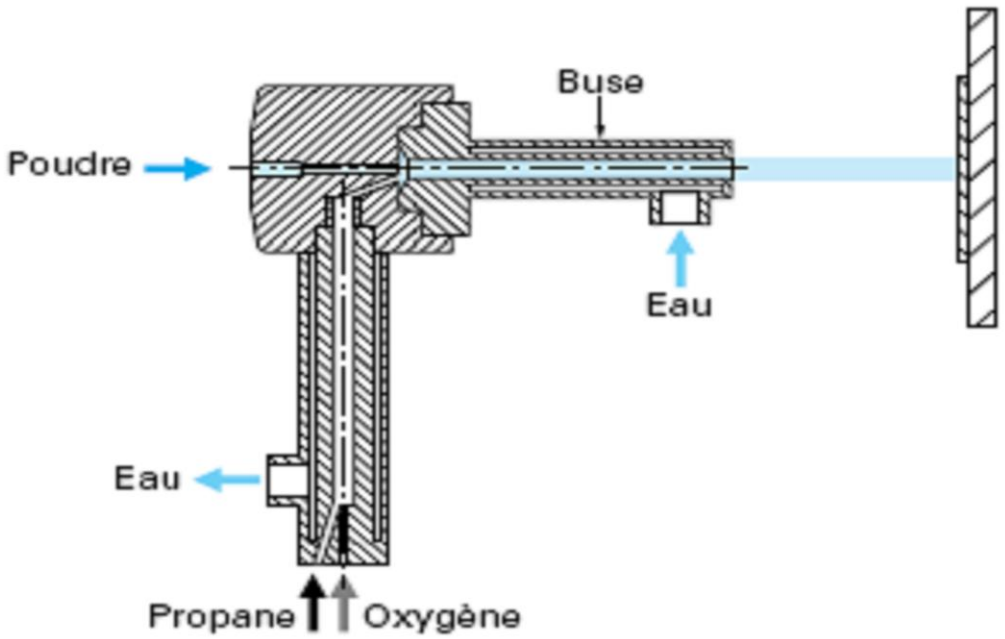



**Figure I.5** : Principe de fonctionnement de HVOF.

### I.3.7 Projection par arc électrique entre deux fils

Cette technique consiste à faire éclater un arc électrique entre deux électrodes sous formes de fils ductiles consommables comme source de chaleur pour fondre le matériau. Celui-ci, réduit à l'état de gouttelettes, est pulvérisé sur le substrat par un jet d'air comprimé. Les pistolets à arc électrique sont alimentés par des générateurs à courant continu avec des tensions d'arc comprises entre 25 et 40 V, pour des intensités de courant allant de 100 à 500 A Ce procédé de projection est simple et économique mais limité aux matériaux conducteurs et tréfilables ; le récent développement des fils fourrés céramiques tend à y remédier.

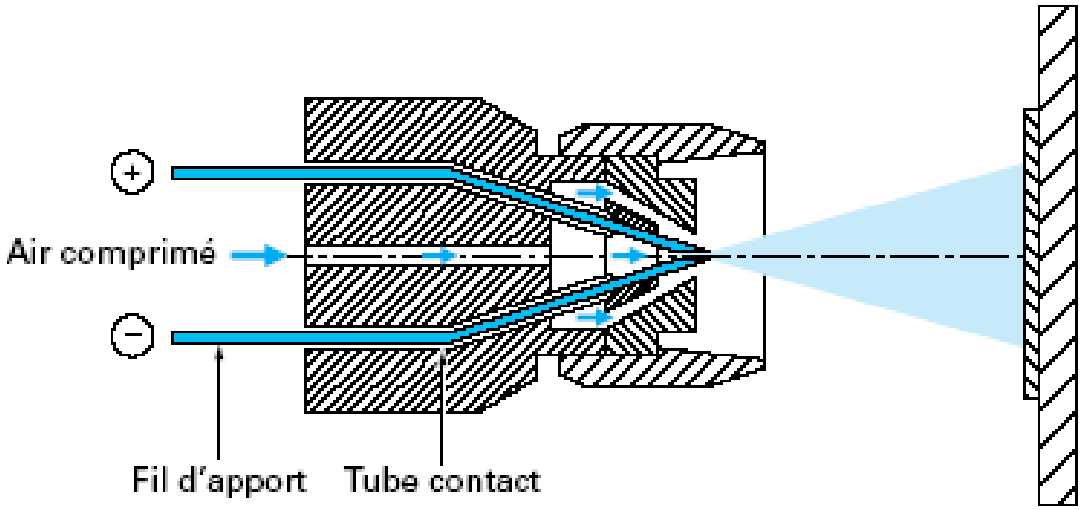



**Figure I.6** : Principe de fonctionnement de projection arc-fil

### I.3.8 Plasma

Le plasma est considéré comme 4ème état de la matière. C'est un gaz ionisé constitué d'une collection des molécules, atomes, ions et électrons dont l'ensemble est électriquement neutre.

La génération de plasma nécessite l'emploi de trois éléments fondamentaux :

-Une source de puissance (générateur à courant continu).
-Une décharge ionisant le gaz (générateur haute fréquence ou haute tension).
-Un couplage assurant le contact entre deux électrodes via le gaz plasma.
C'est cette technique qui a été utilisée pour déposer nos échantillons, elle utilise comme source thermique un arc électrique de forte intensité (plusieurs centaines d'ampères) éclatant entre deux électrodes, dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général. Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (15000 à 20 000 °C), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée de 1000 à 1500 m /s. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur, Généralement de l'argon. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz.

substrat.

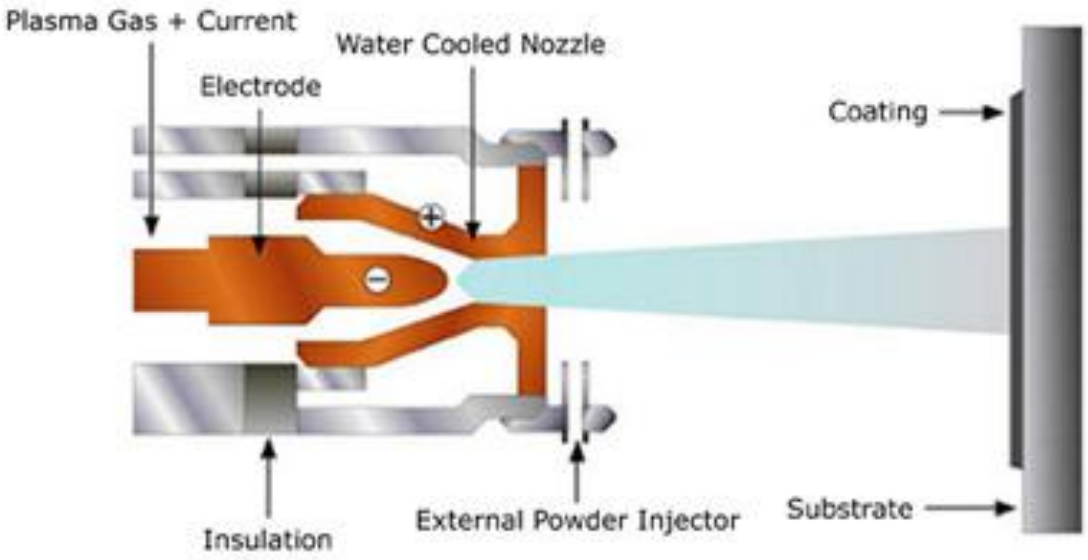



**Figure I.7** : Principe de fonctionnement de projection plasma.

## I.4 Différentes techniques de préparation de surfaces

Les techniques de préparations mécaniques sont les plus utilisées en projection thermique, elles sont également les plus simple à mettre en œuvre tel que le sablage qui est un jet de particules abrasives (grenaillage) qui impactent la pièce à revêtir et l'érodent en augmentant la rugosité. Ce jet abrasif permet également l'élimination des contaminants de surface ainsi que la couche d'oxyde en surface.

### I.4.1 Influence de la rugosité

Pour obtenir une bonne adhérence du dépôt, la propreté est nécessaire, mais pas suffisante. Afin de créer un accrochage mécanique, c'est le cas du sablage, ou par l'enlèvement organisé de matière créant un relief, dans le cas d'un usinage, cela aura pour effet de :

- d'augmenter l'aire de contact entre le substrat et le futur revêtement.
- de créer un maximum d'aspérités ou le matériau déposé viendra s'ancrer.

la rugosité agit directement sur :

- le phénomène d'accrochage mécanique (adhérence).
- l'augmentation du coefficient de frottement.
- la vitesse de formation de l'interface métal-céramique.

### I.4.2 Dégraissage

L'élimination des graisses et poussières incrustées sur le substrat s'effectue soit par dissolution en milieu solvant organique, soit par saponification ou muséification à l'aide d'un tensioactif. Dans la plupart des cas, on aura recours à une élévation de température suffisante pour ramollir la souillure grasse de même un effet mécanique est souvent nécessaire.

### I.4.3 Décapage

Ayant pour but d'éliminer la couches d'oxydes anhydres ou hydratés par dérouillage, les méthodes de décapages sont chimiques, électrochimiques, mécanique ou thermique. Les méthodes chimique et électrochimique utilisent des solutions agressives acides ou alcalines ou encore des oxydants forts.

### I.4.4 Sablage

C'est un traitement par impact, plus généralement appelé grenaillage. La technique employée consiste à utiliser, soit un vecteur gazeux (généralement l'air comprimé), soit une force centrifuge (turbine) pour projeter à grande vitesse des grains (projectiles) qui viennent percuter de façon répétée la surface des pièces (subjectiles). Le grenaillage met en œuvre des projectiles très variés, différentes méthodes de projection et de nombreux paramètres influencent le résultat final.

### I.4.5 Préchauffage

Le préchauffage des substrats métalliques provoque une oxydation en surface qui peut modifier la composition et la morphologie superficielle du substrat, avec d'importantes conséquences en termes d'adhésion des dépôts. Le préchauffage des substrats peut se faire de différentes façons : à l'aide d'un jet plasma, en utilisant un four ou des résistances chauffantes. Au fur et à mesure que la température augmente, différentes compositions et épaisseurs de couches d'oxydes se forment en surface, ce qui induit une réduction de l'adhésion du dépôt.

## I.5 Formation d'un dépôt

Le principe de la formation d'un dépôt par projection thermique est basé sur l'empilement et la solidification de lamelles formées par l'étalement des particules fondues ou semi fondues projetées sur le substrat préalablement préparé. La construction du dépôt est une étape importante de la projection plasma car elle influe directement sur les propriétés du dépôt. La morphologie et la taille des lamelles gouvernent la qualité de la cohésion du dépôt, la microstructure, la taille et la distribution des pores ainsi que les contraintes résiduelles.

L'étalement des particules est directement lié à leur quantité de mouvement et leur état lors de leur impact sur le substrat ainsi qu'à l'état de surface de ce dernier. La température, la vitesse et l'angle d'impact des particules sur le substrat (les meilleurs résultats sont obtenus

lorsque les particules arrivent perpendiculairement au substrat), l'oxydation des particules et le gradient de température dans la particule (particulièrement pour des particules à faible conductivité thermique) d'une part et la rugosité de surface, sa température de préchauffage, l'épaisseur et la composition chimique de la couche d'oxyde protectrice pour les substrats métalliques d'autre part, affectent directement la morphologie, le degrés d'étalement et l'adhérence des particules [3].

La plupart des études sur l'étalement des particules qui impactent sur directement le substrat ont été faites sur des substrats lisses compte tenu des difficultés d'observation sur les substrats rugueux. Au contact de la particule fondue à haute température, des adsorbats et des condensats s'évaporent très rapidement (en quelques centaines de nanosecondes) de la surface du substrat, entrainant une augmentation de la pression sous la particule qui s'étale, diminuant ainsi le contact avec le substrat. Les extrémités de la lamelle s'en trouvent soulevées. Dans la zone centrale, la pression d'impact est la plus forte et peut contrebalancer la pression de la vapeur. On peut observer quelques points de contact entre la lamelle et le substrat [37].

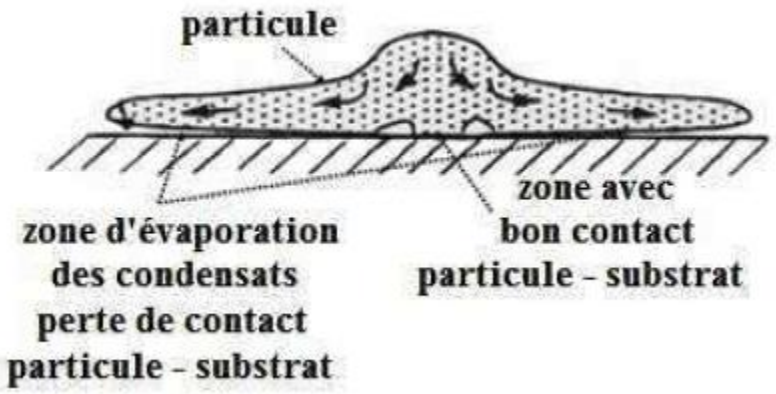



**Figure I.8** : Schéma de l'étalement d'une particule sur un substrat en présence D'adsorbats et de condensats [4].

Par ailleurs, l'étalement des particules fondues dépend de la mouillabilité de la surface de contact (le substrat ou les lamelles formées antérieurement) où la rugosité, la couche protectrice d'oxyde et la conductivité thermique sont déterminants. Les substrats avec des rugosités importantes présentent une meilleure mouillabilité car ces dernières empêchent la formation d'éclaboussures et de ce fait le degré d'étalement des lamelles est plus faible que celui des lamelles sur un substrat du même matériau avec une surface lisse. Pour cette raison la rugosité doit être adaptée à la taille des particules projetés [4]. Généralement pour avoir une bonne adhésion, la dimension de la lamelle doit être entre 1,5 et 3 fois la valeur du paramètre de rugosité. Si la lamelle est très petite (cas de la Figure 4-b) ou très grande par rapport à la rugosité, l'adhésion est réduite.

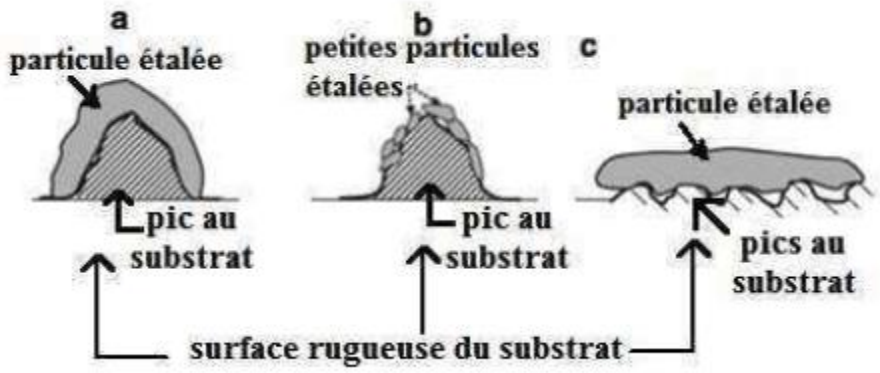



**Figure I.9** : Schéma de la taille relative des rugosités par rapport à la taille des particules Projetées [4].

La composition, l'épaisseur et la morphologie de la couche d'oxyde protectrice du substrat déterminent sa température de préchauffage et aussi sa mouillabilité. Les substrats avec une haute conductivité thermique présente une mouillabilité réduite car des taux importants de transfert de chaleur vers l'intérieur du substrat réduisent la température à la surface où les particules fondues vont s'étaler. Dans le cas de la formation des lamelles sur d'autres lamelles préalablement formées, la mouillabilité est favorisée car les matériaux liquides ont la caractéristique de bien s'étaler sur des solides de même composition.

La qualité du contact à l'interface entre les particules étalées et le substrat est fonction de la pression d'impact qui dépend de la vitesse à laquelle les particules impactent le substrat : des hautes vitesses correspondent à des hautes pressions et donc des lamelles minces qui se solidifient plus rapidement. Le temps d'étalement est entre 5 et 10 fois plus important que le temps de solidification des lamelles car généralement la solidification débute avant que l'étalement soit fini. Le temps entre deux impacts successifs est de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes de telle manière qu'une particule impacte sur une autre déjà solidifiée.

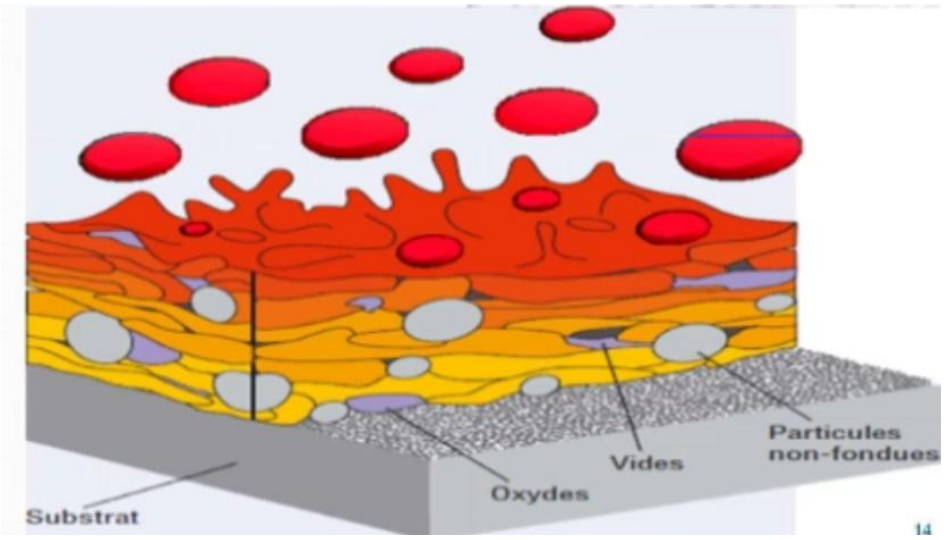



**Figure I.10** : Schéma de la formation d'un dépôt par projection thermique.

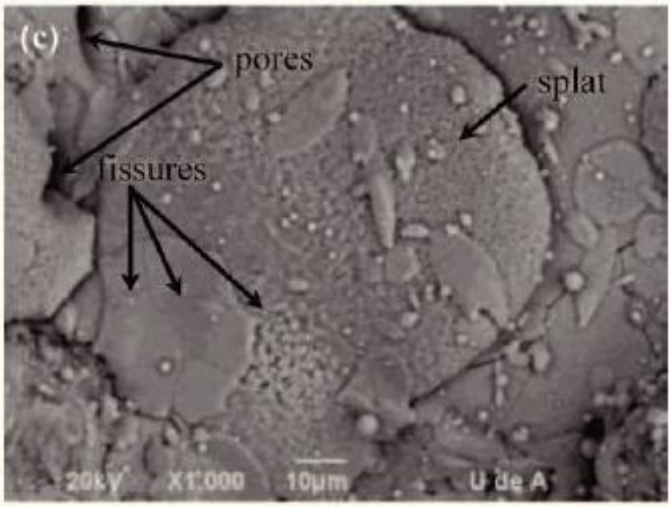



**Figure I.11** : Microstructure réelle d'un dépôt en surface [5].

L'empilement de lamelles entraines des zones avec des contacts à l'intérieur du dépôt. Or les interfaces entres les lamelles détermine les propriétés du revêtement. Entre les lamelles empilées ou entre les premières couches du dépôt se forment des pores inter lamellaires.

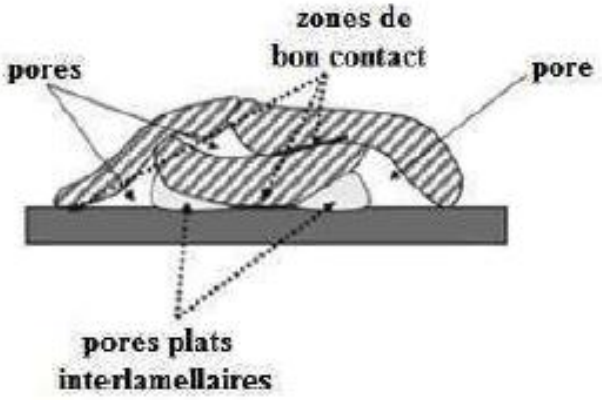



**Figure I.12** : Schéma des différentes zones de contact à l'empilement des lamelles [4].

Les pores se forment par l'effet d'ombre, dans les interstices entre les lamelles remplis de gaz, par les particules partiellement fondues ou non fondues ou par des particules qui ont explosé. Ils sont distribués uniformément dans le dépôt et ont une tendance à diminuer les propriétés de ce dernier proportionnellement à leurs tailles.

Il est également possible d'observer dans la microstructure typique des dépôts élaborés par projection thermique la présence de fissures que se forment lors de la relaxation des contraintes. Les lamelles peuvent présenter des microfissures produites par la relaxation des contraintes de trempe et des microfissures, orientées parallèlement aux lamelles, produites par

la différence des coefficients de dilatation entre les particules et le substrat ce qui initie l'interconnexion des pores.

Malgré la formation des fissures dans la microstructure, ce qui allège les contraintes, elles peuvent partialement rester dans l'état final des contraintes du revêtement et dégrader ses propriétés mécaniques (dureté, module d'Young, ténacité à la fracture, etc.) selon que le dépôt reste sous des contraintes de traction après la projection. L'origine de telles contraintes peut se trouver dans la vitesse de refroidissement des particules lors de la projection, elles sont connues comme contraintes de trempe et portent le dépôt en traction. Les différences de coefficients de dilatation entre les particules projetées et le substrat apportent également des contraintes généralement en traction tout comme les transformations des phases qui peuvent avoir lieu lors du chauffage des particules pendant la projection et les solidifie sous des phases différentes de celles du matériau de départ. Par contre, dans des techniques de projection où les particules sont projetées à haute vitesse, telles que le D-Gun ou la HVOF. Des contraintes associées à l'impact des particules sur le substrat introduisent des contraintes en compression et agissent en faveur de l'adhérence du dépôt au substrat [4].

## I.6 Paramètres de projection influant sur le dépôt

- Débit des gaz : un excès d'oxygène (flamme oxydante) augmente l'oxydation du dépôt, donc ça durcit et réduit sa résistance mécanique. Le dépôt devient fragile et devient difficile à usiner. Un excès du taux d'acétylène (flamme carburante) entraine un charbonnage du revêtement. Dans les deux cas, on note l'usure prématurée des buses.

- pression des gaz : une pression trop forte des gaz augmente les pertes de métal donc toutes les consommations (Dissipation d'énergie).

- diamètre du fil ou du cordon : Un diamètre de fil plus grand augmente le grain du dépôt et les pertes.

- Vitesse du fil : Trop grande, elle augmente la cadence et la grosseur du grain, trop faible, elle augmente l'oxydation du dépôt.

- Pression de l'air : (air comprimé vecteur de la projection). Son accroissement diminue la grosseur du grain mais augmente l'oxydation du dépôt.

- Distance de projection : Trop faible, elle crée des turbulences, des pertes et des défauts d'adhérence et surchauffe du dépôt. Trop grande, elle augmente le refroidissement des grains et entraine une mauvaise adhérence.

- Angle de projection : En principe perpendiculaire, la projection oblique augmente les pertes et diminue l'adhérence.

- Vitesse de balayage : Trop rapide, elle augmente les pertes de métal et donne des épaisseurs de dépôt trop mince. Trop lente, elle donne des épaisseurs de dépôt irrégulières et élève la température du support.

- Vitesse de rotation : trop rapide, elle entraine un rebondissement des particules et une pollution du dépôt. Trop lente, elle entraine une surchauffe du dépôt et une couche trop épaisse du revêtement.

-Refroidissement : Trop rapide, il génère le délaminage des couches. Trop lent, il entraine une surchauffe et donc une augmentation de l'oxydation du dépôt.

## I.7 Les céramiques

### I.7.1 introduction

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue, la phase continue est appelée matrice. La phase discontinue souvent plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures est appelée renfort.

Les premiers matériaux composites sont apparus au cours de la Seconde Guerre mondiale. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la fatigue), mais aussi grâce à leurs propriétés chimiques (résistance à la corrosion).

Les céramiques sont des matériaux inorganiques et non métalliques. Elles sont les matières premières les plus abondantes de la croûte terrestre et les matériaux les plus anciens utilisés par l'homme. Pour citer des céramiques classiques : l'argile, la tuile, la porcelaine et le verre, ainsi que les céramiques techniques modernes : carbures, borures, oxydes, nitrures. Ils obtiennent leurs propriétés pendant le processus de frittage à haute température.

La nature des liaisons ioniques et covalentes des céramiques en fait des matériaux non aptes à se déformer plastiquement, à l'inverse des métaux, il n'y a pas de plans de glissements indépendant. Cela en fait des matériaux d'une dureté supérieure aux métaux mais très fragiles. Les propriétés mécaniques des différentes céramiques sont dépendantes de leur composition, de leur structure ainsi que des défauts contenus dans le matériau.

## I.7.2 Classification des céramiques

Selon la nature chimique :

Cette approche a pour importance la nature des liaisons, ainsi les éléments légers (C, Si, Ge, Sn, Pb) forment des liaisons covalentes. Les carbures et les nitrures des métaux de transition (température de fusion très élevées) sont durs et sont souvent utilisées comme brasifs. Les oxydes ont tendances sont de stable composés et forment des liaisons ioniques.

Selon les propriétés physiques :

S'intéressant principalement à la structure électronique et leurs propriétés de conduction, donc l'on a les isolants, les conducteurs et les semi-conducteurs.

Propriétés générales des céramiques :

Liaisons chimiques : covalentes, ioniques et peuvent être mixtes.

Structures cristallographiques : sont complexes et dépendent des liaisons.

Propriétés mécaniques : sont généralement fragiles, possèdent des grandes valeurs de coefficients d'élasticité en comparaisons avec les métaux.

Température de fusion : les céramiques possèdent une température de fusion très élevée qui peut dépasser 2000°C à cause de leurs liaisons chimiques qui sont fortes.

Conductibilité thermiques : les céramiques sont des isolants thermiques à cause de l'absence totale des électrons libres.

Propriétés électroniques : isolants, semi-conducteurs et conducteurs mais la plupart des céramiques sont des isolants et leurs conductivités restent faibles.

Propriétés optiques : opaques ou transparents applications telles que pigments de coloration.

| Type de céramique | Masse vol. (Mg/m³) | Temp. de fusion ou de ramoll. (°C) | Conduc. therm. (W/m · K) | Coeff. de dilatation linéaire ($10^{-6}$/K) | Module de Young (GPa) | Résist. à la compr. (MPa) | Module de rupture (MPa) | Ténacité (MPa · $m^{1/2}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Carbone diamant | 3,52 | 3 720 à 3 910 | 600 à 2 200 | 0,8 à 1,2 | 990 à 1 050 | 30 000 à 65 000 | 4 000 à 6 000 | 2,3 à 3,4 |
| Alumine $Al_2O_3$ | 3,9 | 2 050 à 2 060 | 24 à 35 | 8 à 8,9 | 330 à 400 | 1 750 à 3 000 | 350 à 580 | 3,5 à 4,5 |
| Zircone $ZrO_2$ | 5,6 | 2 680 à 2 710 | 2 à 12 | 7 à 9 | 180 à 240 | 1 650 à 3 600 | 140 à 270 | 2 à 6,9 |
| Carbure de silicium SiC | 3,2 | 2 700 à 2 830 | 90 à 200 | 4,3 à 4,6 | 390 à 440 | 2 000 à 3 500 | 450 à 600 | 3 à 5,1 |
| Nitrure de silicium $Si_3N_4$ | 3,2 | 1 890 à 1 900 | 15 à 43 | 2,6 à 3,3 | 280 à 310 | 11 000 à 15 000 | 480 à 960 | 4 à 5,4 |
| Nitrure de bore BN | 2,1 | 2 900 à 3 100 | 20 à 52 | 1 à 10 | 20 à 100 | 225 à 540 | 30 à 100 | 2,5 à 5 |
| Carbure de titane TiC | 4,9 | 3 170 à 3 250 | 18 à 25 | 6,6 à 7,4 | 420 à 450 | 3 570 à 5 850 | 275 à 450 | 2 à 3 |
| Carbure de tungstène WC | 15,6 | 2 820 à 2 920 | 28 à 88 | 4,5 à 7,1 | 600 à 670 | 6 600 à 10 000 | 510 à 820 | 2 à 3,8 |
| Carbure de bore $B_4C$ | 2,5 | 2 410 à 2 450 | 27 à 36 | 3,5 à 5,6 | 440 à 472 | 1 400 à 3 400 | 600 à 680 | 3,4 à 3,9 |
| Quartz $SiO_2$ | 2,2 | – | 1,4 à 1,5 | 0,48 à 0,52 | 54 | 1 200 | 100 à 110 | 0,6 à 0,8 |
| Sialons $Si_3Al_3O_3N_5$ | 3,25 | 2 480 à 2 540 | 18 à 23 | 3,3 à 3,7 | 265 à 300 | 3 800 à 4 500 | 450 à 600 | 4 à 7,7 |

**Tableau I.1** : Caractéristiques de quelques céramiques techniques [5].

## I.7.3 Alumine

L'alumine, ou oxyde d'aluminium, est une poudre blanche de masse moléculaire 102 très stable. C'est un oxyde réfractaire, car sa température de fusion est très élevée (2054 °C). L'alumine se forme naturellement à l'air à la surface de l'aluminium, mais contrairement à la rouille pour les alliages ferreux, l'alumine forme une couche étanche qui protège l'aluminium de l'oxydation et lui garde son aspect métallique brillant. L'alumine est l'oxyde le plus utilisé dans les céramiques techniques, il est obtenu par extraction du minerai de bauxite avec le procédé bayer.

L'alumine est un composé chimique de formule Al2O3 appelé aussi oxyde d'aluminium. C'est un solide blanc incolore insoluble dans l'eau, l'alumine est utilisée pour sa grande dureté, il est le matériau naturel le plus dure après le diamant et a d'une excellente résistance à l'usure. Les céramiques sont mises en forme par les procédés classiques, puis frittées entre 1400°C et 1700°C.

L'alumine est l'un des plus importantes céramiques, il prend cette importance des variétés de propriétés qu'il possède telle que son haut point de fusion qui atteint 2050°C. Sa dureté, sa résistance à l'usure sont les plus supérieurs parmi les oxydes, il est aussi chimiquement stable et inactif. L'alumine existe en plusieurs phases, les plus importantes sont la phase α, γ, θ et κ. La phase α est thermodynamiquement stable à toutes les températures supérieures à son point de fusion et elle existe sous forme de corindon ou saphir, tandis que les autres phases sont métastables. Cette grande variété dans de phases rend l'alumine très important dans plusieurs applications, par exemple la phase α et κ sont largement utilisés autant que des revêtements résistants à l'usure vue leurs grandes duretés et leurs stabilité thermique.

### I.7.3.1 Les structures cristallographiques des alumine

| Phase | α | θ | γ | κ |
|---|---|---|---|---|
| Densité (kg/m$^3$) | 3980 | 3560 | 3200 | - |
| Gap (ev) | 8.8 | - | - | - |
| Point de fusion (°C) | 2051 | θ ⟶ α 1050 | γ ⟶ δ 700-800 | - |
| Paramètres de maille (A°) | a=4.759 c=12.911 | a=5.64 b=2.92 c=1.17 | a=7.911 | a=9.71 c=17.86 |
| Système cristallin | hexagonal | monoclinique | cubique | hexagonal |

**Tableau I.2** : Quelques propriétés des différentes phases d'Al2O3 [6].

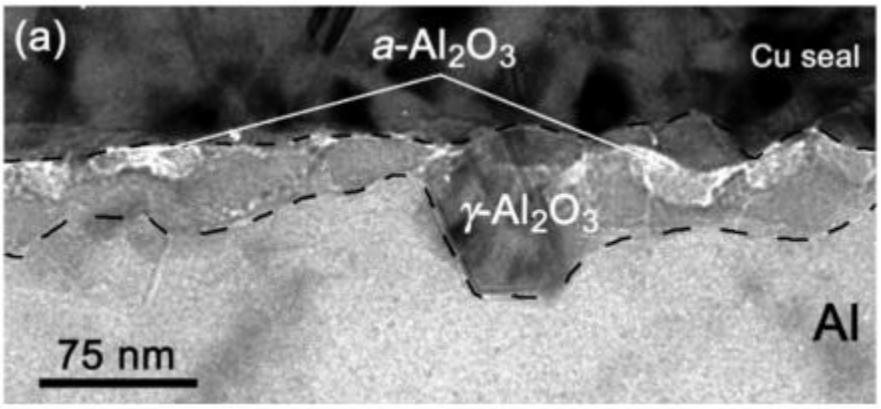



**Figure I.13** : Micrographie électronique en champ clair de la section d'une barre d'Al(431) oxydée pendant $20 \cdot 10^3$ s à 773 K. Nous voyons le substrat Al avec la couche d'oxyde dont une partie est amorphe et l'autre cristallisée en alumine-γ [7].

## I.7.4 le titane

Le dioxyde de titane (TiO2), est caractérisé par ses propriétés de haute dureté, sa ductilité et son adhésion au substrat . Ses applications sont très similaires à celles de l'alumine malgré ses plus faibles dureté, résistance diélectrique et résistance aux attaques chimiques de cette dernière. Les phases les plus souvent utilisées sont le rutile, l'anatase et la brookite qui présentent la même stoechiométrie mais qui ont différentes structures cristallines. L'utilisation du TiO2 la plus fréquente en projection thermique correspond à son mélange avec de l'Al2O3 pour revêtir des éléments que doivent résister à l'usure abrasive, à l'attaque galvanique et à la corrosion à haute température [8].

### I.7.4.1 La phase rutile

La structure TiO2 rutile, dont la maille élémentaire est quadratique, se décrit comme un empilement hexagonal compact d'atomes d'oxygène dont un site octaédrique sur deux est occupé par un ion Ti4+. Dans sa forme stoechiométrique, le réseau de Bravais est tétragonal et contient six atomes par maille. Ses paramètres cristallins sont a = 0,45937 nm et c = 0, 29581 nm. C'est la forme la plus dense du dioxyde de titane, stable à hautes températures et hautes pressions.

.

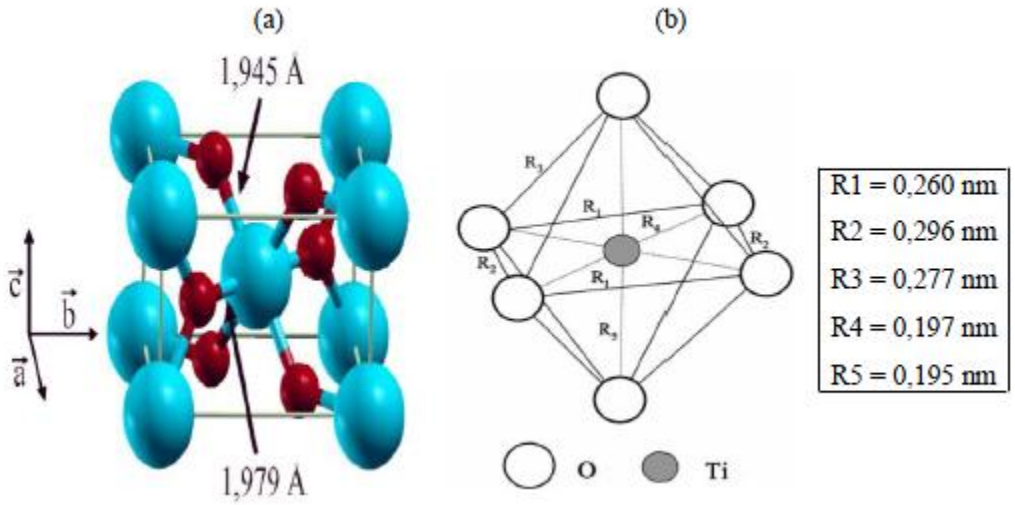



**Figure I.14** : (a) Structure de la phase rutile de TiO2. (Ti en bleu, O en rouge) (b) structure de l'octaèdre constitutif du rutile [9].

Dans cette structure, chaque atome de titane est au centre d'un octaèdre légèrement distordu d'atomes d'oxygène avec quatre liaisons équatoriales Ti-O courtes (1,945 Å) et deux liaisons apicales plus longues (1,979 Å). L'enchaînement de ces octaèdres se fait soit par des arrêtes soit par des sommets. Les atomes d'oxygène sont, quant à eux, tous liés à trois atomes de titane (deux liaisons courtes et une liaison longue).

### I.7.4.2 La phase brookite

La troisième forme cristalline métastable du TiO2 est la brookite de structure orthorhombique (figure I.3); ses paramètres de maille sont : a = 0, 546 nm; b = 0,918 nm ; c= 0,514 nm. La synthèse de la brookite pure est très difficile à réaliser. La plupart des études portant sur la synthèse du TiO2 brookite montrent la présence simultanée des phases de brookite et du rutile et/ou de l'anatase. A hautes températures, à partir de 750 °C, la brookite se transforme en rutile. Elle a une masse volumique ρm = 4.12 g/cm$^3$, intermédiaire entre celle de l'anatase (ρm = 3.89 g/cm$^3$) et du rutile (ρm = 4.25 g/cm$^3$).

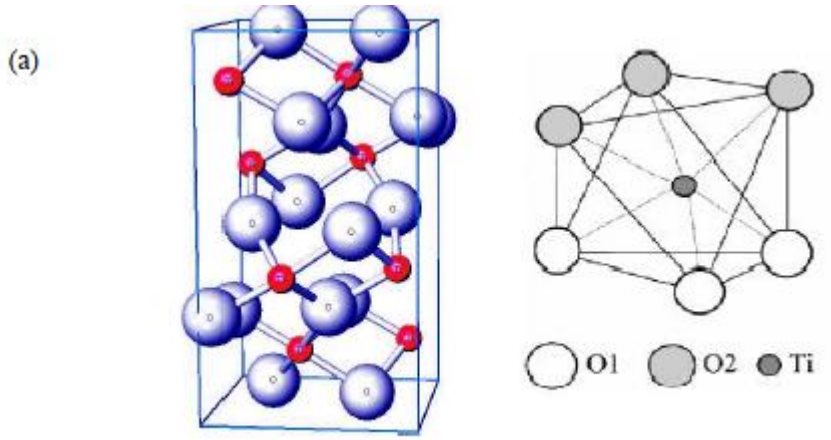



**Figure I.15** : (a) Structure de la phase brookite de TiO2. (Ti en rouge, O en bleu). (b) structure de l'octaèdre constitutif de la brookite [10].

## I.8 Alumine titane

Le mélange de particules d'alumine et d'oxyde de titane est utilisé en projection thermique pour la réalisation de dépôts résistants à l'usure et aux attaques chimiques des acides et des alkalis due à la présence de différentes phases cristallines et de grades de cristallinité. Les transformations de phases du système Al2O3 - TiO2 sont schématisées sur la Figure X [10]. Les compositions les plus utilisées sont :

- Al2O3 – 3wt % TiO2, que permet d'obtenir des dépôts moins fragiles mais avec une faible résistance diélectrique par rapport aux dépôts élaborés avec de l'Al2O3 pure.
- Al2O3 – 13wt % TiO2, qui a une dureté plus faible que les dépôts d'Al2O3 – 3wt % TiO2 du fait de la présence de l'oxyde de titane (car la phase alumine gamma est aussi dans les dépôts purs) mais une meilleure ténacité à la fracture grâce à la contribution des propriétés du TiO2.
- Al2O3 – 45wt % TiO2 est une composition hyper-eutectique que présente une dureté et une résistance à l'usure moindre par rapport aux deux précédentes compositions hypo-eutectiques, dues à la présence des titanates Al2TiO5 et Al6Ti2O13 qui ont de faibles dureté et ténacité.

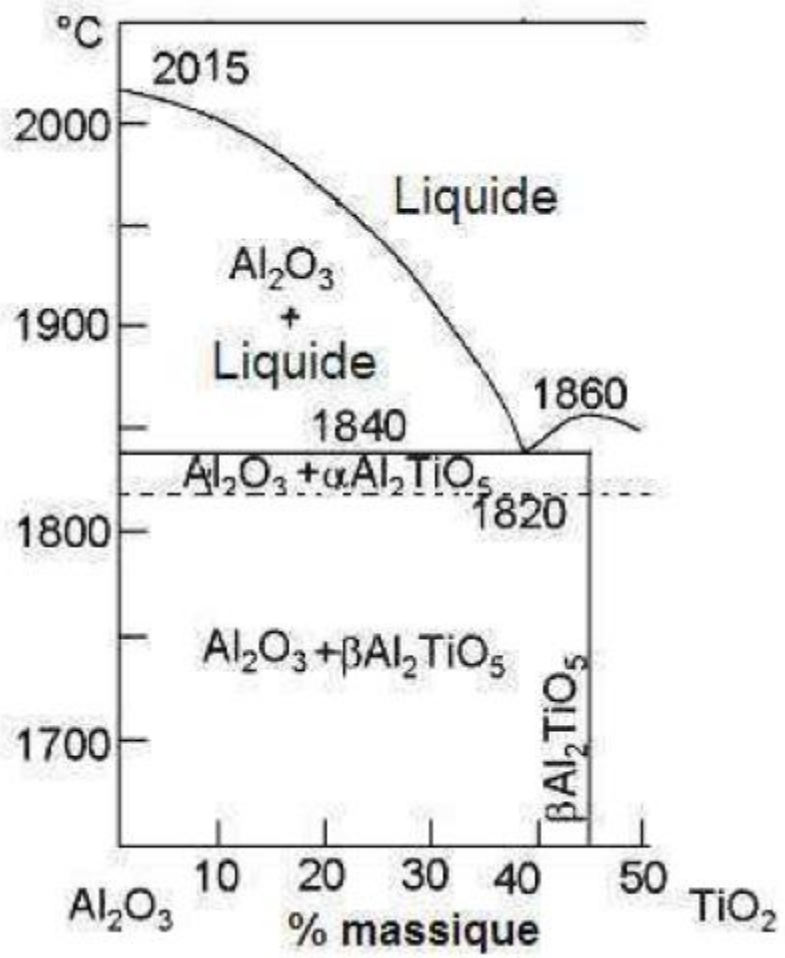



**Figure I.16** : Diagramme des phases du système Al2O3-TiO2 [10].

# *Chapitre II :*

# *Tribologie des surfaces*

# I. Tribologie des surfaces

## II.1 Généralités

La tribologie est définie comme la science et la technologie des surfaces qui interagissent dans un mouvement relatif. L'analyse tribologique d'un système a pour principal objectif l'étude du frottement, de la lubrification et de l'usure sous leurs multiples aspects. Dans de nombreux cas, une réduction de l'usure est recherchée, ainsi qu'une minimisation du frottement, cause de dissipation d'énergie mécanique. Dans le cas de notre étude, à savoir l'interaction entre deux surfaces en mouvement l'une par rapport à l'autre et des grandeurs relatives à l'usure progressive s'installe cela a pour effet la dégradation de l'état de surface.

En général les conditions de frottement et les mécanismes d'endommagement dépendent d'une multitude de facteurs constituant un tribo-système :

-propriétés des deux matériaux en contact,

-caractéristiques du troisième corps (débris d'usure et/ou lubrifiant) situé à l'interface,

-mouvements relatifs des corps en contact (cinématique), efforts appliqués et efforts transmis par le contact, et environnement du contact (atmosphère, température).

Les phénomènes d'usure à étudier. Toutefois, pour ce faire il est nécessaire d'en établir et valider le principe. Comme nous le verrons dans ce travail un certain nombre d'essais vont être réalisés sur un tribomètre.

Un tribomètre est un appareil utilisé généralement pour la mesure des forces de frottement de deux surfaces en mouvement l'une par rapport à l'autre et des grandeurs relatives à l'usure. Son principe général consiste à faire frotter un matériau sur un autre dans un environnement choisi et contrôlé afin d'étudier le comportement de l'un ou des deux matériaux. En fonction des conditions expérimentales que l'on voudra appliquer, on choisira une géométrie parmi les nombreuses combinaisons possibles pour se placer au plus près des conditions de contact souhaitées. L'une des géométries classiques est par exemple la géométrie pion / disque schématisée sur la figure suivante.

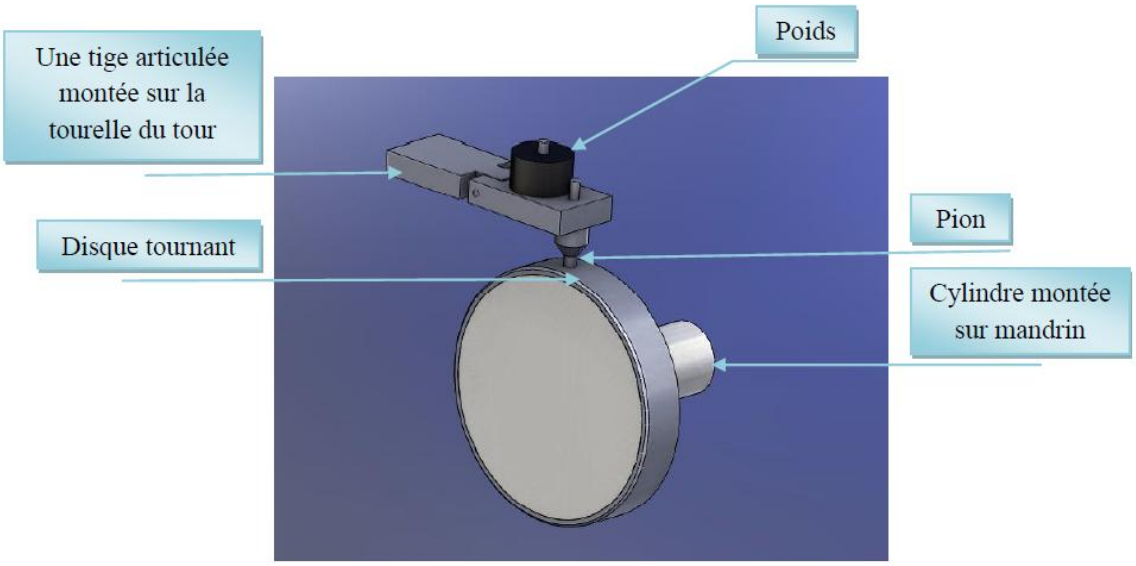



**Figure II.1** : Tribomètre à configuration pion / disque.

## II.2 Force et coefficient de frottement

Quand deux solides en contact ont un mouvement relatif (contact glissant), la force de frottement, FT, résiste à ce mouvement. Elle est la résultante de la force, Fdéf, nécessaire à la déformation des surfaces en contact, et de la force, Fcis, nécessaire au cisaillement par suite de l'effet d'adhésion, selon :

$FT = Fcis + Fdéf$

Si les surfaces sont lisses, le cisaillement prédomine et la force de frottement devient [21] :

$FT \approx Fcis = Ar\tau cis$

Avec
Ar : l'aire réelle de contact et $\tau cis$ la contrainte de cisaillement. La force tangentielle, FT, nécessaire, soit pour initier, soit pour entretenir le glissement, est proportionnelle à la force normale, FN, appliquée sur le contact, Selon :

$FT = \mu FN$

Où
$\mu$ : représente le coefficient de frottement. Il convient de distinguer le coefficient de frottement statique, $\mu s$, (initiation du glissement), du coefficient de frottement dynamique $\mu k$, (entretien du glissement), qui est inférieur et normalement indépendant de la vitesse de glissement.

## II.3 Mécanismes d'usures

L'usure est le processus d'endommagement des surfaces en contact, sous l'effet du frottement.

Les principaux mécanismes d'usure connus sont les suivants :

-Usure par adhésion : elle se manifeste par le transfert de matière de l'un des premiers corps sur le corps antagoniste et elle est susceptible d'aboutir au grippage du dispositif. L'usure adhésive résulte de la formation de micro-jonctions entre les surfaces en contact et la création de micro-rupture[11].

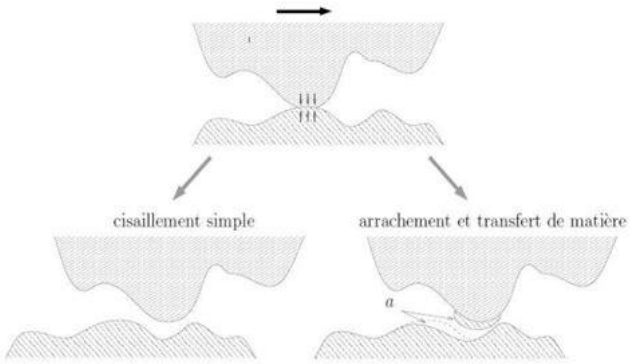



**Figure II.2** : Tribomètre à configuration pion / disque.

-Usure par abrasion : elle est produite par les particules ou des aspérités dures, assimilables à des micro-outils de coupe. Celles-ci provoquent un déplacement et un enlèvement de matière, par déformation plastique et rupture par cisaillement, avec formation de micro copeaux. L'usure abrasive se manifeste par la création de rayures, de griffures ou par un effet de polissage.

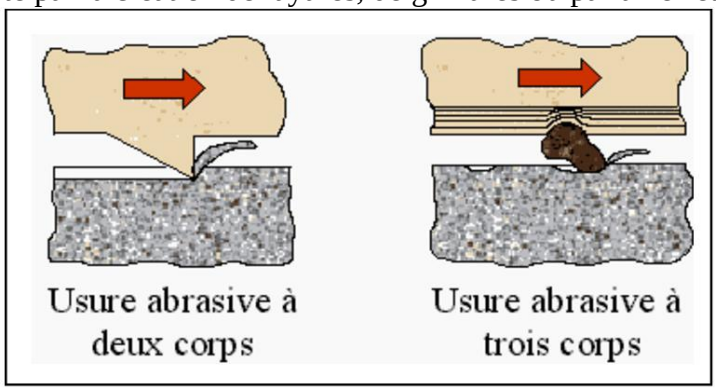



**Figure II.3** : Schéma d'usure par abrasion.

-Usure par érosion : elle correspond à une perte de matière par la surface d'un solide au contact d'un fluide en mouvement contenant des particules solides. Elle se manifeste sur les matériaux fragiles par des fissures et des éclats microscopiques et sur les métaux ductiles par des piqûres, rayures ou alors par du polissage.

**Figure II.4** : Usure par érosion.

-Usure par fatigue : l'application sur les surfaces de contact de charges élevées soumises à de nombreuses fluctuations est responsable d'un endommagement par fatigue mécanique superficielle, se traduisant par l'apparition de fissures en surface, se propageant dans le volume.

**Figure II.5** : Usure par fatigue.

-Usure par corrosion : un processus chimique, d'oxydation par exemple, couplé au frottement, est à l'origine d'un mécanisme d'endommagement appelé aussi « usure corrosive ».

**Figure II.6** : Usure par corrosion.

-Précisons par ailleurs qu'un tribo-système est susceptible d'évoluer dans le temps et d'être le siège de plusieurs mécanismes d'usure successifs ou simultanés qui agissent alors de manière conjuguée, en synergie (exemple : usure corrosive et abrasive).

## II.3.1 Paramètres agissant sur le frottement et l'usure

En général, la perte de masse quantifiant l'usure d'un corps mou glissant sur une surface dure est proportionnelle non seulement à la distance de glissement, mais aussi à la charge normale appliquée, FN, [12-14] Pour les aires de contact élevées, le coefficient de frottement est indépendant de la charge normale. En revanche, pour les très petites aires de contact, quand FN croît, μ peut soit augmenter, dans le cas du glissement diamant sur céramique [15], soit diminuer, dans le cas du glissement métal sur métal [16].
La vitesse de glissement a pour principal effet d'agir sur la température de la zone de contact. Le dépassement d'une vitesse critique entraîne la fusion superficielle du corps le plus fusible. L'augmentation de la température du contact avec la vitesse induit des transformations structurales et accroît la réactivité des surfaces vis-à-vis de l'environnement (oxydation en présence d'air). Au-dessus d'une certaine température et donc pour des vitesses de glissement supérieures à une valeur critique, le film d'oxyde, résultant d'une oxydation permanente, se reconstitue au fur à mesure qu'il est détruit par l'usure.

En règle générale, le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de la vitesse de glissement. [17] Par ailleurs, l'élévation de la température des matériaux en contact influence leur résistance à l'usure, sachant qu'elle entraîne une dégradation de leurs propriétés mécaniques. [18-20]. Remarquons enfin que l'état géométrique (rugosité) et physico-chimique des surfaces des matériaux en contact glissant influence grandement le comportement tribologique du couple de frottement.

## II.4 Comportement tribologique des dépôts d'alumine

C'est avec l'apparition des céramiques techniques ($Al_2O_3$, $ZrO_2$, $TiO_2$, AlN, SiC…) et leurs utilisations dans l'électronique que les recherches sur la liaison entre un métal et une céramique se sont développées. Parmi les applications visées, on peut citer les tubes électroniques, les isolateurs électriques, les valves à vide, les condensateurs, etc…

La déformation subie par les matériaux en contact à sec peut être considérée comme ductile ou fragile selon les conditions de charge et vitesse. La déformation ductile est produite sous conditions de glissement modéré, de sorte que l'on obtient un flux plastique et un déplacement du matériau par détachement ou perte de matériau. Par conséquent, le frottement et l'usure sont fiable. Par contre si la déformation est fragile on obtient une grande quantité de fissures. Ce type de déformation est plus probable sous conditions de forte contrainte de contact et lorsque le corps en contact est beaucoup plus dur que le matériau principal. Dans ces conditions, des grains peuvent être enlevés et peuvent rester dans la zone de contact entre les deux corps. Les débris d'usure produits peuvent rester dans le sillon d'usure et dans certains cas former une couche entrainant une diminution du frottement. Cette couche reste exposée au contraintes appliquées entre les deux corps et peut se fracturer ou se délaminer en produisant un nouveau contact direct sur les deux matériaux d'origine.

A cause de la grande fragilité des matériaux céramiques, la charge appliquée et la vitesse de glissement sont des facteurs dont l'influence sur la déformation des corps en contact est grande et en conséquence ces paramètres affectent le taux d'usure abrasive par glissement.

# Chapitre III :

## Matériaux et techniques expérimentales

# III. Matériau et technique expérimentales

## III.1 Introduction

On présentera dans ce chapitre le procédé de projection utilisé pour l'élaboration du revêtement qui est la projection flamme-fil. Dans une deuxième étape, on présentera les différentes techniques expérimentales : les tests d'usure pour évaluer la perte de masse relative du dépôt et de l'échantillon témoin.

## III.2 Matériaux utilisés

### III.2.1 Substrat :

Le substrat utilisé dans cette étude, est un acier de nuance E335 relatif à un acier à bas carbone non allié d'usage courant. Le substrat est de forme cylindrique de diamètre 10 mm et de longueur 30 mm. La teneur en pourcentage massique des éléments constituants le substrat, obtenu à l'aide d'une analyse par fluorescence aux rayons X, est représentée dans le tableau suivant :

| C | Mo | Cu | Ni | Mn | Fe | P | Si | V | S |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | 0,007 | 0,119 | <0,03 | 0,231 | Bal | 0,05 | 0,044 | <0,01 | 0,01 |

**Tableau III.1** : Analyse du substrat par la fluorescence des rayons X.

### III.2.2 Élaboration des échantillons

Les échantillons utilisés pour la projection thermique, ont été usinés sur le tour parallèle au niveau du hall de technologie où on a effectué :

- ✓ Un dressage, pour avoir un bon état de surface, de la surface à revêtir ;
- ✓ Un épaulement, dans le but de fixer les pièces, lors de la projection ;
- ✓ Un chanfreinage, dans le but d'avoir un contact parfait entre le revêtement et la surface antagoniste.

Les échantillons élaborés présentent la forme suivante :

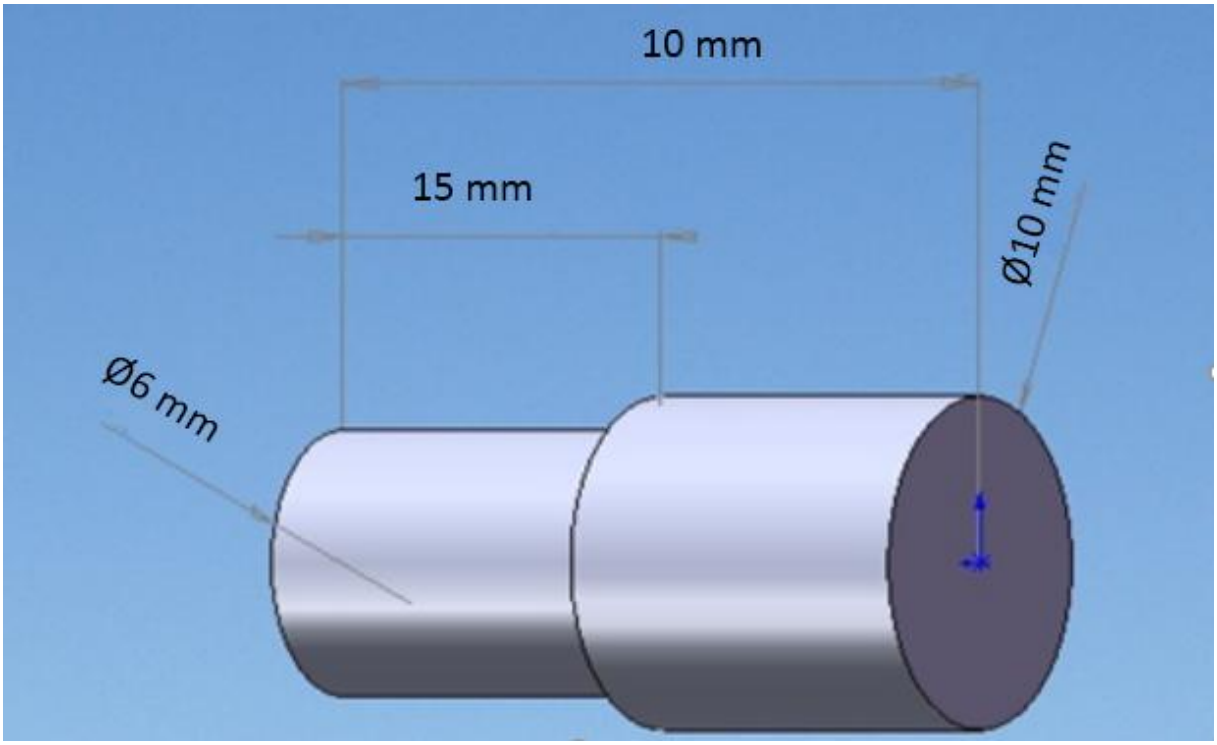



**Figure III.1** : Échantillon utilisé pour la projection.

### III.2.3 Elaboration de revêtements à base d'alumine :

Avant la projection, les échantillons sont rectifiés puis nettoyés et dégraissées au trichloréthylène selon les normes usuelles puis être finalement grenaillés [155]. Les matériaux de départ choisis pour réaliser les revêtements céramiques par projection flamme.fil sont à base d'alumine, connus pour leurs propriétés d'antifriction excellentes et une bonne résistance à l'usure [156, 157]. Les compositions chimiques des trois matériaux d'apport à base d'alumine sont énumérées dans le tableau suivant :

| Matériaux | Al2O3 | TiO2 | Autres |
|---|---|---|---|
| Al2O3 (Al.99) | 99,8 | / | 0,2 |
| Al2O3.TiO2 (AT.3) | 97 | 2,8 | 0,2 |

**Tableau III.2** : Compositions chimiques des matériaux de projection utilisés.

### III.2.4 Procédé d'élaboration des revêtements par flamme oxyacétylénique :

Le dispositif de projection par flamme utilisé pour élaborer les dépôts à partir de cordons est constitué d'un pistolet Master.Jet 2. Pourvu d'un moteur électrique à basse vitesse (10mm/s) pour l'entrainement du cordon. Un système de contrôle des gaz, composé de débitmètres à flotteur pour régler le débit d'oxygène et d'acétylène et des manomètres régulant la pression des gaz de la flamme, d'air et d'un support échantillon. Lors de la projection, les échantillons sont mis en rotation et le pistolet est placé perpendiculairement à la surface des substrats à une

distance contrôlée manuellement d'environ 150 mm Un jet d'air comprimé placé à 80 mm de l'échantillon est dirigé vers la surface du dépôt après la projection, pour contrôler le refroidissement. Par la suite, nos échantillons ont étés soumis à un traitement thermique à 1000 C° pour une durée de 2 heures. Les paramètres de projection utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

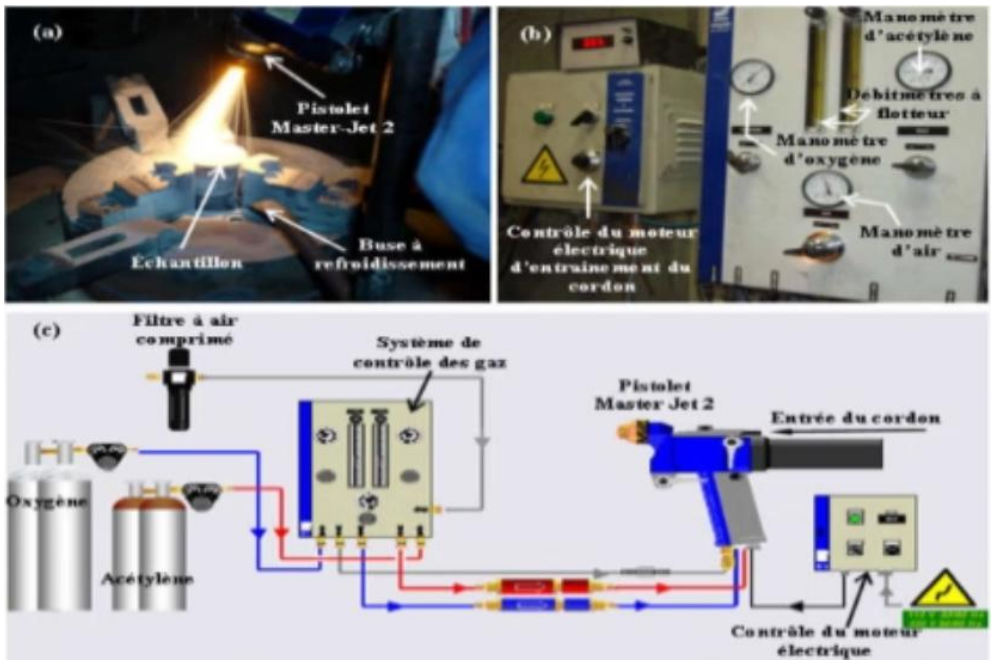



**Figure III.2** : Dispositif de projection flamme cordons.

## III.2.5 Paramètres utilisés pour la projection thermique

| Paramètres de projection | / |
|---|---|
| Gaz | Acétylène |
| Vitesse du cordon (mm/s) | 10 |
| Diamètre du cordon (mm) | 4,75 |
| Débit du cordon (Kg/h) | 1,30 |
| Pression air (bars) | 4,5 |
| Pression gaz (bars) | 4 |
| Pression oxygène (bars) | 1,2 |
| Hauteur de bille oxygène (mm) | 70 |
| Hauteur de bille gaz (mm) | 60 |
| Distance de projection (mm) | 150 |
| Angle de projection (mm) | 90' |

**Tableau III.3** : paramètres de projection.

### III.2.6 Traitement thermique

Après l'obtention de nos pions avec un revêtement d'environs 1 mm, Nous le mettons dans un four pour un traitement thermique d'une durée de 1 heure à 1000 C°.

## III.3 Technique expérimentale

### III.3.1 Test d'usure (perte de masse relative)

Le but de la réalisation des dépôts est l'augmentation de la durée de vie technique des pièces mécanique et cela en suivant le comportement à l'usure du revêtement en évaluant sa perte de masse relative en fonction du temps. C'est une méthode d'analyse qui consiste à faire fonctionner un mécanisme pendant un temps connu puis à extraire la pièce à étudier et à la peser afin de déterminer sa perte de masse. La précision de la mesure effectuée est de l'ordre du dixième de milligramme pour des pièces d'une masse inferieur à **200g.**

$$\textbf{perte de masse}\ (\%) = \frac{\textbf{perte de masse}\ (\textbf{g})}{\textbf{masse initiale}}\,\textbf{100}$$

#### *III.3.2.1 Configuration du dispositif d'usure*

Pour effectuer les tests d'usure, on a élaboré un dispositif au niveau du Hall de Technologie, de l'université de Bejaia. Ce dispositif comporte une tige articulée à son extrémité et au milieu un poids qui permet de mettre l'échantillon en contact sous charge maîtrisée avec le cylindre tournant à une vitesse qui est de l'ordre de **90trs/min.** Puis dans un deuxième temps à **180trs/min.** Tout le dispositif est monté sur un tour.

#### *III.3.2.2 Indication sur le disque en ferrite :*

Le disque utilisé comme abrasif est un acier au chrome(Z200cr12), les angles du disque ont été rectifiés au Hall de technologie, et polie au papier abrasif 400 puis 800 ppm, cette étape a pour but de limiter les vibrations entre du dispositif et que le pion garde un contact continu au disque.

#### *III.3.2.3 La procédure à suivre lors du test*

La procédure des tests est comme suivie :

Avant de commencer les tests, on doit nettoyer notre échantillon des éléments additifs à l'aide de l'éthanol.

1. Prendre la masse initiale (**$m_0$**) de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique de précision **0.01 g.**
2. Nettoyer le cylindre monté sur mandrin.
3. Introduire l'échantillon dans le dispositif, et actionner le tour.
4. Après la fin du temps d'essai (**30 minutes**), on nettoie l'échantillon des additifs tout en prenant la nouvelle valeur de sa masse (**$m_f$**).

### *III.3.2.4 Les paramètres à prendre en compte lors des tests d'usure*

- **Les charges :** Les charges que nous avons appliquées à nos échantillons sont de **5, 10, 15, 20, 30** et 40 **Newtons.**
- **La vitesse :** Nous avons travaillé avec deux vitesses, **90trs/min**, qui correspond à **0,5 m/s**, et **l80trs/min** qui correspond à **1m/s.**

**La durée :** la durée appliquée à nos échantillons est de 30 minutes.

# *Chapitre IV :*

# *Résultats et discussions*

# IV. Résultats et discussions

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre et de manière comparative, on présentera les résultats basés sur l'étude de la perte de masse relative qui nous permettra de comparer la tenue au frottement des deux teneurs de renforcement au dioxyde de titane en fonction de la charge à deux vitesses de glissements différentes (V1=0,5m/s et V2=1m/s) sous forme de graphes accompagné des images relevées au microscope optique des surfaces les plus significatives (x20).

## IV.2 Perte de masse relative des trois types de dépôts (test d'usure)

Dans ce qui suit, on présentera les résultats des essais de perte de masse en fonction des charges appliquées aux différents dépôts obtenus par projection thermique à l'arc électrique. Elle est calculée comme suit :

$$m(\%) = [(m_i - m_f)/m_i] \times 100$$

$m_i$ : masse initiale.

$m_f$ : masse finale.

Les valeurs obtenues sont représentées dans les tableaux cités en annexe.

Pour une meilleure compréhension des phénomènes qui les régissent, nous avons effectué une étude comparative entre les deux revêtements en termes de perte de masse relative en fonction de la charge et de la vitesse de glissement. Les résultats sous forme de graphes sont représentés ci-dessous :

## IV.2.1 Résultats des Test d'usure

### *IV.2.1.1 AL2O3-99% et AL203-3%TiO2 à V1=0,5 m/s*

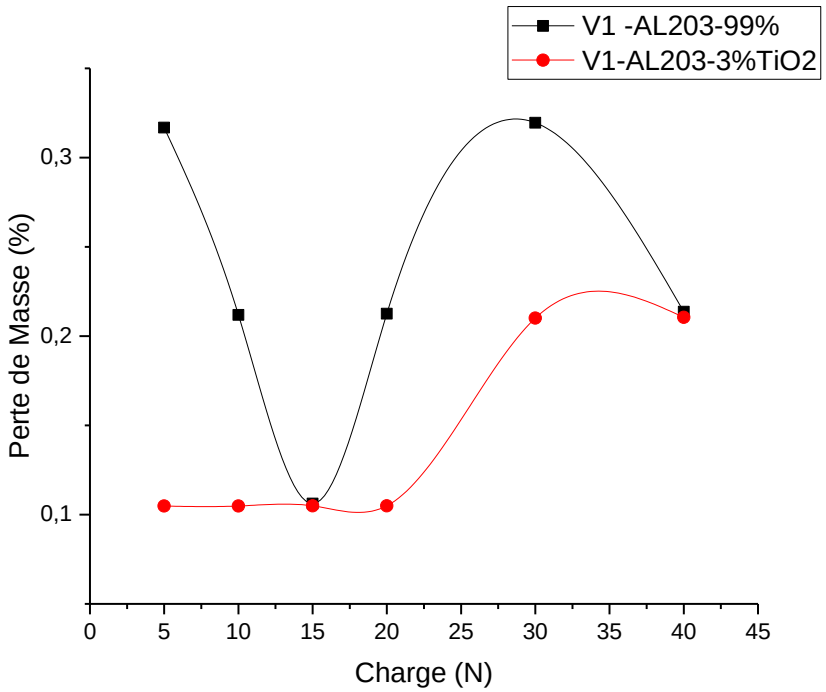



**Figure IV.1 :** Perte de masse relative en fonction de la charge à V1.

- Pour la vitesse de 90 tours/minutes, on distingue facilement que les deux revêtements ne réagissent pas de la même maniéré au test d'usure, ainsi le dépôt en alumine non renforcé subit une perte d'usure relative importante par rapport au dépôt d'alumine renforcé au titane.
- -Le dépôt d'alumine subit une dégradation importante dès le premier chargement, jusqu'à atteindre le seuil de 0,1 % à 15 Newtons due au zones de glissements puis la courbe augmente en subissant des efforts tangentiels à un maximum à 30 N puis tend à se stabiliser.
- -Etant le revêtement au meilleurs caractéristique mécanique, la matrice d'alumine renforcé au dioxyde de titane, au faible chargement subit une perte de masse constante, l'évolution de la tendance de la courbe s'opère au même chargement que celui de l'alumine, c'est-à-dire à 20 Newtons.

### *IV.2.1.2 AL2O3-99% et AL203-3%TiO2 à V2=1 m/s*

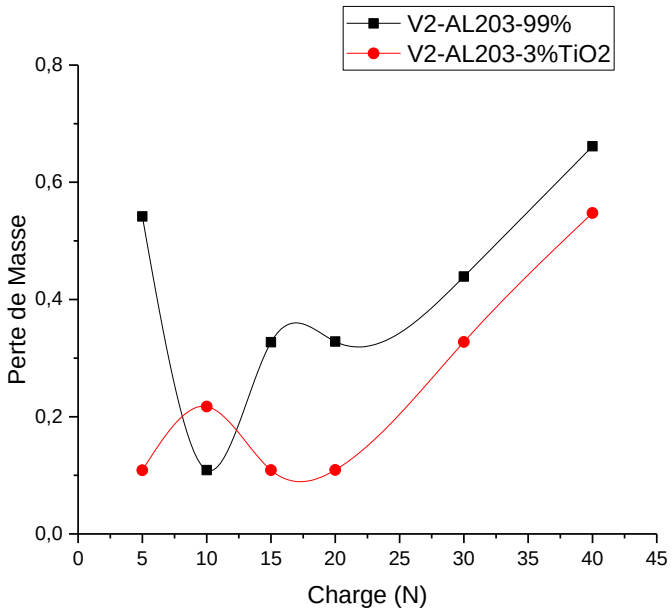



**Figure IV.1 :** Perte de masse relative en fonction de la charge à V2.

- On constate le même comportement des deux dépôts soumis à une vitesse de 180 tours /minutes, pour l'alumine, des débris se créent et s'éjectent aux faibles chargements, puis la perte de masse augmente à partir 10 Newtons, se stabilise puis reprend une allure constante.
- Pour l'alumine renforcé, elle suit quasiment la même allure aux faibles vitesses de glissement.

### *IV.2.1.3 Comparatif entre V1 et V2*

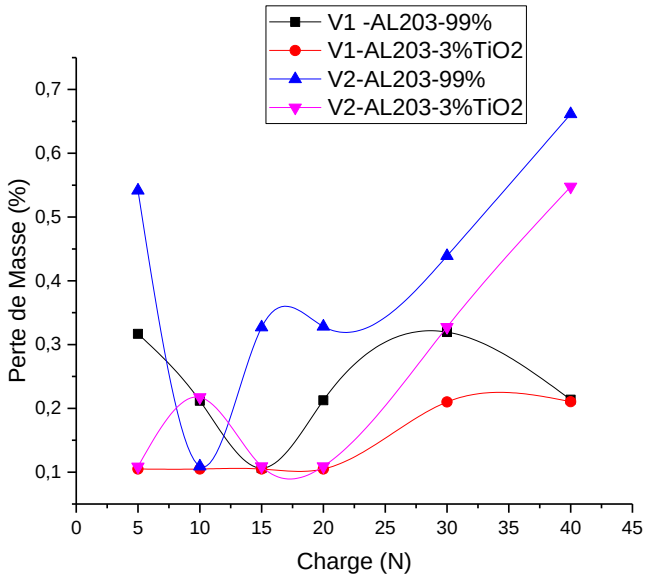



**Figure IV.3 :** Perte de masse relative en fonction de la charge.

## IV.2.2 Discussions des résultats de perte de masse relative :

- Nous attribuons cette chute au faible chargement au irrégularités du dépôt qui soumis à sollicitations forment des débris qui se détachent et finissent éjectés du système.
- Les débris s'éjectent à cause du contacte insuffisant pour les maintenir dans le relief du dépôt.
- On remarque que pour V1, la perte de masse tend à fluctuer à partir de 30 Newtons, les premiers cisaillements s'effectuent mais la faible vitesse de glissement ne permet le cisaillement plaquettes plus solidement ancrées au dépôt.
- En ce qui concerne la vitesse de glissement V2, la matrice d'alumine renforcée résiste efficacement à l'usure que celle de l'alumine pure, l'on remarque aussi que la première perte de masse significative est retardée pour l'alumine renforcé d'une dizaine de Newtons.

## IV.3 Evolution de la température en fonction de la charge

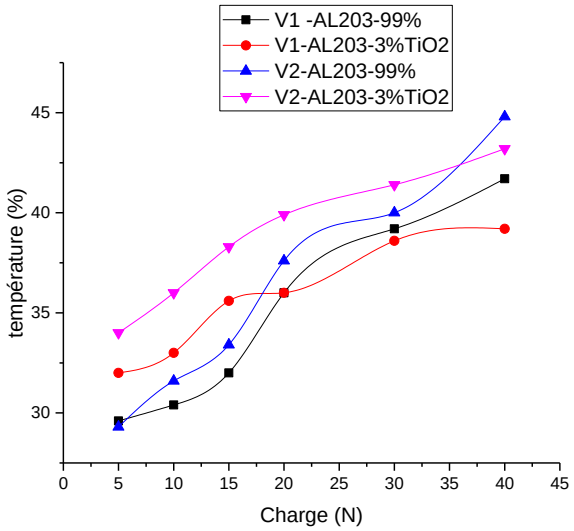



**Figure IV.4 :** Température en fonction de la charge**.**

- On remarque que la température augmente graduellement en fonction de la charge, la courbe croit linéairement. Le dépôt en alumine renforcé subit un échauffement plus important au faible chargement tandis que le revêtement en alumine pure tend à plus chauffer aux forts chargements.

## IV.4 Taux d'usure en fonction de la charge

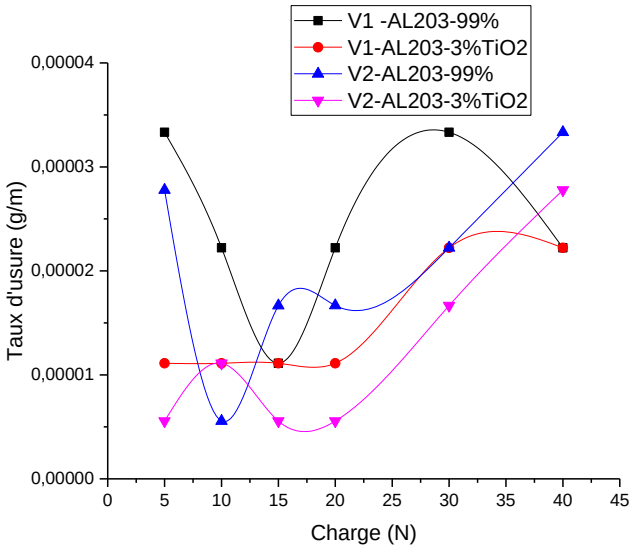



**Figure IV.5 :** Taux d'usure en fonction de la charge.

- Le taux d'usure est calculé en divisant la perte de masse sur la distance parcourue du pion sur le disque, de sorte à en déduire la masse perdue pour chaque unité de

longueur. Donc, l'évolution du taux d'usure suit le même comportement que la courbe de la perte de masse. Nous en tirons les mêmes observations.

## IV.5 Evolution de la température en fonction du temps

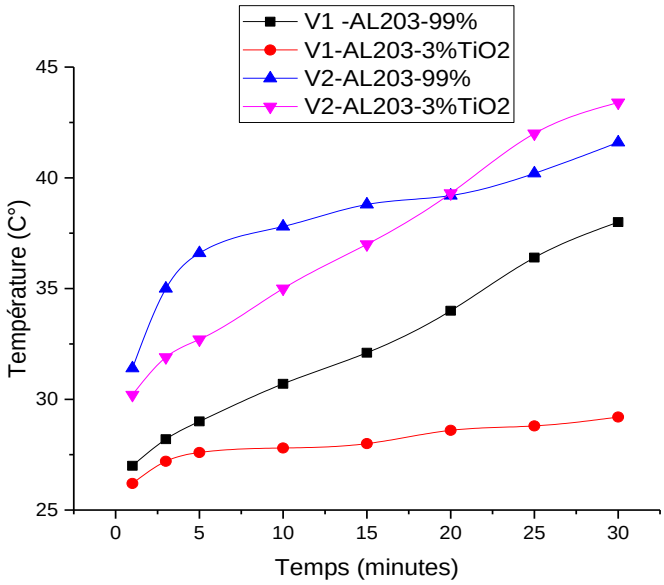



**Figure IV.6 :** Température en fonction du temps.

- Nous observons que les courbes se distinguent en fonction de la vitesse de glissement, ainsi V2 implique une montée en température précoce pour l'alumine renforcé, À partir de 25 minutes, malgré une vitesse de glissement différente, l'augmentation de la température tend à se confondre pour l'alumine pure. Par contre, l'alumine renforcé se comporte différemment en fonction de la vitesse de glissement, elle est quasi stable pour V1 et augmente linéairement pour V2.

## IV.6 Observation des traces d'usure

A cause du nombre d'observations acquises entres les tests d'usure, nous avons sélectionné une série d'observation la plus significative pour expliciter les l'apparition des traces d'usures avec les différents mécanismes que ces derniers ci engendrent sur le revêtement. Pour cela, nous avons sélectionné les tests d'usures effectués à la vitesse de 180 tours/minutes, la totalité des observations sont dans l'annexe.

## IV.6.2 Métallographie des dépôts avant le test d'usure

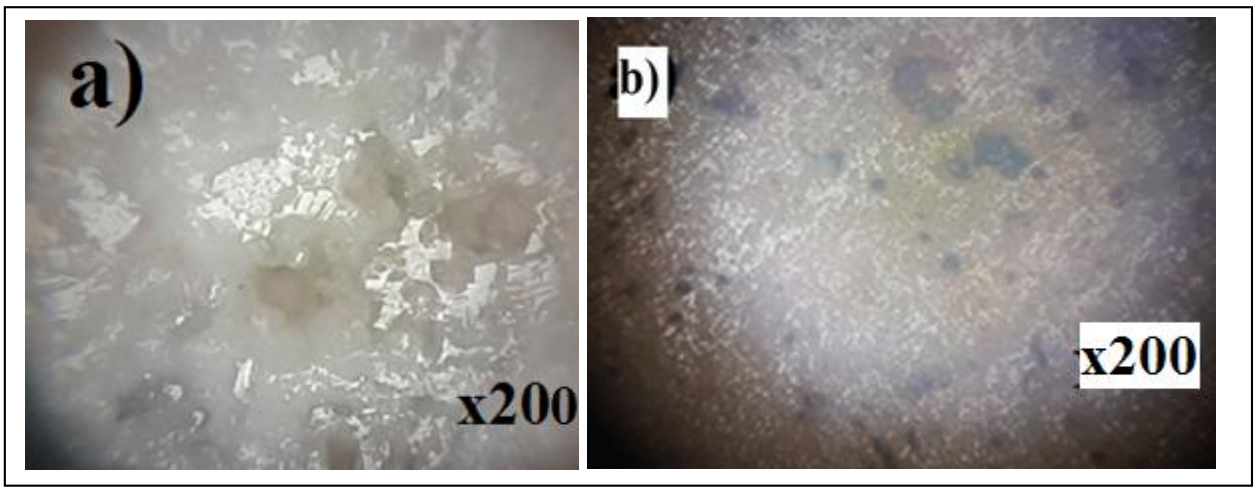



**Figure IV.7 :** Observation des traces d'usures au microscope optique.
a) Al2O3 polie, a) Al2O3 -3%TiO2 polie.

- Sur nos, observation au microscope, on note la présence d'importante irrégularités du dépôt, des porosités, des impuretés et des zones de délaminage importantes.

## IV.6.2 Echantillon d'alumine (Témoin) V2

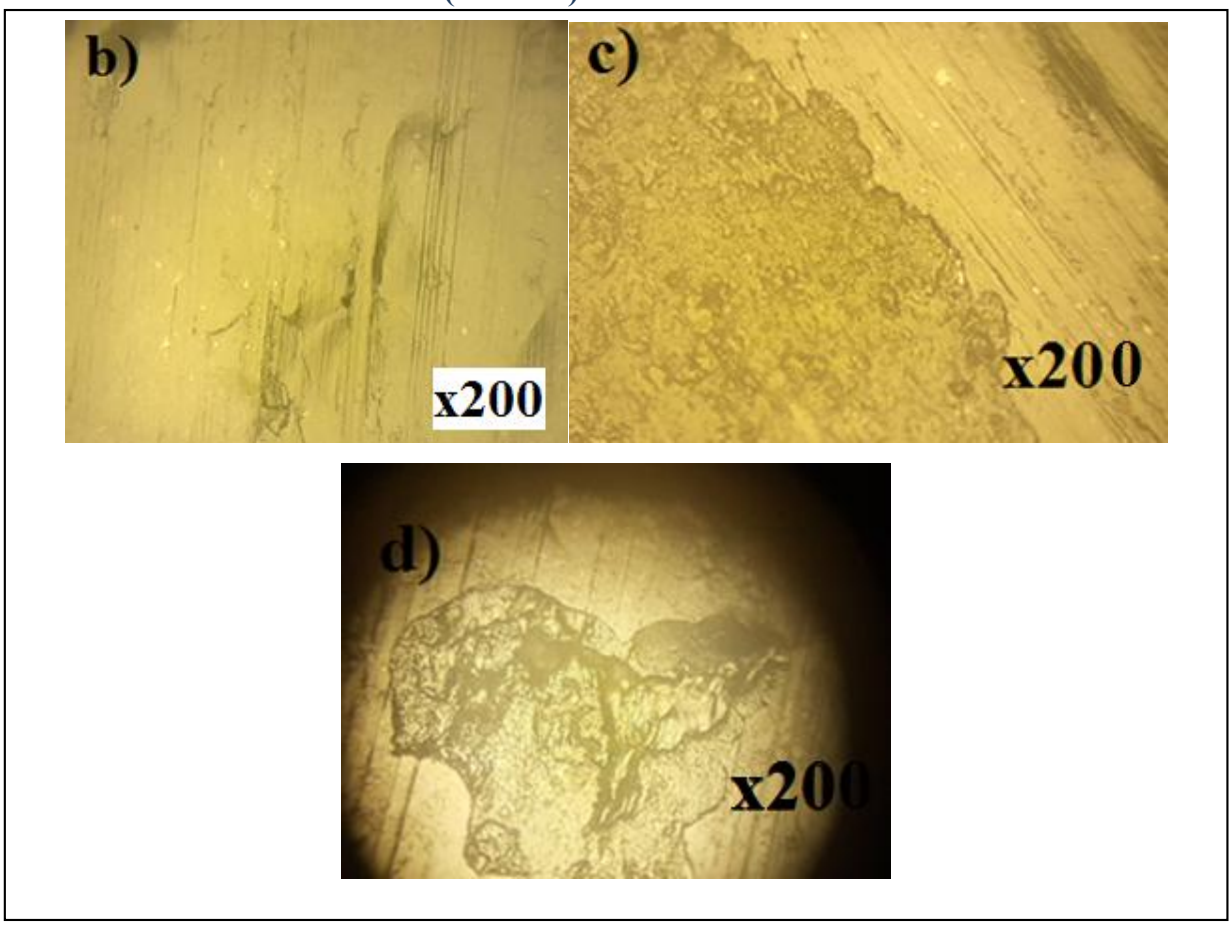



**Figure IV.8 :** Observation des traces d'usures au microscope optique.
b) Al2O3 10 N, c) Al2O3 15 N, d) Al2O3 30 N.

- Les premières traces d'usure facilement observables apparaissent à partir d'un chargement de 5 N et se multiplient au fur et à mesure que le temps passe, le disque en ferrite subit un endommagement à cause de ses faibles propriétés mécaniques et relâche des particules qui forment ainsi le troisième corps. Les irrégularités du dépôt amorcent des stries qui avec le mouvement perpétuel se propage en lignes droites sans toutes fois détériorer le dépôt en profondeur.
- Dès 15 N, on observe une large zone ou s'est effectué un délaminage du dépôt, à 30 N, la troisième corp pénètre les zones inter lamellaires et cause délaminage des zones avoisinante.

## IV.6.2 Echantillon d'alumine renforcé V2

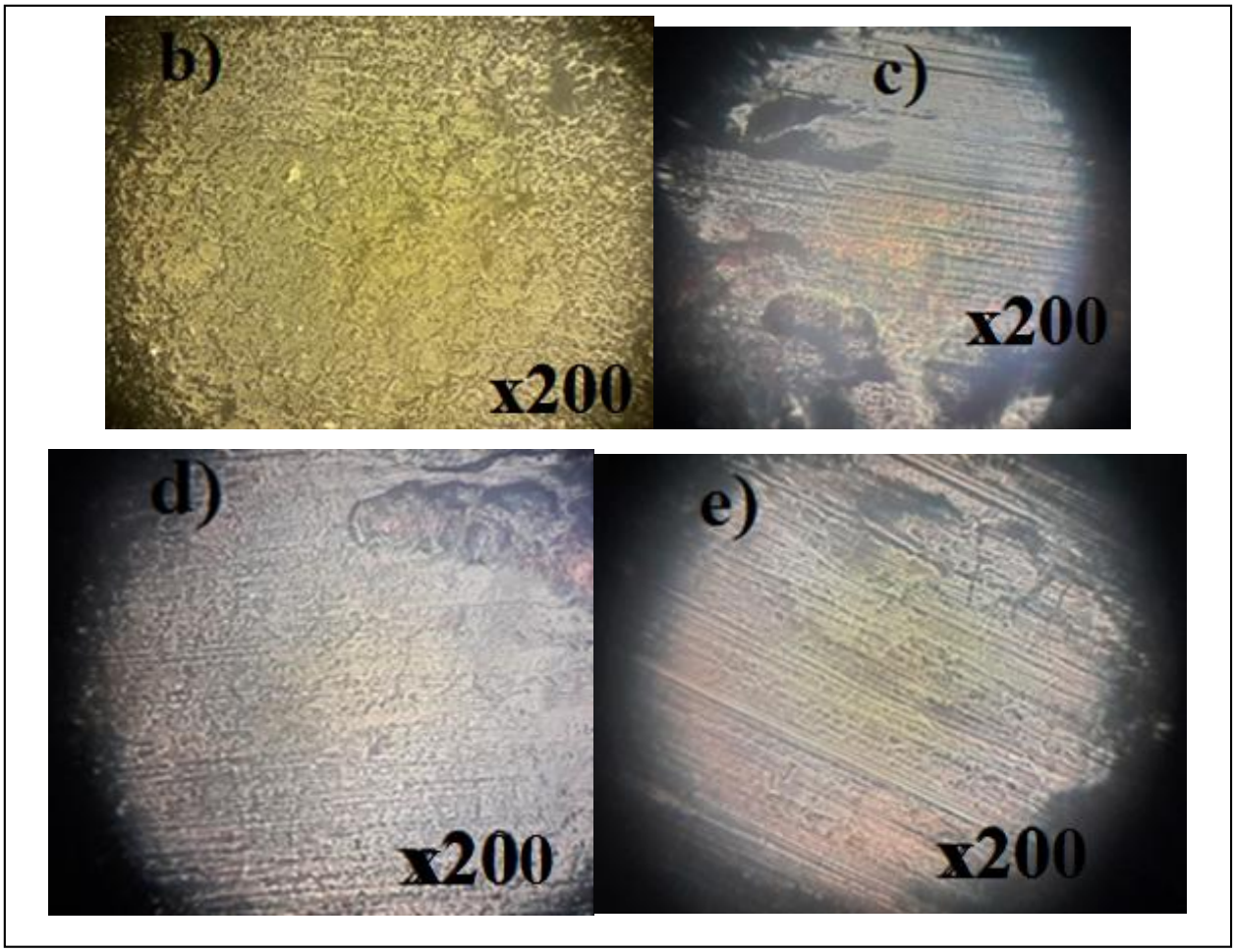



**Figure IV.9 :** Observation des traces d'usures au microscope optique., b) Al2O3 -3%TiO2 5 N, c) Al2O3 -3%TiO2 10 N, d) Al2O3 -3%TiO2 15 N, e) Al2O3 -3%TiO2 30 N.

- Les première traces d'usure facilement observables apparaissent à partir d'un chargement de 5 N et se multiplient au fur et à mesure que le chargement augmente.
- Dès 10 N, on observe des petites zones où s'est effectué un délaminage du dépôt apparaissent, à 15 N, les stries s'élargissent et les zones de délaminage sont recouverte par le troisième corp.

Malgré l'augmentation du chargement, la surface de l'échantillon garde les mêmes spécificités, les zones de délaminage se restreignent à de faible surface et les sillons s'élargissent et se regroupent en détruisant les interlignes d'usures fait d'alumine renforcé, et se font éjecter par le mouvement de glissement amplifié par les vibrations du système, cela justifie la perte de masse croissante.

# *Conclusion générale*

# Conclusion

Ce travail a pour but de faire une étude comparative d'un revêtement d'alumine renforcé au dioxyde de titane à un revêtement d'alumine, les deux dépôts sont obtenues par projection thermique de type flamme fil oxyacétylénique sur un substrat d'un acier de construction général E335.

La première phase de cette étude a consisté à faire subir aux dépôts un vieillissement accéléré avec une méthode tribologique qu'est le test d'usure pion disque tout en prélevant la température à la fin de chaque parcours du pion autour du disque.

Au faible vitesse, l'on peut conclure que l'usure des deux dépôts fluctue aux forts chargement, en effet, l'énergie cinétique du troisième corps et des débris d'usure n'est pas suffisante pour permettre leurs éjections perpétuelles. Ce qui laisse penser que les deux dépôts peuvent tenir à l'infinie grâce au troisième corps piégé à l'interface du contact.

Grande vitesse, l'usure du dépôt augmente avec le chargement pour nos deux types de dépôt, l'énergie cinétique des débris d'usure combiné à l'agitation thermique permet le continuel renouvellement de la surface.

L'interface du pion et du disque est sujet aux frottements, ce qui engendre une montée en température, le l'alumine renforcé au dioxyde de titane chauffe plus rapidement et se comporte différemment en fonction de la vitesse de glissement, ainsi en fonction du temps qu'elle est quasi stable pour V1 et augmente linéairement pour V2. Par ailleurs, lorsqu'on varie le chargement, le dépôt en alumine renforcé subit un échauffement plus important au faible chargement tandis que le revêtement en alumine pure tend à plus chauffer aux forts chargements.

Nous avons conclu que deux phénomènes importants conduisent à l'usure de la surface :

1- Le délaminage pour le dépôt en alumine. Ce phénomène apparait à partir de 15 Newtons. L'apparition du troisième corps et sa prolifération dans les défauts et les irrégularités du revêtement engendre la fragilisation des points des points de cohésion des lamelles empilées. Un cisaillement s'opère à partir d'un chargement de 10 Newtons, le troisième corps essentiellement constitué de ferrite fini par recouvrir de large plage de notre revêtement jusqu'à l'obtention de la couche supérieure entièrement fait du troisième corps.

2- Le beurrage pour l'alumine renforcé, étant le matériau le plus performant mécaniquement de par sa grande dureté, le dépôt se détériore localement empêchant le délaminage de larges surfaces, à la place, des sillons se forment dès les faibles chargements et s'élargissent tout en fragilisant les aspérités du dépôt. Ce qui justifie l'augmentation continuelle de la perte de masse, c'est l'éjection des débris d'usure à cause de la force centrifuge du mouvement circulaire combiné aux vibrations du système, les reliefs se forment et disparaissent continuellement.

# Références bibliographiques :

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

[2] S. Nourouzi, thèse doctorat : « Contribution à l'étude du procédé Arc-fil pour la réalisation de dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive », Université de Limoges, 2004.

[3] P. L. Fauchais, J. V. R. Heberlein, and M. I. Boulos, "Overview of Thermal Spray," in Thermal Spray Fundamentals, Boston, MA: Springer US, 2014, pp. 17–72.

[4]. P. Fauchais, J. R. Heberlein, and M. Boulos, "Conventional Coating Formation,"Springer US, 2014.

[5] Michel Dupeux, AIDE-MÉMOIRE SCIENCE DES MATÉRIAUX. Dunod, Paris, 2004.ISBN 2 10 005458 9.

[6] S. Le Pévédic, thèse doctorat : « Etude de la formation et de l'oxydation de couches minces d'alliages Al-Ni après dépôt d'Al sur un monocristal de Ni (111) », Université de Paris VI, 2007

[7] P. C. Snijders, L. P. H. Jeurgens, and W. G. Sloof. Structural ordering of ultra-thin, amorphous aluminium-oxide films. Surf. Sci., 589 :98, 2005.

[8] D. Chicot, G. Duarte, A. Tricoteaux, B. Jorgowski, A. Leriche, and J. Lesage, "Vickers Indentation Fracture (VIF) modeling to analyze multi-cracking toughness of titania, alumina and zirconia plasma sprayed coatings," Mater. Sci. Eng. A, vol. 527, no. 1–2,pp. 65–76, Dec. 2009.

[9] X. Bokhimi, A. Morales, M. Aguilar, J. A. Toledo-Antonio, and F. Pedraza, International Journal of Hydrogen Energy, 2001, 26, 1279.

[10]. F. Vargas, "Élaboration de couches céramiques épaisses à structures micrométriques et nanométriques par projections thermiques pour des applications tribologiques," Limoges, 2010

[11] F. P. Bowden et D. Tabor, "The friction and lubrication of solids ", Chap. p. 28- 31, éd. Oxford, Clarendon Press (1954).

[12] J. R. Gomes, O. M. Silva, L. C. Pardini, Wear, 249 (2001), p. 240-245.

[13] J.L. Lawen, S. J. Calabrese, O. S. Dinc, J. Tribo, 120 (1998), p. 339-344.

[14] S. Hemery, PFE, ENSAM d'Angers (1996).

[15] A. Limouni, Thèse de doctorat , UTC (1998).

[16] N. Soda, Y. Kimura, A. Tanaka, Wear, 33 (1975), p. 1-16.

[17] Y. M. Chen, B. Rigaut et F. Armanet, J. EuropeanCeramic Soc., 6 (1990), p. 383-390.

[18] A. J. A. Winnubst, Y. J. He, A. J. Burggraaf, H. Verweij, Wear, 210 (1997), p. 178-187.

[19] F. E. Kennedy, " Friction, lubrication and wear ", ASM Handbook (1992), p. 438-444.

[20] O. Les quois, J.J. Serra, P. Kapsa, Wear, 201 (1996), p. 163-170.

[21] These doctorat, Etudes du comportement mécanique et microstructural des revêtements en céramique obtenus par projection thermique, Racim YOUNES. Université de Bejaia. 2016.

Annexe :

**Résultats des pertes d'usures** :

## Temps:30 min V=90Tr/m AL2O3-99%

| N | M0(g) | M1(g) | T (C°) | Dm(g) | Dm/M0*100 | d(m) | V(tr/min) | DM/d |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 9,47 | 9,44 | 29,6 | 0,03 | 0,31678986 | 900 | 90 | 3,3333E-05 |
| 10 | 9,44 | 9,42 | 30,4 | 0,02 | 0,21186441 | 900 | 90 | 2,2222E-05 |
| 15 | 9,42 | 9,41 | 32 | 0,01 | 0,10615711 | 900 | 90 | 1,1111E-05 |
| 20 | 9,41 | 9,39 | 36 | 0,02 | 0,21253985 | 900 | 90 | 2,2222E-05 |
| 30 | 9,39 | 9,36 | 39,2 | 0,03 | 0,31948882 | 900 | 90 | 3,3333E-05 |
| 40 | 9,36 | 9,34 | 41,7 | 0,02 | 0,21367521 | 900 | 90 | 2,2222E-05 |

## Temps:30 min V=180TR/M AL2O3-99%

| N | M0(g) | M1(g) | T (C°) | Dm(g) | Dm/M0*100 | d(m) | V(tr/min) | DM/d |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 9,23 | 9,18 | 29,3 | 0,05 | 0,54171181 | 1800 | 180 | 2,7778E-05 |
| 10 | 9,18 | 9,17 | 31,6 | 0,01 | 0,10893246 | 1800 | 180 | 5,5556E-06 |
| 15 | 9,17 | 9,14 | 33,4 | 0,03 | 0,32715376 | 1800 | 180 | 1,6667E-05 |
| 20 | 9,14 | 9,11 | 37,6 | 0,03 | 0,32822757 | 1800 | 180 | 1,6667E-05 |
| 30 | 9,11 | 9,07 | 40 | 0,04 | 0,43907794 | 1800 | 180 | 2,2222E-05 |
| 40 | 9,07 | 9,01 | 44,8 | 0,06 | 0,6615215 | 1800 | 180 | 3,3333E-05 |

## Temps:30 min V=90Tr/m AL203-3%TiO2

| N | M0(g) | M1(g) | T (C°) | Dm(g) | Dm/M0*100 | d(m) | V(tr/min) | DM/d |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 9,54 | 9,53 | 32 | 0,01 | 0,1048218 | 900 | 90 | 1,1111E-05 |
| 10 | 9,54 | 9,53 | 33 | 0,01 | 0,1048218 | 900 | 90 | 1,1111E-05 |
| 15 | 9,53 | 9,52 | 35,6 | 0,01 | 0,10493179 | 900 | 90 | 1,1111E-05 |
| 20 | 9,53 | 9,52 | 36 | 0,01 | 0,10493179 | 900 | 90 | 1,1111E-05 |
| 30 | 9,52 | 9,5 | 38,6 | 0,02 | 0,21008403 | 900 | 90 | 2,2222E-05 |
| 40 | 9,5 | 9,48 | 39,2 | 0,02 | 0,21052632 | 900 | 90 | 2,2222E-05 |

## Temps:30 min V=180TR/M AL203-3%TiO2

| N | M0(g) | M1(g) | T (C°) | Dm(g) | Dm/M0*100 | d(m) | V(tr/min) | DM/d |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 9,21 | 9,2 | 34 | 0,01 | 0,10857763 | 1800 | 180 | 5,56E-06 |
| 10 | 9,2 | 9,18 | 36 | 0,02 | 0,2173913 | 1800 | 180 | 1,11E-05 |
| 15 | 9,18 | 9,17 | 38,3 | 0,01 | 0,10893246 | 1800 | 180 | 5,56E-06 |
| 20 | 9,17 | 9,16 | 39,9 | 0,01 | 0,10905125 | 1800 | 180 | 5,56E-06 |
| 30 | 9,16 | 9,13 | 41,4 | 0,03 | 0,32751092 | 1800 | 180 | 1,67E-05 |
| 40 | 9,13 | 9,08 | 43,2 | 0,05 | 0,54764513 | 1800 | 180 | 2,78E-05 |

**Relevé des Température en fonction du temps :**

## AL2O3-99%

**5N V=180TR/M**

| T (min) | T(s) | T(c°) |
|---|---|---|
| 1 | 60 | 27,4 |
| 3 | 180 | 29,2 |
| 5 | 300 | 30 |
| 10 | 600 | 31,2 |
| 15 | 900 | 32,6 |
| 20 | 1200 | 34,6 |
| 25 | 1500 | 36 |
| 30 | 1800 | 37,6 |

**30N V=180TR/M**

| T (min) | T(s) | T(c°) |
|---|---|---|
| 1 | 60 | 31,4 |
| 3 | 180 | 35 |
| 5 | 300 | 36,6 |
| 10 | 600 | 37,8 |
| 15 | 900 | 38,8 |
| 20 | 1200 | 39,2 |
| 25 | 1500 | 40,2 |
| 30 | 1800 | 41,6 |

**5N V=90TR/M**

| T (min) | T(s) | T(c°) |
|---|---|---|
| 1 | 60 | 26,4 |
| 3 | 180 | 27,5 |
| 5 | 300 | 29,2 |
| 10 | 600 | 31 |
| 15 | 900 | 32 |
| 20 | 1200 | 33,6 |
| 25 | 1500 | 34,3 |
| 30 | 1800 | 36 |

**30N V=90TR/M**

| T (min) | T(s) | T(C°) |
|---|---|---|
| 1 | 60 | 27 |
| 3 | 180 | 28,2 |
| 5 | 300 | 29 |
| 10 | 600 | 30,7 |
| 15 | 900 | 32,1 |
| 20 | 1200 | 34 |
| 25 | 1500 | 36,4 |
| 30 | 1800 | 38 |

# AL203-3%TiO2

**5N V=180TR/M**

| T (min) | T (S) | T(c°) |
|---|---|---|
| 1 | 60 | 29,7 |
| 3 | 180 | 30 |
| 5 | 300 | 31,5 |
| 10 | 600 | 33 |
| 15 | 900 | 34,6 |
| 20 | 1200 | 36,7 |
| 25 | 1500 | 39 |
| 30 | 1800 | 40,9 |

**30N V=180TR/M**

| T (min) | T (S) | T( c°) |
|---|---|---|
| 1 | 60 | 30,2 |
| 3 | 180 | 31,9 |
| 5 | 300 | 32,7 |
| 10 | 600 | 35 |
| 15 | 900 | 37 |
| 20 | 1200 | 39,3 |
| 25 | 1500 | 42 |
| 30 | 1800 | 43,4 |

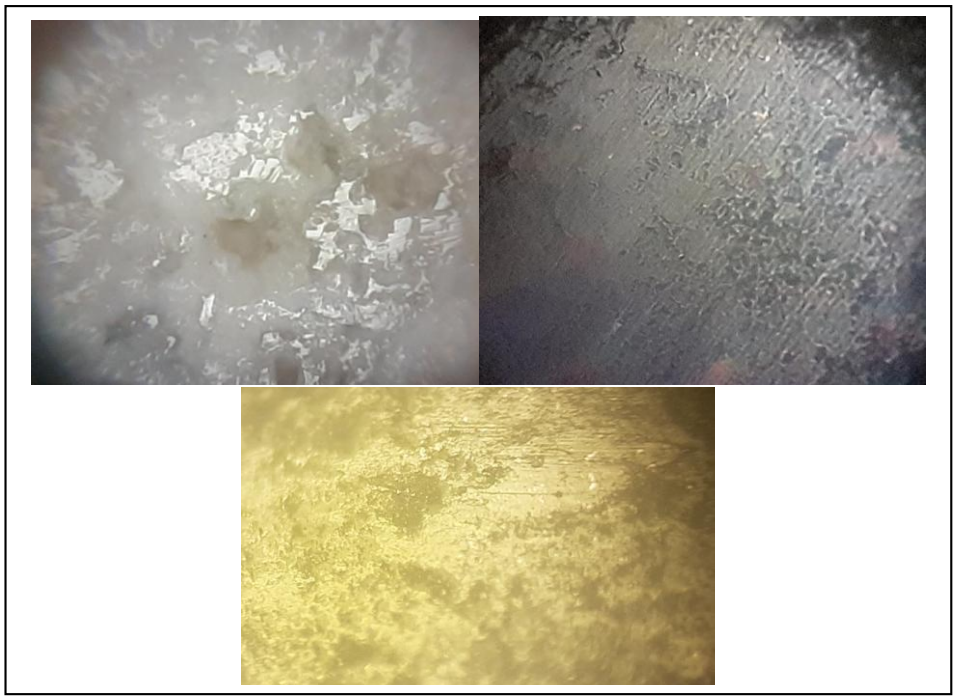
**5N V=90TR/M**

| T (min) | T (S) | T(c°) |
|---|---|---|
| 1 | 60 | 28 |
| 3 | 180 | 29,2 |
| 5 | 300 | 30 |
| 10 | 600 | 32,2 |
| 15 | 900 | 33 |
| 20 | 1200 | 33,6 |
| 25 | 1500 | 34 |
| 30 | 1800 | 34,6 |

**5N V=90TR/M**

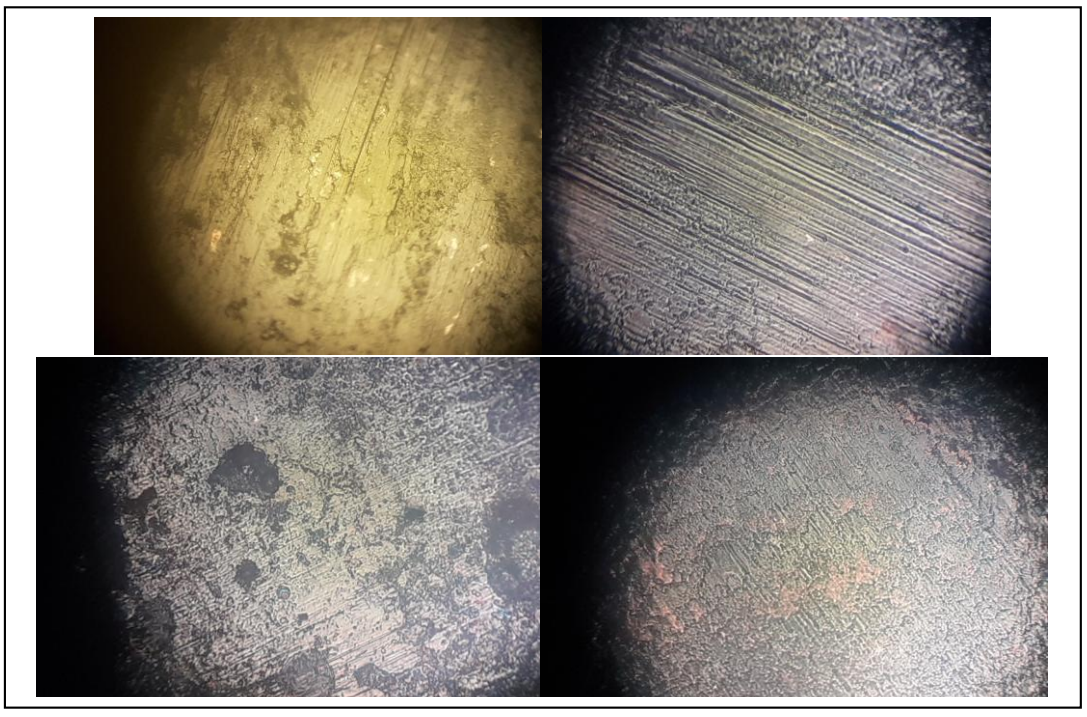
| T (min) | T (S) | T(c°) |
|---|---|---|
| 1 | 60 | 26,2 |
| 3 | 180 | 27,2 |
| 5 | 300 | 27,6 |
| 10 | 600 | 27,8 |
| 15 | 900 | 28 |
| 20 | 1200 | 28,6 |
| 25 | 1500 | 28,8 |
| 30 | 1800 | 29,2 |

**Al2O3, 90 tours/minutes  (gauche à droite, haut vers le bas)**



**Polie, 10 N, 30 N**

**Al2o3 -3%Tio2, 90 tours/minutes (gauche à droite, haut vers le bas)**



**5 N, 10 N, 15 N, 30 N**

## Résume :

Les revêtements composites céramiques s'imposent aujourd'hui comme une réponse au fort besoin industriel d'amélioration de la fiabilité des pièces sous sollicitations multiples. Le procédé de flamme-oxyacétylénique est envisagé pour la réalisation de tels revêtements avec d'excellentes propriétés mécanique. L'objectif de ce mémoire est de faire une étude comparatives d'un revêtement fait à base d'alumine et d'une matrice d'alumine renforcée au microparticules de dioxyde de titane. Ces dépôts ont été réalisés sur un substrat en acier de nuance E335. Les dépôts ont étés soumis à un test tribologique de type « pion-disque », accompagné d'observation des faciès d'usures au microscope optique. Afin de quantifier les pertes de masse relative et en déduire les mécanismes d'usures régissant la détérioration des dépôts.

**Mots clés :** Projection thermique, dépôt, Usure.