

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB DE BLIDA



**FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

MEMOIRE

Présenté au Département de Génie Mécanique

Pour l'Obtention du Diplôme de

MASTER II

Option : Matériaux et Traitement Surface

THEME

**Etude de l'usure des revêtements élaborés par
projection thermique HVOF**

Réalisé par :

Mr : BOURABIA Mohamed

Dirigé par:

- Pr : SAHRAOUI Tahar
- Dr : BADJI Riad
- Dr : AISSANI Mouloud

Année universitaire 2012 / 2013

REMERCIEMENT

*Tout d'abord je remercie **Allah** le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience de mener à bien mon projet de fin d'études.*

*Je remercie mon professeur **Tahar. SAHRAOUI**, d'avoir bien voulu me proposer le sujet et ensuite encadré mon travail en m'apportant l'orientation et l'aide nécessaire. Aussi bien je remercie mon Co-promoteur Docteur **Riad. BADJI**,*

*Je remercie infiniment Monsieur le Docteur **Mouloud. AISSANI** pour son aide considérable et ses conseils précieux.*

Je n'oublie de remercier les enseignants de Département Génie mécanique, en particulier ceux de la spécialité science des matériaux, pour m'avoir offert un agréable cadre de formation.

Je souhaiterai également remercier tous mes collègues du Centre de recherche en soudage et contrôle, pour avoir participé à mon travail.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'élaboration de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A ma tendre mère qui m'a été la cause de ma réussite.

A mon très cher père Massoud qui m'a élevé sur la loyauté et l'honnête.

A mes frères, mon adorable sœur et ma femme.

A tous mes collègues particuliers: CHENITI. Bilel, ALLOU. Djilali,

KHAROUBA. Nabil, RAMDANI. Hakim et BELGASSEM. Lila

A tous mes oncles et mes tantes

Ainsi que tous mes amis et mes proches et camarades d'étude

M. BOURABJA

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Schéma du procédé de projection thermique

Figure I.2 : Principe fondamental de la projection thermique

Figure I.3 : Les différentes sources d'énergie en projection thermique

Figure I.4 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre

Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil

Figure I.6 : Schéma de principe de projection à tire contenue (HVOF)

Figure I.7 : Schéma de principe d'un canon à détonation

Figure I.8 : Principe de la projection à arc électrique entre deux fils

Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'une torche plasma

Figure II.1 : Représentation schématique d'un tribosystème

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

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

Figure II.4 : Solide sur un support horizontal

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

Figure II.6: Contact entre deux surfaces rugueuses

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

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

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

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

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

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

Figure III.1 : La forme des différents échantillons réalisés

Figure III.2 : Microscope optique (NICON ECLIPSE LV100ND)

Figure III.3 : Microscope Electronique à Balayage (MEB) de types EDAX

Formatted: Left, Line spacing: Multiple 1,08 li

Formatted: Left, Line spacing: Multiple 1,08 li

Formatted: Font: Italic

Formatted: Font: Not Bold, Italic

Figure III.4 : Profilomètre (Dektak 150 de Veeco.)

Figure III.5: Microduromètre utilisé.

Figure III.36: Schéma global du dispositif d'essai-outil de l'usure

Figure III.74 : Vue de l'ensemble Différents éléments composantes du dispositif conçu

Figure III.8: Schéma de principe d'essai l'usure « plan-plan »

Figure III.9 Fig. : Montage expérimental adopté

Figure III.10 : Balance digitale (SARTORUS)

Formatted: Font: 12 pt, Italic

Formatted: Font: 12 pt, Italic

Formatted: Font: 12 pt, Italic

Formatted: Font: Italic

Figure IV.1 : Observations par MEB de la poudre Cr3C2-25NiCr

Figure IV.2 : Observations par MEB de la poudre T-400

Figure IV.3 : Observations par MEB de la poudre WC-12%Co

Figure IV.4 : Spectre EDAX de la particule dans le Cr3C2-25%(Ni-Cr)

Figure IV.4 : Spectre EDAX de la particule dans le Tribaloy- 400

Figure IV.5 : Microstructures du revêtement pulvérisé

Figure IV.6 microdureté HV0.3 en fonction de distance

Figure IV.7 Essai de rugosité sur les échantillons

Figure IV.8 Essai de rugosité sur l'échantillon WC-12%Co

Figure IV.9 Essai de rugosité sur l'échantillon Cr3C2-25NiCr

Figure IV.10 Essai de rugosité sur l'échantillon Tribaloy – 400

Figure IV.11 Essai de rugosité sur le contre échantillon

Figure IV.12 Essai de rugosité sur l'échantillon contre échantillon Babits

Figure IV.13 La perte de poids (contre échantillon Babits / WC- 12%Co

Figure IV.14 La perte de poids (contre échantillon Babits / Cr3C2-25%NiCr)

Figure IV.15 La perte de poids (contre échantillon Babits /T- 400)

Figure IV.16 Vues macro les striés formées sur le contre-échantillon revêtues (Babits)
(vitesse de rotation fixe : $v= 150$ tr/min, la charge variée).

Figure IV.17 Vues macro les striés formées sur le contre-échantillon revêtues (Babits)
(vitesse de rotation fixe : $v= 360$ tr/min, la charge variée)

Figure IV.18 Vues macro les striés formées sur le contre-échantillon revêtues (Babits)
(vitesse de rotation fixe : $v= 560$ tr/min, la charge variée).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau. I.1 : les principales caractéristiques des techniques de projection thermique.

Tableau. II.1 : Frottement et usure des pièces flottantes à sec.

Tableau. III.1 : ~~composition~~ Composition chimique et propriétés mécanique du substrat (Acier 25 CD4).

Tableau. III. ~~2~~ 32 : composition chimique de la poudre Traibaloy -400

Tableau. III. 4 : composition chimique de la poudre WC 12% Co

Tableau. III. ~~65~~ : Composition chimique de la poudre du contre échantillon.

Tableau. III. 7 : Les paramètres de projection thermique HVOF utilisés.

Tableau. ~~III.87~~ : ~~nomenclature~~ Nomenclature des éléments de l'~~outil~~ dispositif de l'usure

Formatted: Left

Formatted: Tab stops: Not at 3,39 cm

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt

Formatted: Normal, Left, No bullets or numbering, Tab stops: Not at 1,27 cm

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 12 pt

Formatted: Font: (Default) Times New Roman, 14 pt, Bold

Formatted: Font: Not Bold

Formatted: Font: Not Bold

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
-----------------------------	----

Chapitre I : Projection Thermique

I.1 Introduction	03
I.2 L'invention	03
I.3 Principe du procédé	04
I.4 Définition et principe de la projection thermique	05
I.5 Techniques de projection thermique	06
I.5.1 La projection à la flamme	06
I.5.1.1 La projection flamme-poudre	06
I.5.1.2 La projection flamme-fil	07
I.5.2 Flamme hypersonique (communément désignée par l'acronyme anglais HVOF: High Velocity Oxyfuel Flame)	08
I.5.3 Canon à détonation	09
I.5.4 La projection à l'arc électrique	10
I.5.4.1 La projection à arc électrique entre deux fils	10
I.5.4.2 La projection plasma	11
I.6 Caractéristiques des différents procédés de projection thermique	12

Chapitre II : Elément tribologie

II.1 Introduction	13
II.2 Définition	13
II.3 Système tribologique	14
II.4 Circuit tribologique	14
II.5 Paramètres fonctionnels	15
II.5.1 Mode de contact	15

II.5.2	La charge du contact	16
II.5.3	La vitesse du contact	16
II.5.4	Etats de surface	16
II.5.5	Environnement	17
II.5.6	Matériaux	18
II.6	Frottement	18
II.6.1	Définitions et notations	18
II.6.2	Lois empiriques du frottement	19
II.6.3	Types de frottement	20
II.6.3.1	Frottement sec	20
II.6.3.2	Frottement hydrodynamique	21
II.6.3.3	Frottement onctueux	21
II.7	L'usure.....	21
II.7.1	Définitions	21
II.7.2	Mécanismes d'usure	22
II.7.2.1	L'usure par transfert ou adhésion	22
II.7.2.2	Usure érosive	23
II.7.2.3	L'usure par fatigue	24
II.7.2.4	L'usure par réactions tribochimiques	25
II.8	Evaluation de l'usure	26

Chapitre III : Protocoles expérimentaux

III.1	Introduction	28
III.2	Matériaux	28
III.2.1	Substrat	28
III.2.2	Revêtement des échantillons	29
III.2.3	Revêtement du contre échantillon	29
III.3	Projection thermique par le procédé 'HVOF'	30
III.4	Caractérisations microstructurales	31
III.4.1	Analyse par microscope optique (MO)	31
III.4.2	Examen au MEB (Microscope Electronique à Balayage)	31

III.4.3 Analyse de rugosité	32
III.4.4 Microdureté	33
III. 5 Conception et réalisation du dispositif d'essai d'usure	33
III.5.1 Présentation du dispositif	33
III.5.2 Conception du dispositif	34
III.5.3 Caractéristiques de dispositif d'usure réalisé	35
III.5.4 Principe de fonctionnement	35
III.5.5 Paramètres de l'essai	38

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1 Introduction	40
IV.2 Analyse microstructurale	40
IV.2.1 Observation des poudres	40
IV.2.1.a. carbure de chrome (Cr ₃ C ₂ -25%NiCr)	40
IV.2.1.b. Tribaloy (T- 400)	42
IV.2.1 c. (WC-12% Co)	44
IV.2.3 Analyses microscopiques	44
IV.3 mesure de microdureté	45
IV.4 Essai de Rugosité	47
IV.5 Essai de l'usure	50
Conclusion générale	55
Référence bibliographie	57

Introduction



INTRODUCTION

La réparation est l'un des moyens sur lesquels s'appuie un programme de maintenance, elle permet de prolonger la durée de vie d'un équipement, d'augmenter ses performances, et de pallier aux problèmes imprévus dans le programme de maintenance prévu.

Dans le cas des composants de turbines à gaz industrielles réparés par Sonatrach (DMN) et par l'entreprise « Maintenance des Equipements Industrielles » (MEI) de Sonelgaz, il a été constaté que l'usure des surfaces à savoir celle des arbres, est le problème majeur des composants concernés par la réparation. La réparation des surfaces usées s'effectue par des revêtements électrolytiques, ce qui engendre des problèmes liés à la santé publique et à l'environnement, ainsi que des problèmes de limitations techniques liées à l'augmentation des performances des turbines actuelles par rapport aux nouvelles générations.

Ayant déjà proposé des techniques de remplacement du chromage dur par des techniques par voie sèche, notamment par projection thermique HVOF ; et ayant déjà sélectionné des matériaux candidats pour ce remplacement. Nous nous proposons dans le présent travail d'étudier l'usure de ces revêtements dans des conditions similaires à celles utilisées pendant le service, à savoir le matériau des paliers et les paramètres de vitesses et de charges.

A cet effet, des revêtements de Babits ont été réalisés par projection thermique HVOF et serviront comme contre échantillons dans les essais d'usure. Pour cela, une étude de conception et de réalisation d'un dispositif spécifique à l'essai d'usure type « plan-plan » sera mise en œuvre, permettant de mettre en évidence le comportement à l'usure des matériaux de revêtements sélectionnés et leur résistance vis à vis au contre échantillon en Babits, ainsi que la technique entreprise (HVOF) pour le remplacement du chromage dur.

Dans ce cadre, le mémoire de ce travail est organisé selon quatre chapitres :

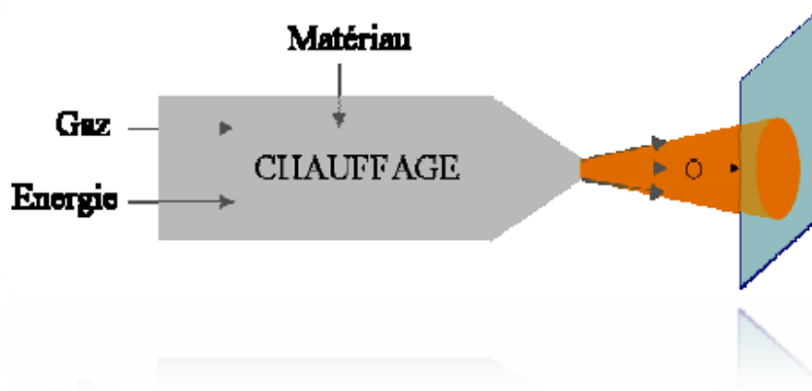
- Dans le premier chapitre, on présente une étude bibliographique concernant les différentes techniques de projection thermique et leurs principes.
- Le deuxième chapitre montre des généralités du domaine de la tribologie qui concerne des notions générales sur le frottement et sur l'usure ; suivies d'une description du mécanisme de l'usure et du frottement.

- Le troisième chapitre traite la description des méthodes expérimentales ainsi que les moyens d'analyses utilisés dans notre travail.
- Le dernier chapitre montre les différents résultats obtenus et les interprétations.

Ce travail est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre "I"

Projection thermique



CHAPITRE I

PROJECTION THERMIQUE

I.1 INTRODUCTION

Le développement des traitements de surface est un domaine prioritaire dans la mise en œuvre des matériaux, qui a pour objectif d'améliorer la résistance à la corrosion, la résistance à l'usure et à la fatigue thermique ou encore l'aspect esthétique.

La mise en place des couches protectrices, chimiquement inertes ou mécaniquement résistantes peut donc, en consommant des faibles quantités de matière éventuellement chère, modifier profondément les caractéristiques de la surface traitée, par conséquent allonger la durée de vie du matériau.

Le dépôt protecteur concerné par cette étude a été réalisé par la technique de projection thermique avec haute vitesse HVOF. Nous allons situer dans ce chapitre cette technologie par rapport aux autres techniques de projection thermique, puis nous détaillons les principaux paramètres de ce procédé et leur influence sur la formation des dépôts.

Enfin, nous concluons ce chapitre par une brève description des propriétés des dépôts qui seront le sujet de notre étude.

I.2 L'INVENTION

La première utilisation de la projection thermique remonte au début du 20ème siècle, en Suisse. M.U. Schoop eut l'idée d'utiliser un chalumeau oxyacétylénique pour projeter un métal à bas point de fusion sur un substrat. Cette technique s'est développée sous le nom de schoopage et était utilisée pour protéger des pièces en acier par des revêtements de zinc et d'aluminium. Depuis, la projection thermique a donné lieu à de très nombreux développements ayant pour objectif d'étendre le champ d'application de la technique à de nouveaux matériaux et d'améliorer certaines propriétés des revêtements. Quelques dates ont particulièrement marqué la projection thermique.

- 1911 : Utilisation de la projection à l'arc électrique par M.U. Schoop
- 1951 : Invention de la projection plasma
- 1955 : Naissance du canon à détonation

- 1975 : Création de la projection plasma sous faible pression de gaz inerte
- 1983 : Début de la projection à la flamme rapide (HVOF)
- 1991 : Emergence de la projection plasma sous gaz neutre à pression supérieure à la pression atmosphérique (système CAPS)
- 1993 : Prise de brevet du procédé PROTAL
- 1995 : Développement de la projection froide ou "cold spray"

Aujourd'hui, la projection thermique est utilisée dans de nombreux secteurs industriels : L'automobile pour revêtir des cylindres de blocs moteurs; l'aéronautique dans la réalisation de barrières thermiques et les biotechnologies avec l'élaboration de prothèses de hanches.

La projection thermique regroupe une série de procédés pour lesquels le matériau à déposer est introduit dans une source de chaleur (pouvant entraîner la fusion du matériau).

Un gaz est simultanément éjecté, permettant d'accélérer le matériau fragmenté en le confinant pour qu'il vienne impacter le substrat et construire le dépôt par empilement. Le matériau à projeter peut se présenter sous des formes diverses, la source de chaleur peut, elle aussi, être de différentes natures. Elle sera détaillée lors de la description de chaque type de projection [1].

La projection thermique est donc un terme générique qui inclut, entre autres, la projection par plasma, la projection à la flamme rapide mais aussi par extension, la projection à froid, ou "cold spray" et la projection à l'arc électrique.

I.3 PRINCIPE DU PROCEDE :

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 (Fig. I.1).

La morphologie et les propriétés des dépôts dépendent de nombreux paramètres expérimentaux, relatifs principalement à :

- La nature du matériau à projeté,
- La source de chaleur,
- L'atmosphère environnante,
- Le substrat.

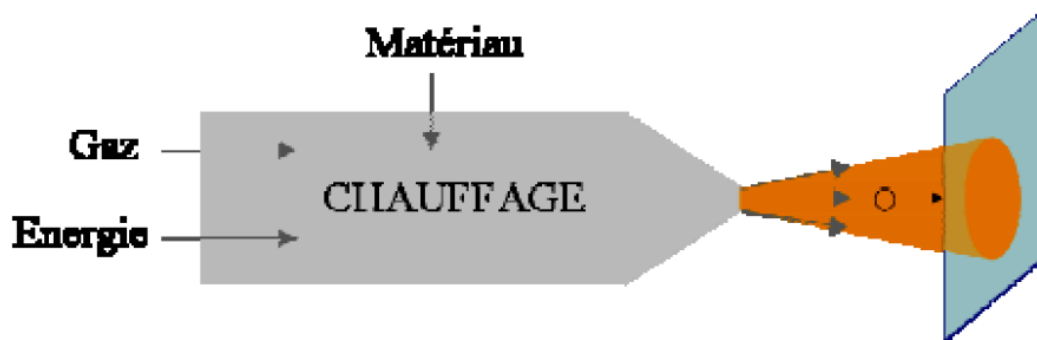


Figure I.1 : Schéma du procédé de projection thermique [1].

I.4 DEFINITION ET PRINCIPE DE LA PROJECTION THERMIQUE

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés grâce auxquels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique grâce à une source de chaleur, puis est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie.

La surface de base ne subit aucune fusion et l'adhérence du dépôt est généralement mécanique. La figure I.2 présente le principe général de la projection thermique : la matière à déposer, sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette est fondue totalement ou partiellement dans une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma). Un gaz vecteur permet une pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir [2].

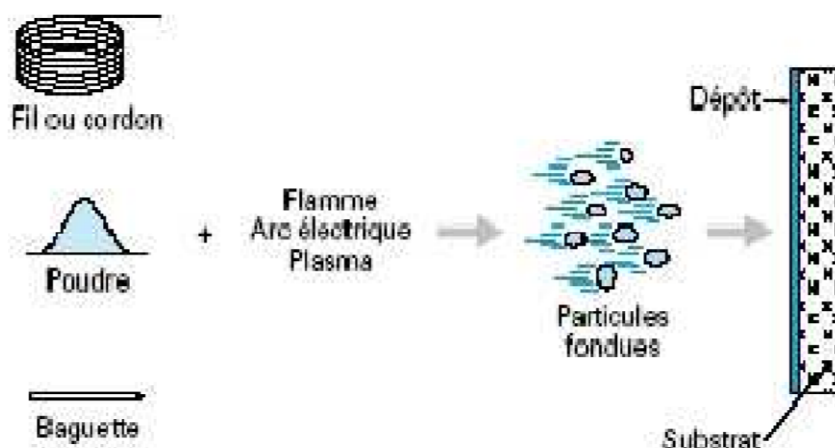


Figure I.2 : Principe fondamental de la projection thermique [2]

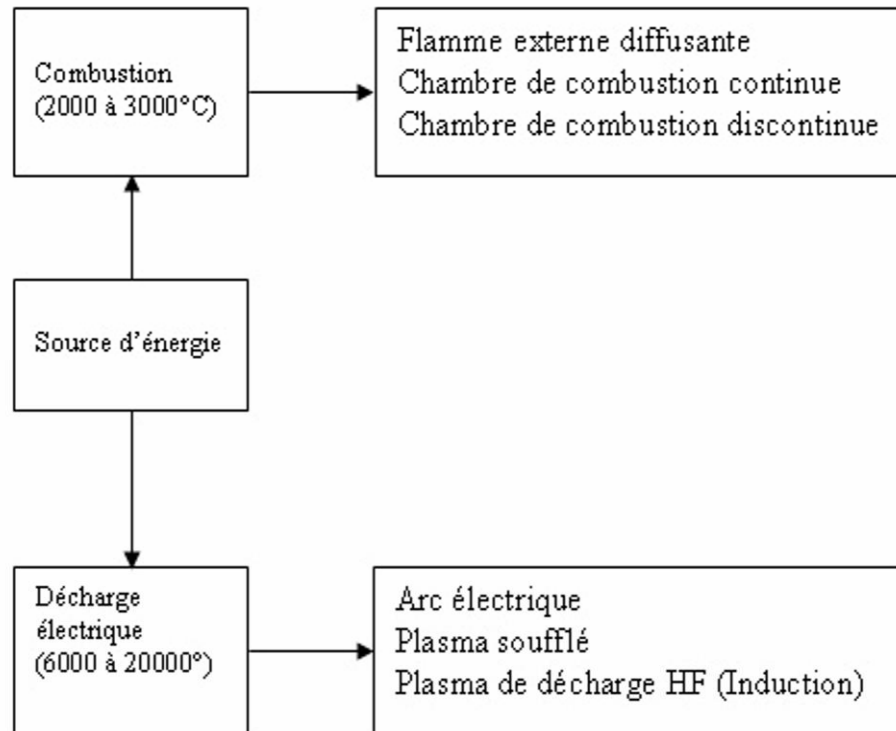


Figure I.3 : Les différentes sources d'énergie en projection thermique [3].

I.5 TECHNIQUES DE PROJECTION THERMIQUE :

I.5.1 La projection à la flamme

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de la projection flamme. Les mélanges les plus utilisés sont : oxypropane, oxyacétylène qui donne des flammes oxycombustible à des températures de 2800°C, 3100°C respectivement. Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2800°C, et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme [2].

I.5.1.1 La projection flamme-poudre

Le matériau d'apport est introduit sous forme de poudre dans la flamme oxycombustible où il est accéléré grâce à l'énergie cinétique transmise essentiellement par le gaz porteur ou le gaz de soufflage de combustion [4].

La poudre à projeter peut être un métal pur, un alliage, un composite, un cermet ou certaines céramiques à bas point de fusion. La température de fusion des matériaux utilisés doit être inférieure à 0,6 à 0,7 la température de la flamme ($T_{\text{fusion}} = 0,60,7 T_{\text{flamme}}$).

En raison de la faible vitesse d'impact des particules projetées, de l'ordre de 30 à 50 m/s, les dépôts obtenus ont une faible adhérence (de l'ordre de 20 à 40 MPa) et une porosité relativement élevée (10 à 20%). Les matériaux les plus utilisés sont les alliages auto fusibles (alliages à base de Ni ou Co contenant du bore et/ou du silicium et les alliages à bas point de fusion. Pour les alliages auto-fusibles, la refusions et la liaison du dépôt avec le substrat, sont obtenues par un post-traitement de chauffage après projection. Les dépôts refondus sont denses et presque sans porosité. De plus, les oxydes sont éliminés grâce au bore et au silicium sur lesquels l'oxygène se fixe préférentiellement et qui diffusent ensuite vers la surface du fait du gradient de température [5].

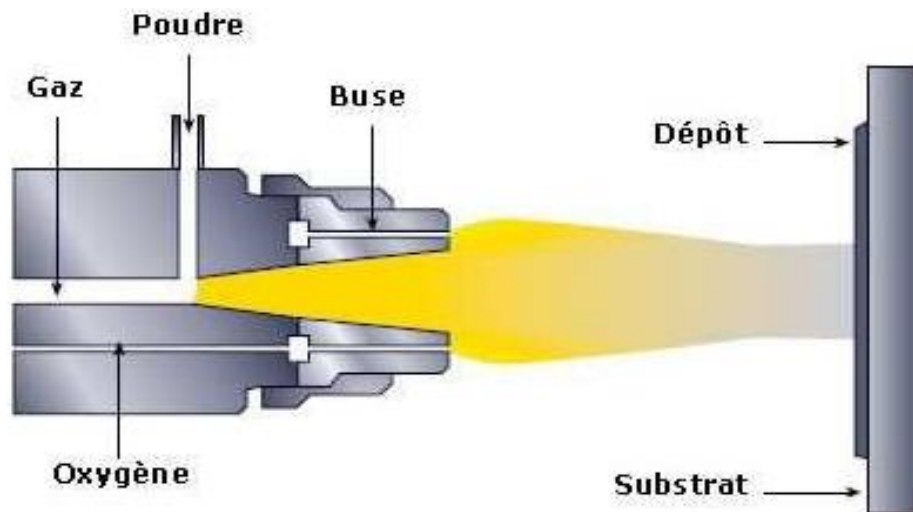


Figure I.4 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre [5].

I.5.1.2 La projection flamme-fil

Le matériau est conditionné sous forme de fil ou de tige et entraîné dans la flamme par des rouleaux placés à l'arrière de la torche. Ces rouleaux sont actionnés par un moteur électrique ou un moteur pneumatique. Une fois l'extrémité de la tige ou du fil fondue dans la flamme, un courant d'air comprimé l'atomise et projette les particules sur la surface du substrat à une vitesse pouvant atteindre 150 m/s. Les taux horaires de déposition varient de 1 à 30 kg/h selon le type du matériau projeté et le diamètre des fils ou des baguettes utilisés [6].

La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme ($T_{\text{fusion}} = 0,95 T_{\text{flamme}}$). L'épaisseur des dépôts varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres.

Cette technique permet de projeter des métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Ni, Mo), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques (Al₂O₃, Al₂O₃- TiO₂, ZrO₂ avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguettes. [6]

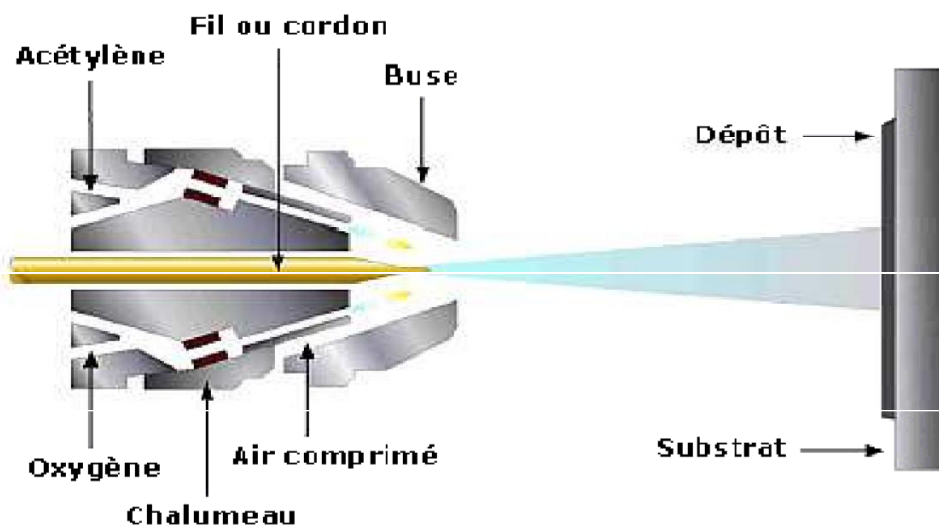


Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil [6].

I.5.2 Flamme hypersonique (communément désignée par l'acronyme anglais

HVOF: High Velocity Oxyfuel Flame)

Ce procédé utilise la combustion sous pression d'un carburant sous forme gazeuse (propane, propylène, acétylène, hydrogène) ou liquide (kérosène) avec de l'oxygène ou éventuellement de l'air en particulier pour le kérosène. Les gaz de combustion pénètrent dans la chambre de combustion à des pressions allant jusqu'à 1 MPa ce qui augmente légèrement la température de combustion [5].

La chambre est refroidie par une circulation d'eau. La flamme est ensuite accélérée dans une tuyère et acquiert à la sortie de celle-ci une vitesse supersonique. La poudre à projeter est soit propulsée sous pression dans l'axe du jet (injection en amont de la tuyère) soit injectée au voisinage en aval de la tuyère à une pression proche de la pression atmosphérique. Les vitesses acquises par les particules peuvent atteindre 60 à 70 m/s et les dépôts réalisés présentent une bonne adhérence (de 70 à 100 MPa) et une faible porosité (2%). Les matériaux projetés sont essentiellement des cermets (WC-Co, Cr₃C₇-NiCr), des métaux, des alliages métalliques auto fusibles ou non [4].

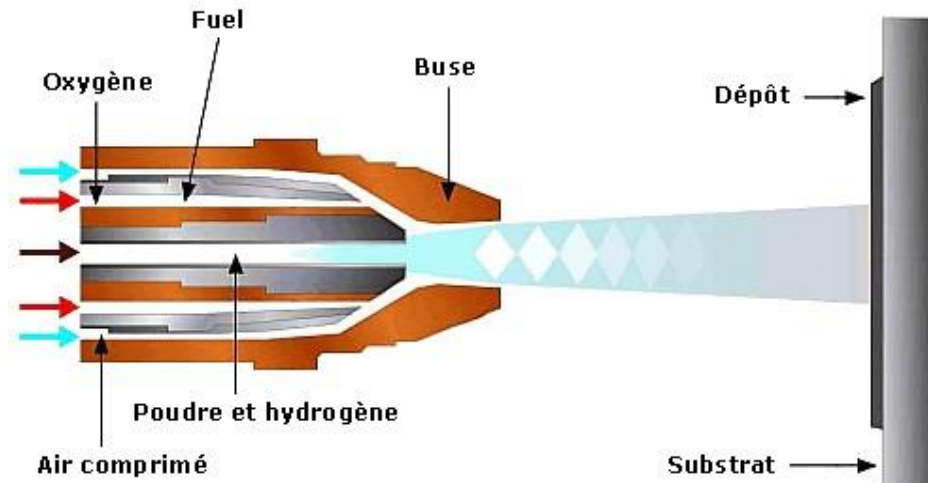


Figure I.6 : Schéma de principe de projection à tire contenue (HVOF) [5].

I.5.3 Canon à détonation

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport sous forme de poudre, dans un tube fermé à une extrémité, en même temps que les gaz de combustion (généralement oxygène et acétylène). Ce mélange détoure grâce à une étincelle, les gaz brûlés sont balayés par de l'azote et les gaz explosifs frais réinjectés à la fréquence de 6 à 60 allumages par seconde. La poudre est chauffée et éjectée à très grande vitesse (950m/s) par l'onde de choc qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa.

Le régime de projection est discontinu. Les particules impactent dans un état plastique donc avec une oxydation très faible (moins de 0,1 % en poids). La densification du dépôt est excellente compte tenu de la vitesse d'impact [7].

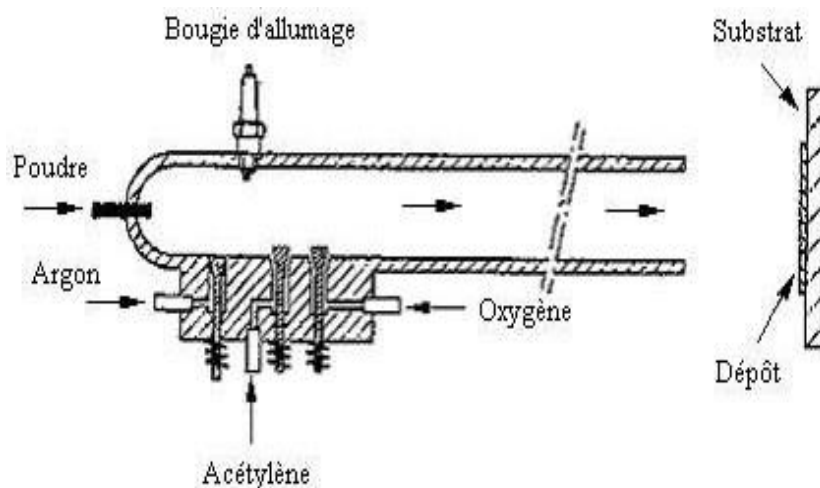


Figure I.7 : Schéma de principe d'un canon à détonation [7]

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts très denses (porosité inférieure à 1%), avec une adhérence élevée (souvent supérieure à 80 MPa) et une rugosité faible ($Ra = \pm 3\mu\text{m}$). Les taux de dépôt sont compris entre 2 et 5 kg/h. Il est, cependant, peu répandu du fait de la complexité et du prix du matériel. Les revêtements par canon à détonation sont réservés aux pièces techniques nécessitant une qualité de dépôt optimale. Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de chrome ou de tungstène avec un liant métallique (Ni ou Co), l'alumine et l'oxyde de chrome. Une des principales applications de cette technique est la protection de rouleaux d'imprimerie par le cermet WC-Co et le revêtement de têtes de foreuses [7].

I.5.4 La projection à l'arc électrique

I.5.4.1 La projection à arc électrique entre deux fils

Le principe consiste à créer un arc entre deux fils métalliques agissant en tant que deux électrodes. Un jet d'air comprimé, situé dans l'axe du point de création de l'arc, propulse le métal fondu sur le substrat (Figure I.8).

L'un des avantages de ce procédé est que les deux fils de nature différente peuvent être utilisés simultanément pour produire un pseudo alliage.

Les principales applications de la technique de projection à l'arc sont les revêtements résistants à la corrosion (zinc, aluminium).

Les propriétés des dépôts obtenus sont meilleures que pour la projection à la flamme, en raison d'une vitesse de particule plus élevée [5].

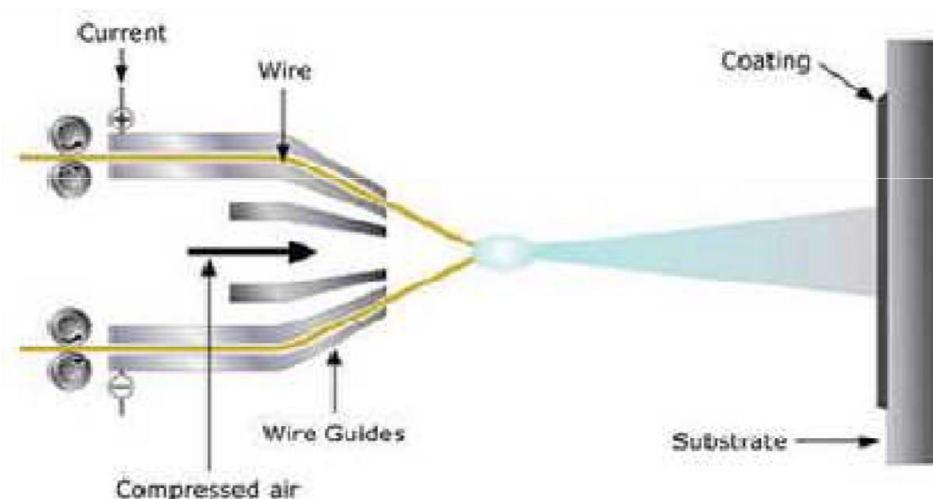


Figure I.8 : Principe de la projection à arc électrique entre deux fils [5].

I.5.4.2 La projection plasma

Le plasma est considéré comme le 4ème état de la matière. C'est un gaz ionisé constitué de molécules, d'atomes, d'ions et d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre. Un plasma Ar/H₂ sera ainsi constitué des espèces suivantes : Ar, H, H⁺, Ar⁺, e⁻.

Le procédé de projection plasma utilise comme source thermique un arc électrique éclatant entre une cathode et une anode dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général. Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (12000 Co), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée comprises entre 800 et 1200 m/s, suivant la densité du plasma et la nature des gaz. 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. Ce qui permet d'obtenir une bonne fusion et un bon étalement des particules à l'impact, qui elles, sont projetées à des vitesses de l'ordre de 200 à 250 m/s sur le substrat (Figure I.9) [5].

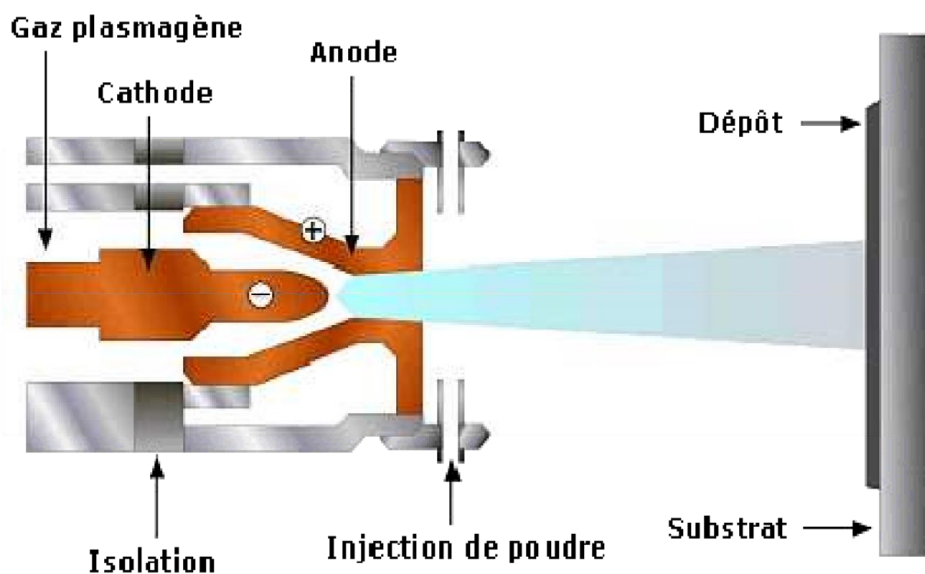


Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'une torche plasma [5].

I.6 Caractéristiques des différents procédés de projection thermique

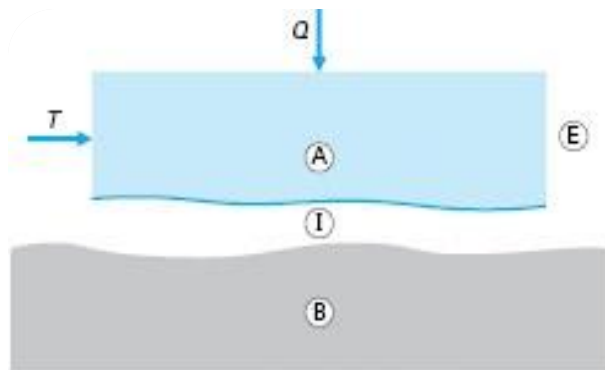
Le tableau ci-dessous résume et compare les principales caractéristiques des techniques de projection thermique [6].

Tableau I.1 : les principales caractéristiques des techniques de projection thermique.

Caractéristiques	Projection flamme	Arc électrique	plasma	HVOF	Canon à détonation
Température de flamme (°C)	3 000	6 000	12 000	3 000	3 000
Vitesse des particules (m/s)	40 à 150	250	200	700	950
Taux horaire de dépôt (Kg/h)	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement moyen (%)	50 à 70	80	70	70	70
Taux de porosité (%)	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0.5 à 2	0.5 à 2
Force d'adhérence (MPa)	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Épaisseur déposée (mm)	0.1 à 1.5	0.2 à 3	0.05 à 1.5	0.05 à 1	0.0.5 à 1

Chapitre "II"

Elements tribologies



A, B corps en contact
E environnement
Q charge appliquée
T effort tangentiel

CHAPITRE II

ELEMENT TRIBOLOGIE

II.1 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 interfaces 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 [8].

II.2 DEFINITION

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 [9].

II.3 SYSTEME 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, [10].

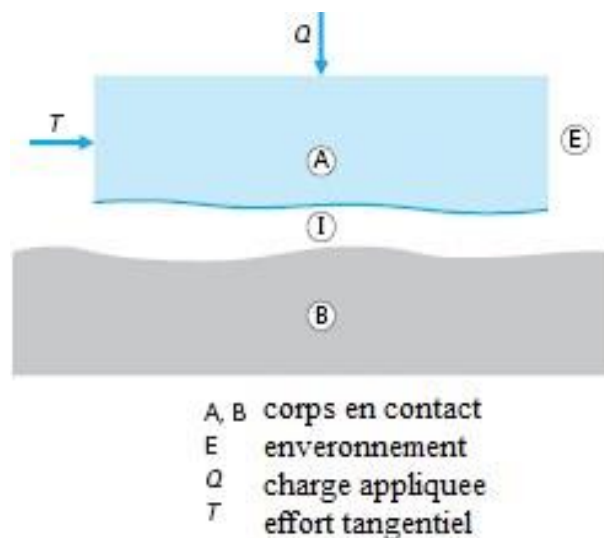


Figure II.1 : Représentation schématique d'un tribosystème [11].

II.4 LE CIRCUIT TRIBOLOGIQUE

Au cours du frottement, les particules du troisième corps sont constamment en mouvement et sont soumis 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 [12], 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 (Fig. II. 2).

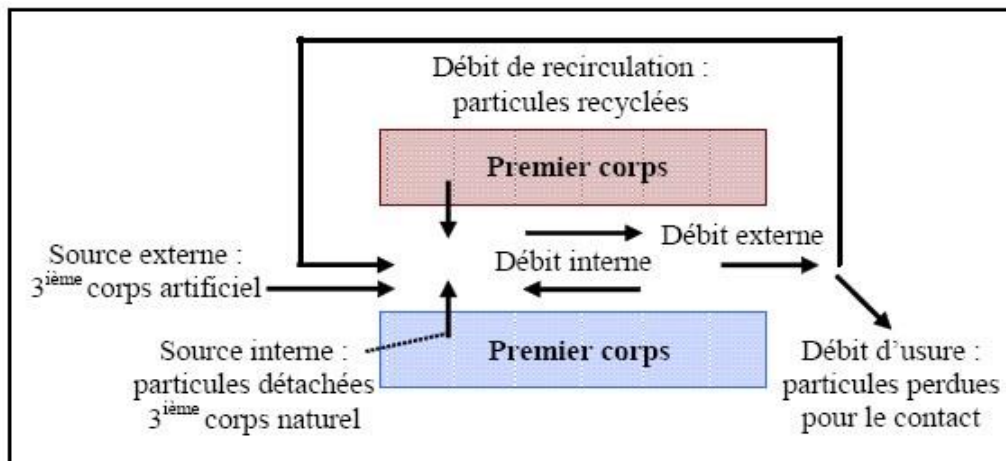


Figure II.2 : Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides [12].

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 [13].

II.5 PARAMETRES 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.5.1 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.5.2 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 [14].

II.5.3 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 [14].

II.5.4 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.

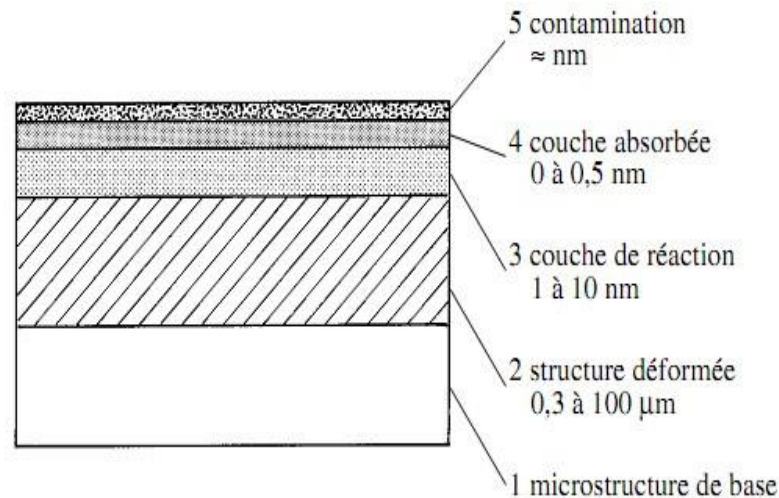


Figure II.3 : Représentation schématique d'une section des couches superficielles d'une surface technique [14].

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 [15].

II.5.5 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 le maintien de films, un milieu neutre limite leur durée, un milieu réducteur la diminue [14].

II.5.6 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 [14].

II.6 LE FROTTEMENT

II.6.1 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 [16].

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 (figure II.4) à son propre poids suivant l'axe (Oy) et subit une force u suivant l'axe (Ox).

Quel que soit le matériau d'un solide, sa surface n'est pas parfaitement lisse, elle est rugueuse, comportant des irrégularités dues à l'usinage de la pièce ou même à sa nature.

Lorsque deux 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 [17].

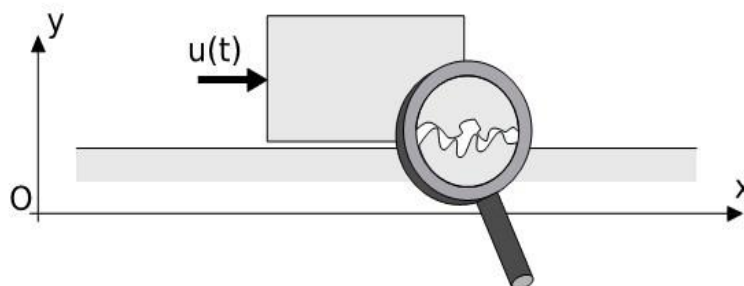


Figure II.4 : Solide sur un support horizontal [17].

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 [18].

II.6.2 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, la 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 quel que soit la surface glissante d'un bloc, son frottement est uniquement proportionnel à son poids [19].

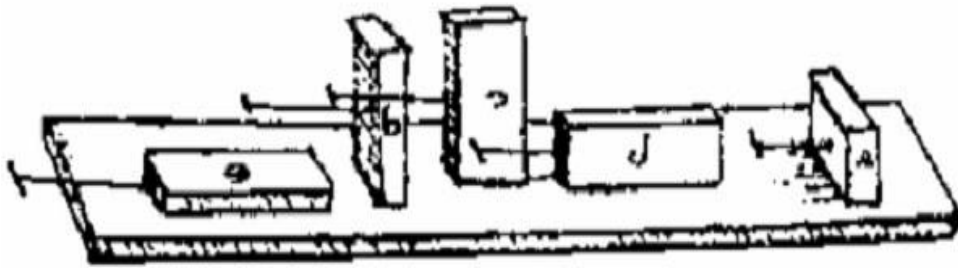


Figure II.5: Gravures originales illustrant les expériences de Léonard de Vinci [19].

Ce résultat très contre-intuitif a défié l'imagination des scientifiques plusieurs siècles avant que Bowden et Tabor [20] 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.

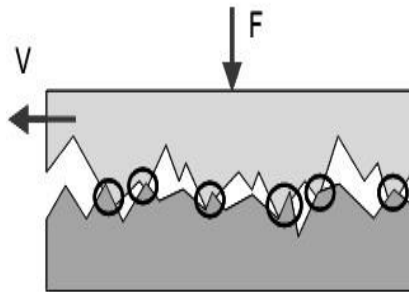


Figure II.6: Contact entre deux surfaces rugueuses [19]

II.6.3 Types de frottement

Il existe trois types de frottement :

II.6.3.1 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 [19].

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 [20] 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 [20].

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

II.6.3.2 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 [21].

II.6.3.3 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 [21].

II.7 L'USURE

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.7.1 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) [22].

Il correspond 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 [23].

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 [24].

II.7.2 Mécanismes d'usure

II.7.2.1 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.1). 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).

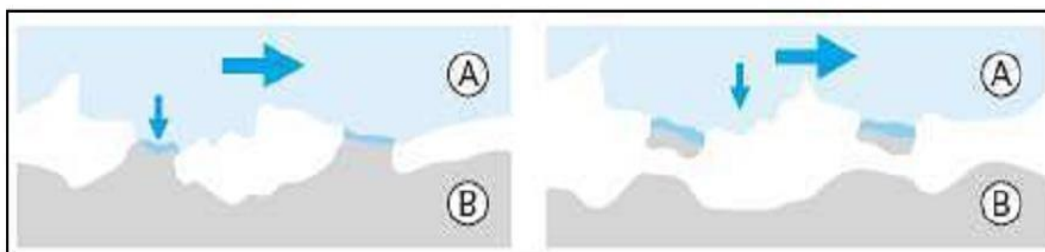


Figure II.7 : Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive d'après [23]

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) [24].

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.2). 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) [24].

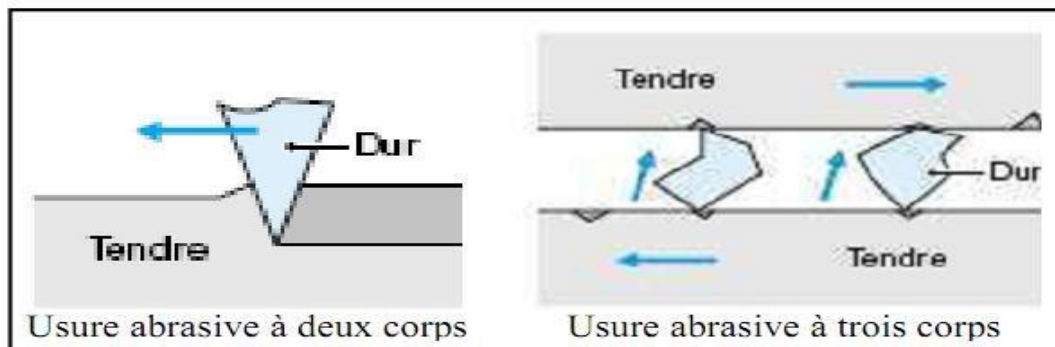


Figure II.8 : Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive d'après [23]

II.7.2.2 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.3).

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.4).

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].

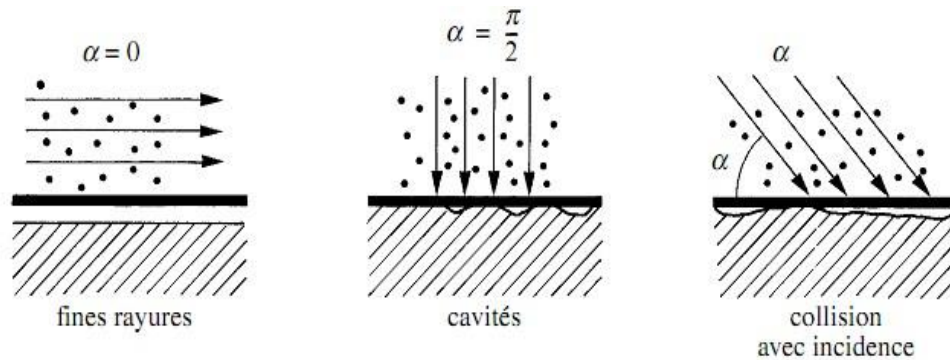


Figure II.9 : Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans un fluide en mouvement [25].

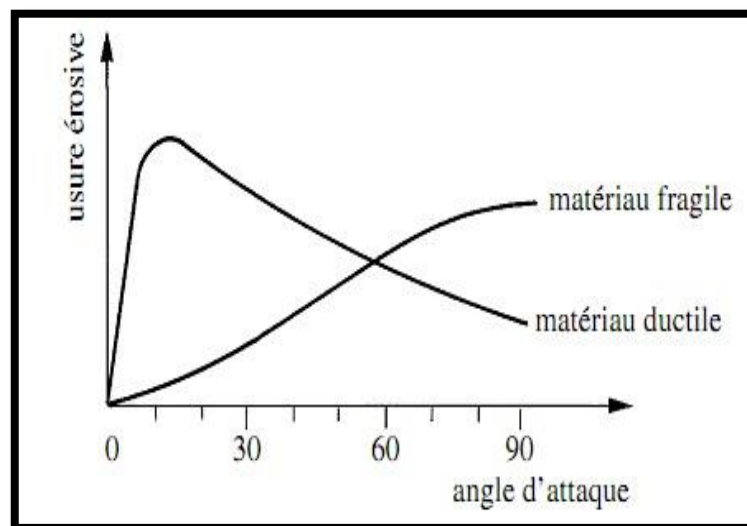


Figure II.10 : Erosion en fonction de l'angle d'incidence des particules [25].

II.7.2.3 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.5).

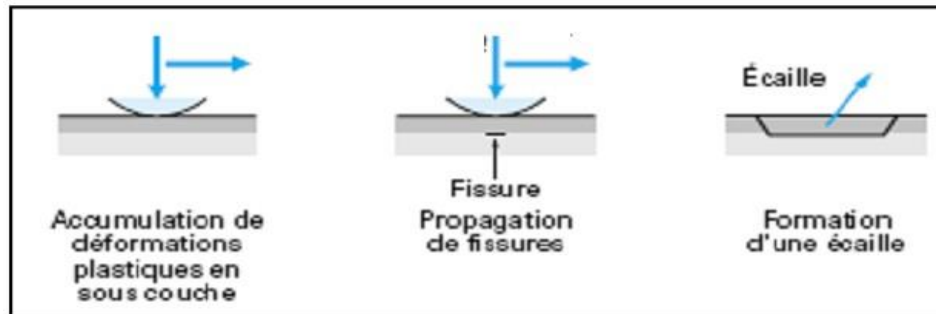


Figure II.11 : Usure par fissuration (cas des matériaux ductiles) d'après [23]

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.6). Il s'agit d'une usure par fracturation [23].

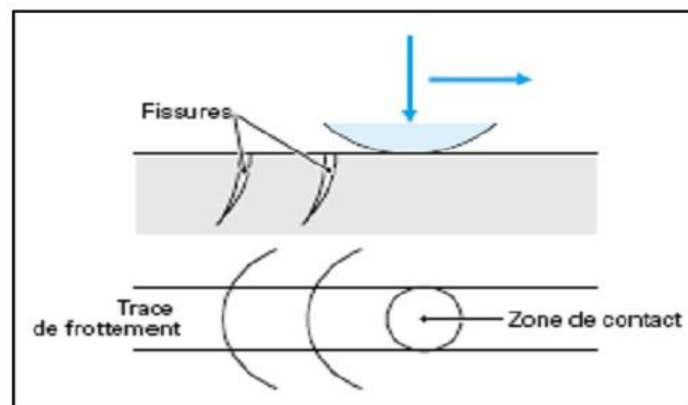


Figure II. 12 : Usure par fissuration (cas des matériaux fragiles) d'après [23]

II.7.2.4 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 [23].

II.8 Evaluation de l'usure

En 1953, Archard 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 :

$$V = k \cdot \frac{Fn}{Pm} \cdot d \quad (II5)$$

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

$$V = k \cdot Fn \cdot d \quad (II6)$$

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

II.8 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 [26]. Par ailleurs, la vitesse d'usure k n'est pas inversement proportionnelle à la dureté du matériau Hv comme le prévoient les modèles mécaniques simples d'usure pour lesquels le volume d'usure est proportionnel à l'aire réelle de contact $A_r = \frac{P}{Hv}$; en conséquence; $K' = \frac{VHv}{pL}$ le facteur d'usure n'est pas constant.

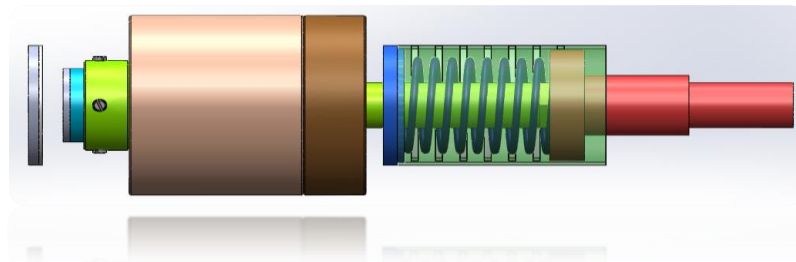
Tableau I.1 : Frottement et usure des pièces flottantes à sec
(Cylindres croisés, $P=4\text{ N}$, $v= 18\text{ m/s}$) [27]

Matériaux (usure et dureté Hv du matériau de droite)	Matériaux antagonistes	μ	Vu/L (cm^2)	$K' = \frac{VHv}{pL} = KHV$
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"

Protocoles expérimentaux



CHAPITRE III

PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

III.1 INTRODUCTION

Cette étude entre dans le cadre de l'amélioration de la durée de vie des arbres de turbine à gaz utilisés dans la pétrochimie de l'industrie. Les essais d'usure type « plan-plan » sont mis en œuvre en réalisant un dispositif spécifique, afin d'étudier le comportement à l'usure des différents revêtements déposés par projection thermique – procédé HVOF.

Les différents moyens et techniques expérimentaux utilisés dans cette étude sont décrits dans ce chapitre.

III.2 MATERIAUX

III.2.1 Substrat

Le substrat utilisé est en acier au carbone faiblement allié (AFNOR 25CD4) de forme cylindrique de 25 mm de diamètre. Ces derniers seront revêtus à chaque fois par une poudre bien spécifiée. Les compositions chimiques et les propriétés mécaniques sont listés dans le tableau suivantes (tableau. 1).

Tableau .III. 1 : Composition chimique et propriétés mécanique du substrat (Acier 25 CD4).

Eléments	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fr
Composition wt. %	0.25	0.25	0.70	1.05	0.25	balance
Propriétés mécanique	Rm (Mpa)			700 / 1000		
	Re (Mpa)			470 / 700		
	A (%)			12 / 15		
	Dureté HRB			20 / 350		

III.2.2 Revêtement des échantillons

Trois différents revêtements (*Tribaloy 400*, *Chrome-Nickel* : $Cr_3C_2-25\%NiCr$, *Carbure Tungstène-cobalt* : $WC12\%Co$) ont été déposés sur nos substrats par projection thermique. Leurs compositions chimiques sont est présentées dans les tableaux 2, 3 et 4 respectivement.

Tableau .III. 2 : composition chimique de la poudre **Tribaloy 400**

Eléments	Co	Cr	Mo	Si	Ni	Fr	P	S
Composition wt%	Balance	8.50	28.69	2.46	<0.50	<0.25	<0.03	<0.03

Tableau .III. 3 : composition chimique de la poudre **$Cr_3C_2-25\%NiCr$**

Eléments	C	Cr	Ni
Composition wt%	9.23	Balance	19.6

Tableau .III. 4 : composition chimique de la poudre **WC 12% Co**

Eléments	Co	WC	C (free)	Fr
Composition wt %	11.4	balance	<0.20	<2.0

III.2.3 Revêtement du contre échantillon

La composition chimique de cette poudre de revêtement à base de zinc (**Babits**) est présentée dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau .III. 5 : Composition chimique de la poudre du contre échantillon.

Eléments	Cu	Pb	Ni	Zn
Composition wt%	balance	1.9	1	8.1

Il est à noter que cette composition est similaire à celle utilisée dans la fabrication des portées de paliers des aubes de turbine à gaz.

III.3 PROJECTION THERMIQUE PAR LE PROCEDE 'HVOF'

Les échantillons m'ont été fourni déjà revêtu. Les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau ci-dessus (tableau 6) [28].

Tableau .III. 6 : Les paramètres de projection thermique HVOF utilisés.

Débit Oxygène (SLPM : Standard Liter Per Minute)	420
Poudre gaz porteur (SLPM)	20
Gaz combustible (méthane) (SLPM)	180
Buse (Nozzle) (in.)	3
Distance de jet (mm)	300

Description des étapes de déposition après préparation des surfaces (sablage, nettoyage).

La déposition des revêtements de 350 μm d'épaisseurs est effectuée en quatre dépôts.

- Echantillon revêtu type I Tribaloy -400 ;
- Echantillon revêtu type II Cr_3C_2 -25%NiCr ;
- Echantillon revêtu type III WC 12% Co ;
- Contre échantillon revêtu par Babits ;

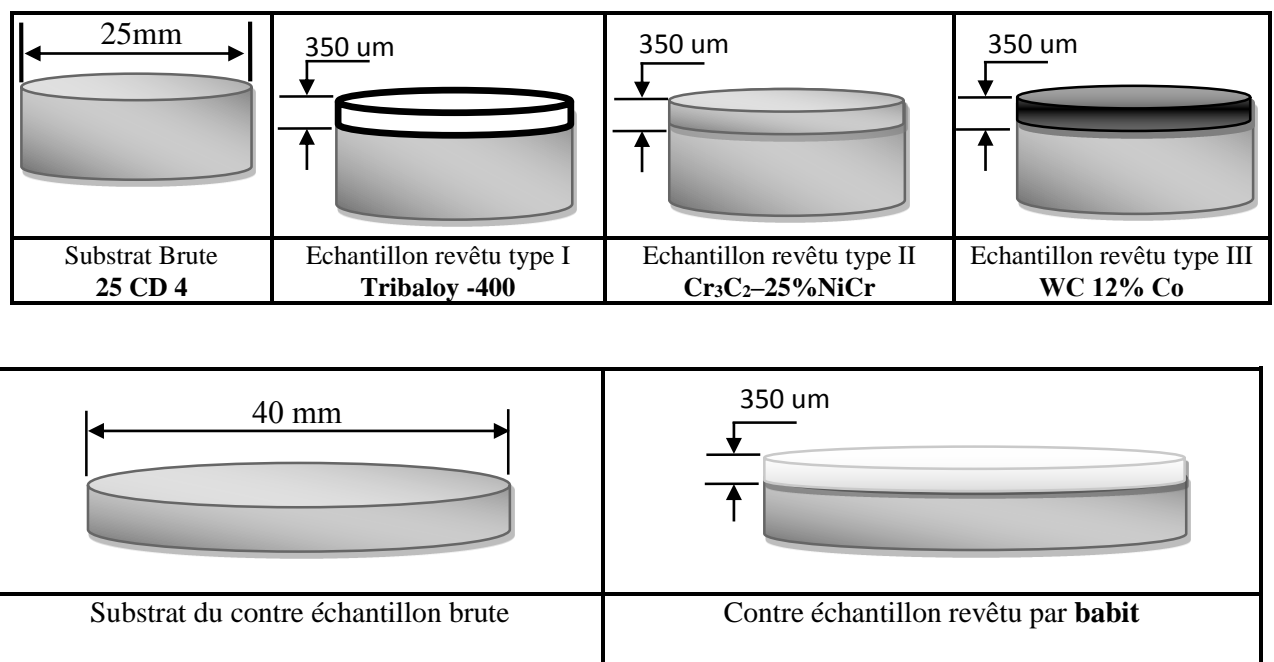


Figure III.1 : La forme des différents échantillons réalisés

III.4 CARACTERISATIONS MICROSTRUCTURALES

Après découpage enrobage et polissage des échantillons revêtus, les échantillons ont subi une analyse microstructurales.

III.4.1 Analyse par microscope optique (MO)

L'analyse a été effectuée au centre de recherche scientifique de soudage et contrôle (CSC) avec un microscope optique de type NICON ECLIPSE LV100ND (Figure III.4), munie d'une caméra à haute résolution.



Figure III.2 : Microscope optique (NICON ECLIPSE LV100ND)

III.4.2 Examen au MEB (Microscope Electronique à Balayage)

Les analyses microstructurales sur Microscope Electronique à Balayage (MEB) de types EDAX (figure III.5), ont été réalisées au niveau du laboratoire de science des matériaux à l'université de BAB Ezzouar. Ce microscope est basé sur le principe du balayage synchrone d'un faisceau d'électrons (moins énergétiques) à la surface de l'échantillon. En chaque point, les électrons secondaires (rétrodiffusés) sont détectés et forment l'image de l'échantillon sur un écran à la résolution demandée (agrandissement).

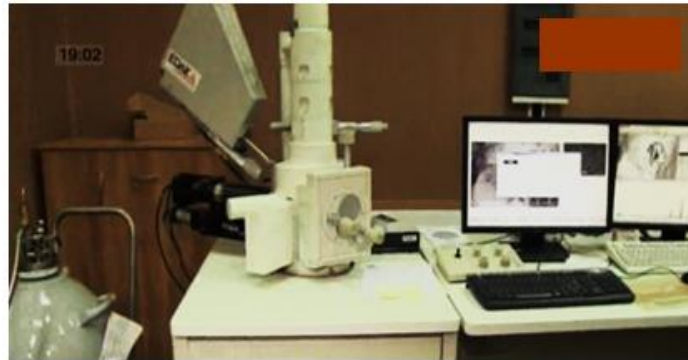


Figure III. 3 : Microscope Electronique à Balayage (MEB) de type EDAX

III.4.3 Analyse de rugosité

Le profilomètre est un instrument utilisé pour mesurer le relief d'une surface (topographie), notamment dans le but d'en évaluer et analyser la rugosité ou la microgéométrie. Le profilomètre (*Dektak 150 de Veeco*, figure III.6) offre une fine résolution verticale maximale de quelques angströms, avec un déplacement vertical maximal de 1mm. Il se prête donc parfaitement à l'analyse des surfaces avec un fort relief et donc il est bien adapté à analyser nos échantillons. Les essais ont été réalisés au laboratoire de génie de l'environnement à l'université de Bejaïa.



Figure III.4 : Profilomètre (Dektak 150 de Veeco.)

III.4.4 Microdureté

L'essai de microdureté a été effectué au centre de recherche scientifique de soudage et contrôle (CSC). La microdureté consiste à utiliser des indenteurs de taille submillimétrique type Vickers. Une filiation de mesure est effectuée le long du diamètre de chaque échantillon. Les empreintes de microdureté sont distantes de 500 μ m.



Figure III.5: Microduromètre utilisé.

III. 5 CONCEPTION ET REALISATION DU DISPOSITIF D'ESSAI D'USURE

III.5.1 Présentation du dispositif

L'étude quantitative de l'usure de revêtement (WC 12% Co, Cr₃C₂-25%NiCr et Tribaloy - 400) nécessite un moyen de mesure spécifique. A cet effet, on a conçu un dispositif mécanique qui permettant d'analyser l'usure de revêtement. Le dispositif conçu est réalisé pour qu'il soit monté sur une machine de perçage verticale. Il est constitué principalement de trois parties:

- Porte échantillon ;
- Module des masses ;
- Porte-outil.

Ce dispositif permet l'analyse d'usure d'un revêtement vis à vis d'un échantillon revêtu en babit, à différentes forces de contact et à une variation des vitesses de rotation.

III.5.2 Conception du dispositif

Notre dispositif est constitué par plusieurs éléments regroupés en trois parties citées précédemment. L'ensemble des éléments sont conçus et dimensionnés auparavant. Chaque élément a suivi un calcul d'RDM et des opérations d'usinage.

Le schéma global du dispositif et l'ensemble de ses éléments sont présentés dans les figures III.6 et 7 ainsi que leurs nomenclatures sont mentionnées sur le tableau 8.

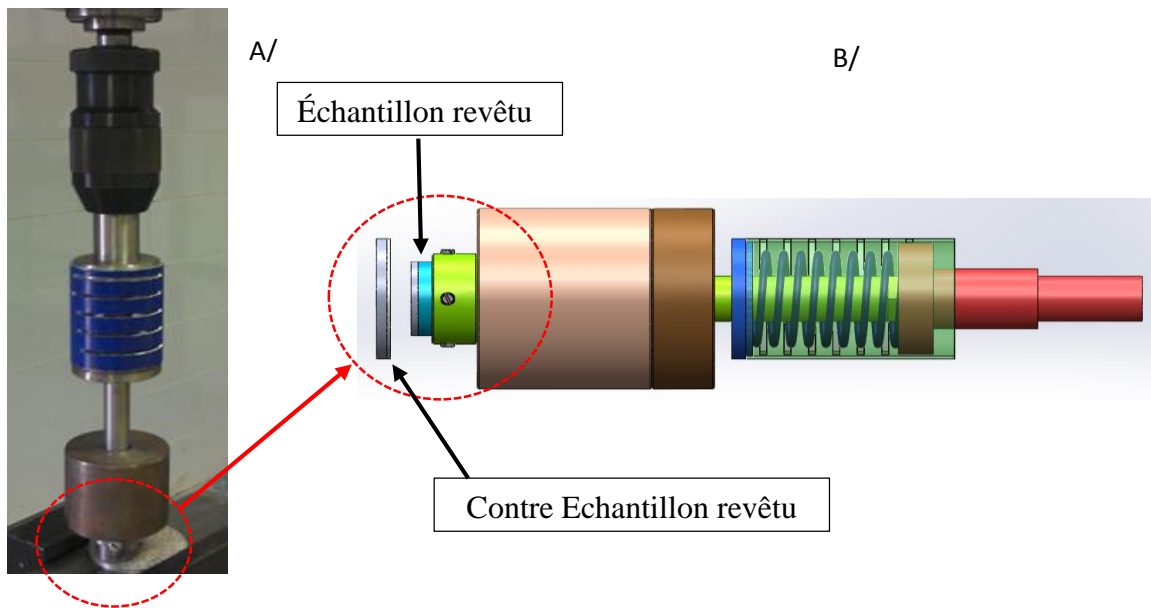


Figure III.6: Schéma global du dispositif d'essai de l'usure :

A/ dispositif réel, B/ dispositif conçu

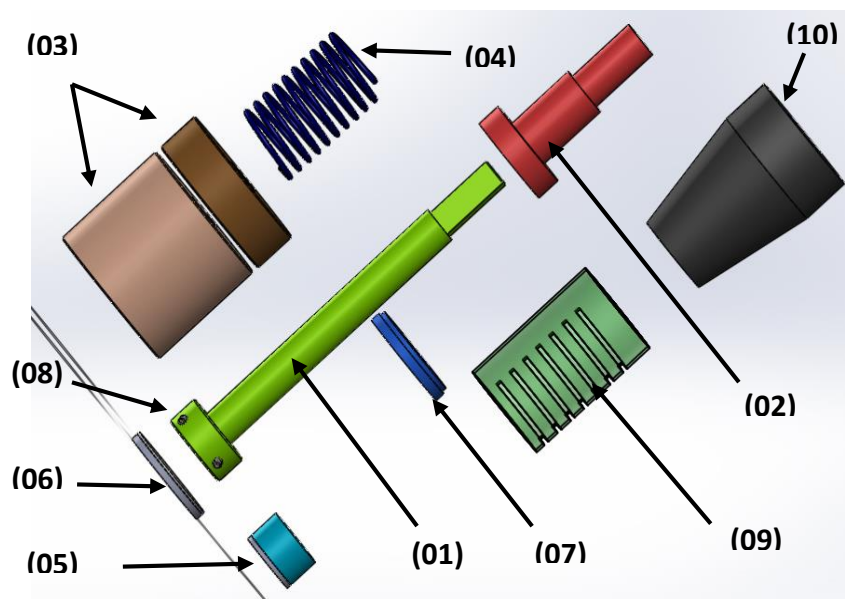


Figure III.7 : composantes du dispositif conçu.

Tableau III.8 : Nomenclature des éléments de l’dispositif de l’usure

N° des pièces	Eléments / pièces	Matériaux	Observation
01	Arbre porte échantillon	E 36	Usiné
02	Sous arbre		Usiné
03	Masses		Usiné
04	Ressort		Achat
05	Echantillons	Voir §III.4.2	Projection thermique
06	Contre Echantillon	Voir §III.4.1	Projection thermique
07	Disque limiteur du ressort		Usiné
08	Vis de fixation		Achat
09	Couvercle		Usiné
10	Mondrian de fixation		Elément de la perceuse

III.5.3 Caractéristiques du dispositif réalisé

Selon les dimensions des échantillons revêtus par projection thermique, nous avons choisi les caractéristiques suivantes de notre dispositif :

- ❖ La longueur de l’arbre porte échantillon : 200 mm ;
- ❖ Le diamètre de l’arbre porte échantillon : 15 mm ;
- ❖ Le diamètre des échantillons : 25 et 40 mm ;
- ❖ Les masses : sont des disques de différent poids (100g, 200g, ...) ;
- ❖ Le ressort de longueur de 80mm (à vide) et de raideur k de : 0.425 N/mm.

Il est à noter que nos essais d’usure prennent une considération. Les variations de charge et des vitesses de rotations des échantillons revêtus par projection thermique. Cette conception simule de manière quantitative, la rotation des arbres par rapport aux portés de palier (fixes) de turbine à gaz industrielle.

III.5.4 Principe de fonctionnement

Le dispositif de test d’usure est monté sur une perceuse verticale. À travers le *Sous arbre* (N°2) qui fixe l’dispositif sur l’axe de la machine (N°10), en lui transmettant la vitesse de rotation, afin de créer au-dessous de dispositif le frottement d’usure entre les surfaces à tester l’élément en rotation c’est revêtu par (WC 12% Co, Cr3C2–25%NiCr et Tribaloy - 400) et le contre échantillon est fixé sur la table de la machine.

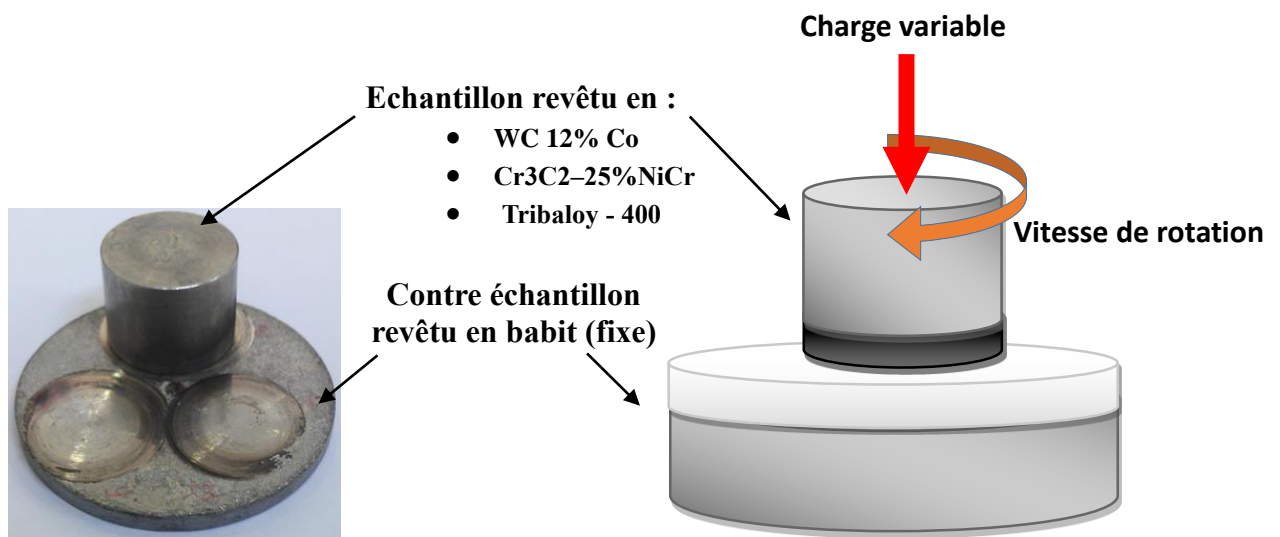


Figure III.8: Schéma de principe d'essai l'usure « plan-plan »

La figure III.9 montre un exemple du montage expérimental sur la machine de perçage (la fixation de le dispositif, les échantillons...) pour le teste d'analyse d'usure.

Une fois la vitesse et la masse de l'essai sont choisies aussi bien la mesure du poids de l'échantillon et son contre échantillon sont effectuées, on fixe ces deux derniers dans leurs places (dans la machine). Puis, on procède au positionnement des deux surfaces à tester (d'échantillons) sous un contact sans effort. Puis, on met le ressort sous une compression à Δl en lui donnant une prés-charge, qui s'applique sur ce contact assurant la bonne liaison entre les surfaces testées.

Avec la masse choisie dans le dispositif et l'effort du ressort (réaction) on obtient l'effort final appliqué sur les surfaces de contact pour générer l'usure.

L'expression qui donne cette force finale est comme suit :

$$F = F_{\Delta l} + M.g \quad \dots(\text{III.1})$$

Tel que : $F_{\Delta l} = k. \Delta l$

k : Constante de raideur du ressort ; Δl : le taux de compression du ressort.

M : Masse d'essai ; g : la pesanteur.

La figure III.12 suivante montre la balance digitale de haute précision utilisée lors la mesure des différentes masses.

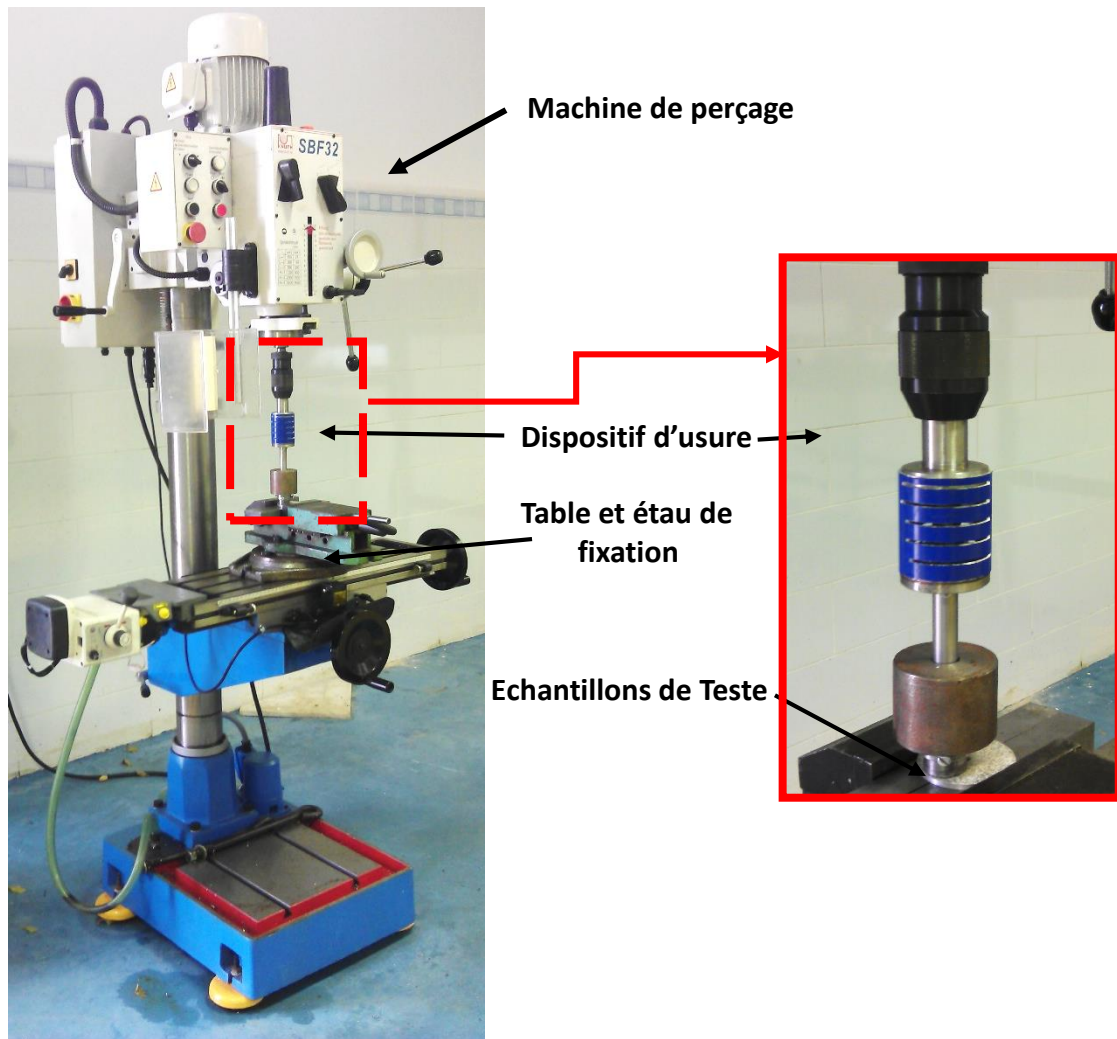


Figure III.9 : Montage expérimental adopté

On met en marche la machine (de perçage) qui fait tourner le dispositif de test d'usure à la vitesse sélectionnée et cela pendant 15min. Avant le teste les échantillons sont pesés.

Une fois le temps de test est achevé, on arrête la machine et on récupère soigneusement les échantillons pour mesurer leur nouveau poids, en utilisant une balance de précision ((figure III.10) à affichage digitale « SARTORUS » dont l'erreur est de l'ordre de 0.01 mg). A partir du premier poids mesuré, on déduit la perte de masse obtenue. Cette perte de masse, traduit d'usure de nos revêtements.

Donc, la perte de masse (Δm) de l'échantillon pour chaque type de matière (dépôt A, B...) est considérée comme un paramètre d'usure évoluant en fonction de la vitesse de rotation V et en fonction de l'effort final exercé F sur l'échantillon.

Cette perte est calculée par l'expression :

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (\text{III.2})$$

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

m_f : la masse finale (g) de l'échantillon après chaque teste d'usure à une vitesse V utilisée.



Figure III.10 : Balance digitale (SARTORUS)

III.5.5 Paramètres de l'essai

Nos essais d'usure ont été effectués sous les paramètres expérimentaux suivants :

- Vitesses de rotation : On a choisie trois valeurs différentes pour chaque échantillon.
 - 150 tr/min ;
 - 360 tr/min ;
 - 560 tr/min.
 - Charges appliquées : On a choisie selon les gammes utilisées dans la tribologie, trois valeurs distinctes :
 - 5N ; 500 g ;
 - 10N ; 1000 g ;
 - 15N. 1500 g ;
 - Durée d'essais : 15 min;
- Contact type surfacique 'S': (Plan/Plan), tel que la section 'S' est de l'ordre de :

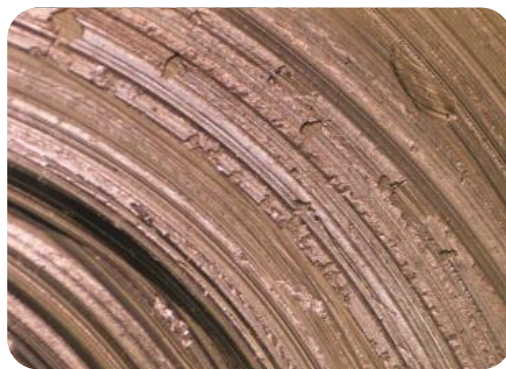
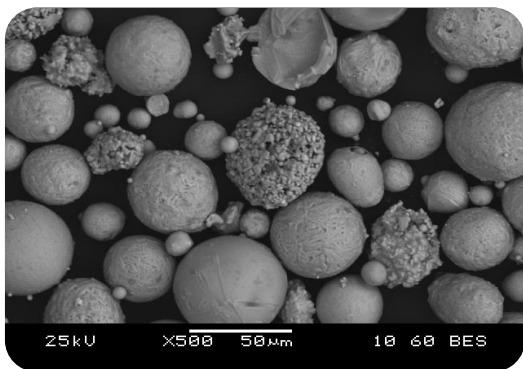
$S = \pi \cdot d^2 = 1963.5 \text{ mm}^2 \approx 2000 \text{ mm}^2$. Tel que : ' d ' est le diamètre de revêtement de l'échantillon.

La variation des paramètres sur-cités nous permet d'étudier l'influence de la variation de vitesse de rotation et de la charge sur le comportement de nos revêtements à la résistance à l'usure. Il est à noter que pour mettre en évidence, l'influence de chacun des paramètres, une vitesse de rotation est fixée et les charges sont variées. Puis une charge est fixée et des vitesses sont variées.

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

Chapitre "IV"

Résultats et interprétations



RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 INTRODUCTION

Nous présentons dans cette partie les résultats issus des analyses microstructurales et des essais de frottements et d'usure des différents revêtements contre des échantillons revêtus en babits.

IV.2 ANALYSE MICROSTRUCTURALE

IV.2.1 Observation des poudres

Afin de mettre en évidence la forme et la taille des grains des poudres utilisées pour les revêtements de nos échantillons, des observations au microscope électronique à balayage se sont avérées nécessaires.

IV.2.1.a. carbure de chrome (Cr_3C_2 -25%NiCr)

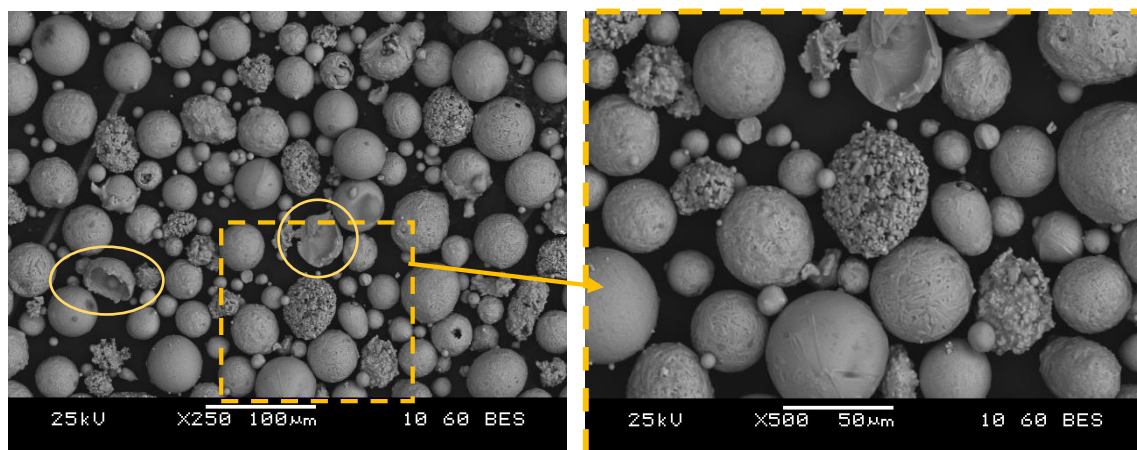


Figure IV.1 : Observations par MEB de la poudre Cr_3C_2 -25NiCr.

L'examen de cette poudre au microscope électronique à balayage a montré l'existence de particules ayant une forme plus ou moins sphérique avec une surface légèrement lisse et d'autres très rigoureuses. Un autre type de particules beaucoup moins répandues a été observé et concerne celles en demi-coquilles.

Ces formes peuvent être liées au procédé de fabrication de cette poudre qui est produite par agglomération et frittage et peut être expliquée par à une fusion totale ou partielle de la phase liante lors de la préparation de la poudre. Il est à noter que le diamètre moyen des particules de cette poudre est de l'ordre de $30 \pm 10 \mu\text{m}$.

En plus de la composition chimique de la poudre fournie par le fabricant, nous avons effectué une analyse ponctuelle de type EDAX pour chaque type de particules à savoir le type lisse et le type rigoureux afin d'établir une comparaison.

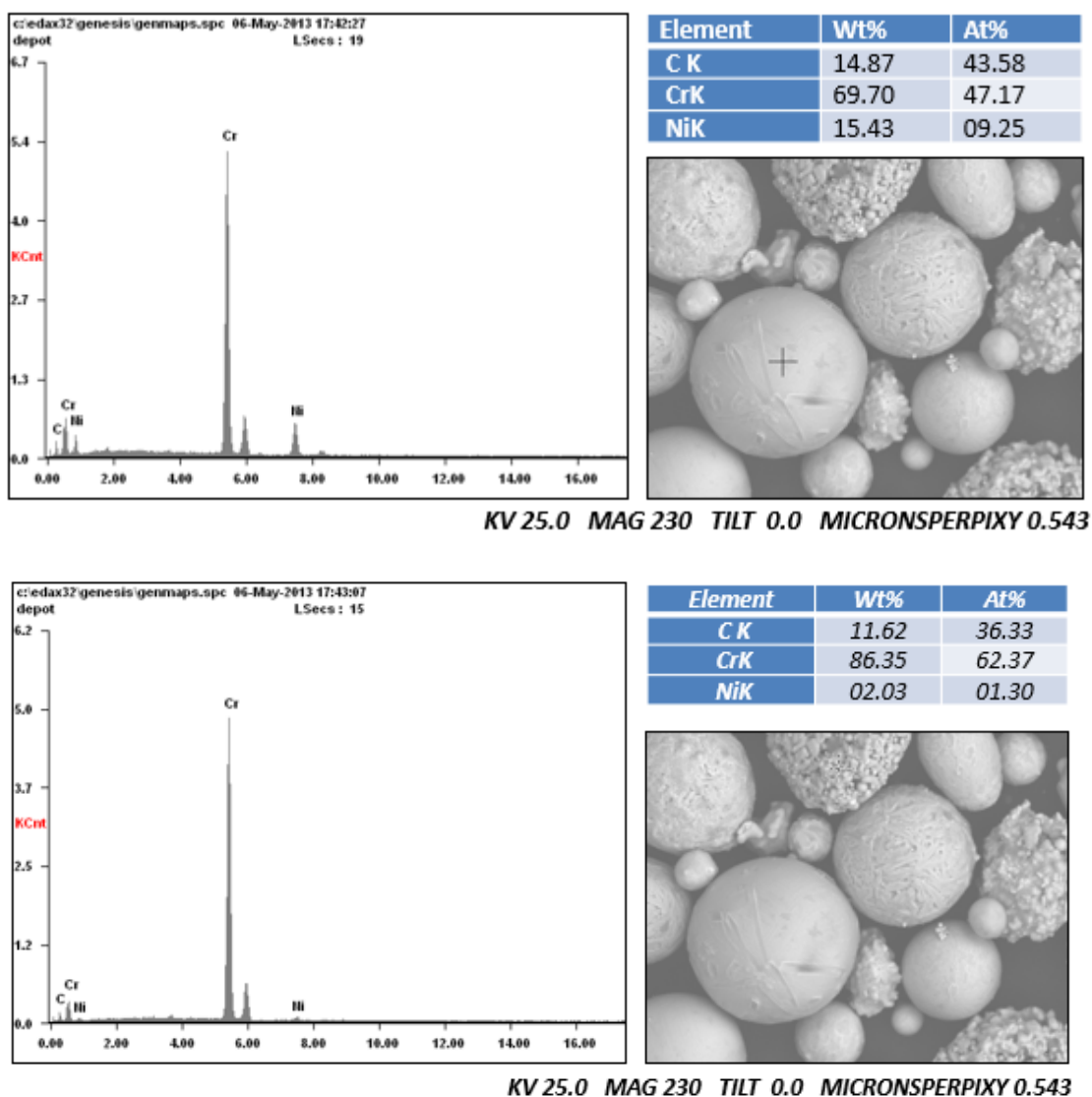


Figure IV.4 : Spectre EDAX de la particule dans le $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\%(\text{Ni-Cr})$

Les spectres issus des analyses EDAX montrent l'existence de pics caractéristiques aux éléments faisant partie de la composition chimique de la poudre ($Cr_3C_2-25\%(Ni-Cr)$) est deux particules observées (lisse et rugueuse). Un pic important, caractéristique d'une quantité substantielle de Cr libre, est observé pour les cas de la poudre. Il est à noter qu'aucune décomposition de la poudre n'a été observée lors de la réalisation des revêtements avec ce type poudre ce qui prouve l'absence de décarburation et l'avantage qu'offre le procédé de projection thermique HVOF par rapport à d'autres procédés. L'absence de tels phénomènes lors de la projection HVOF des cermets compte parmi les grands avantages qu'offre actuellement cette technique.

IV.2.1.b. Tribaloy (T- 400)

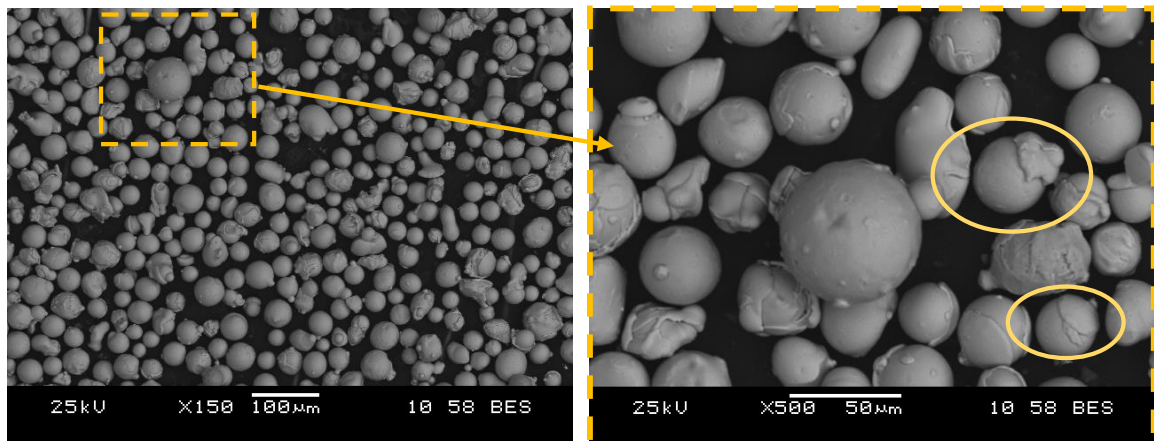


Figure IV.2 : Observations par MEB de la poudre T-400

La figure IV.2 montre aussi deux observations par MEB avec deux agrandissements (150X et 500X) distincts de T-400.

Le Tribaloy[®]-400 (T-400) est un alliage métallique à base de cobalt, très utilisé dans des applications où la lubrification s'avère difficile, et dans un large domaine de température [146]. L'analyse EDAX de la poudre a révélé l'existence de pics caractéristique aux éléments cobalt et chrome. La projection HVOF de la poudre agglomérée et frittée, a permis la construction de revêtements de structure lamellaire typique de couches superposées.

Le diamètre moyen des particules est de l'ordre de $40 \pm 10\mu m$.

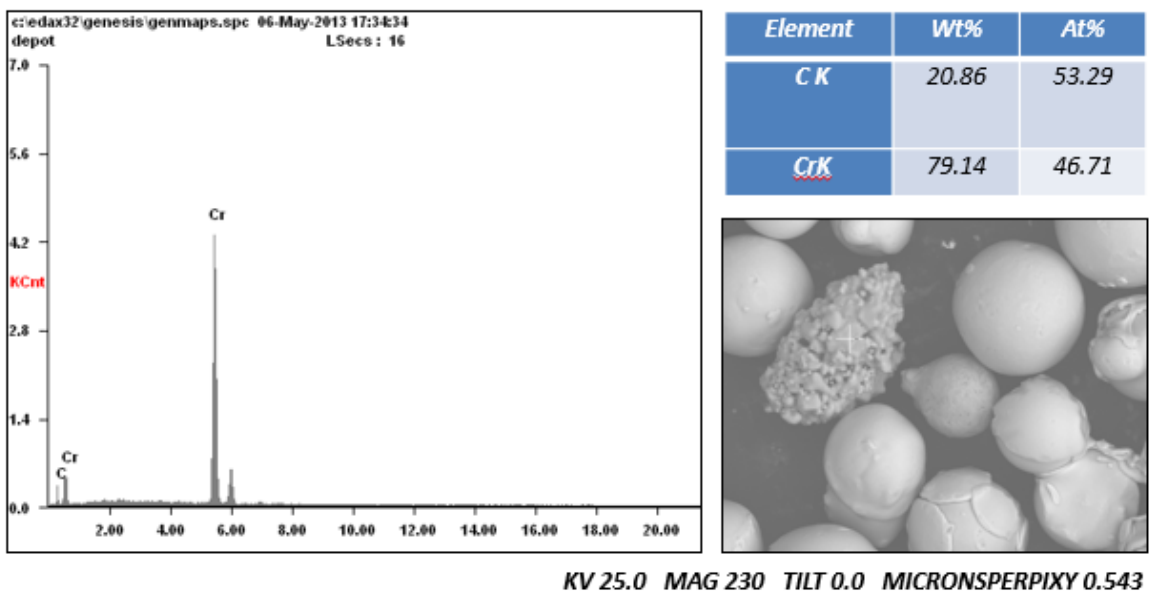
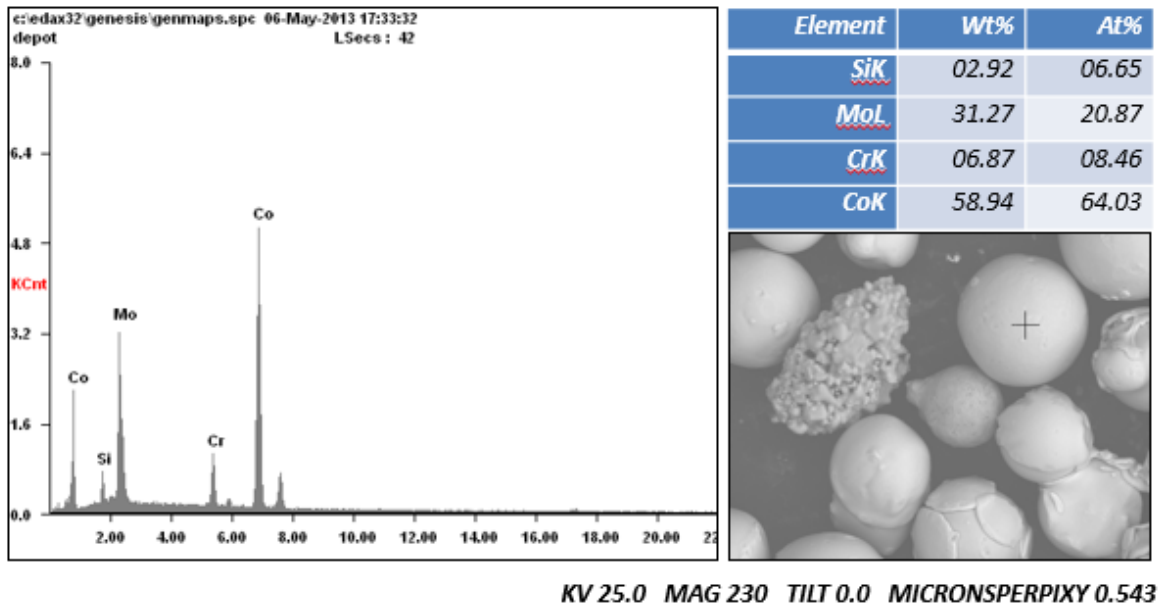


Figure IV.4 : Spectre EDAX de la particule dans Tribaloy- 400

IV.2.1 c. (WC-12% Co)

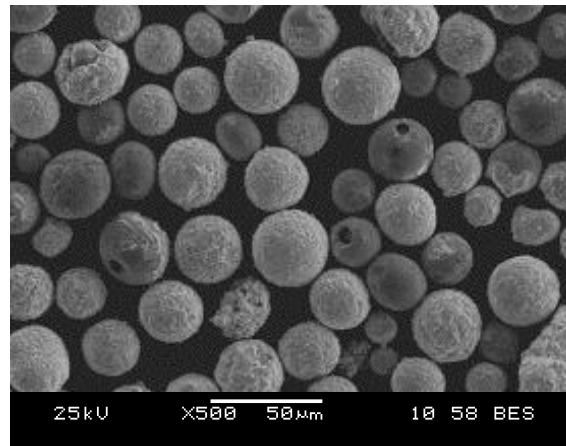


Figure IV.3 : Observations par MEB de la poudre WC-12%Co

La figure IV.3 montre des particules de (WC-12%Co). On observe des particules ayant une forme presque toutes sphériques mais elles ont deux contrastes différents (claire et sombre). Cette différence est due à la concentration de carbone dans chacun des types de particules. La taille du diamètre pour la plus part est de l'ordre de $20 \pm 5 \mu\text{m}$. Il faudra aussi noter que lors de la réalisation de revêtements avec cette poudre on n'a pas observé une décomposition remarquable ou significative des carbures.

IV.2.3 Analyses microscopiques

Les revêtements réalisés sur des substrats d'acier au carbone faiblement allié (AFNOR 25CD4) ont été observés par la microscopie optique, un exemple d'une coupe transversale d'un substrat muni de son revêtement et montré sur la figure (IV.5), nous constatons :

- Pour les échantillons : une bonne cohésion de la matière aux niveaux des interfaces, ce qui explique le bon enclage mécanique du revêtement sur le substrat.
- La répartition des trois types de dépôts le long des substrats semble être homogène avec une épaisseur de 80 à 100 μm en moyenne.
- Quant au contre échantillon, on remarque la présence des oxydes sur l'interface du dépôt à base de zinc et du substrat en acier 25CD4 ces oxydes peuvent être liés aux conditions de projections.

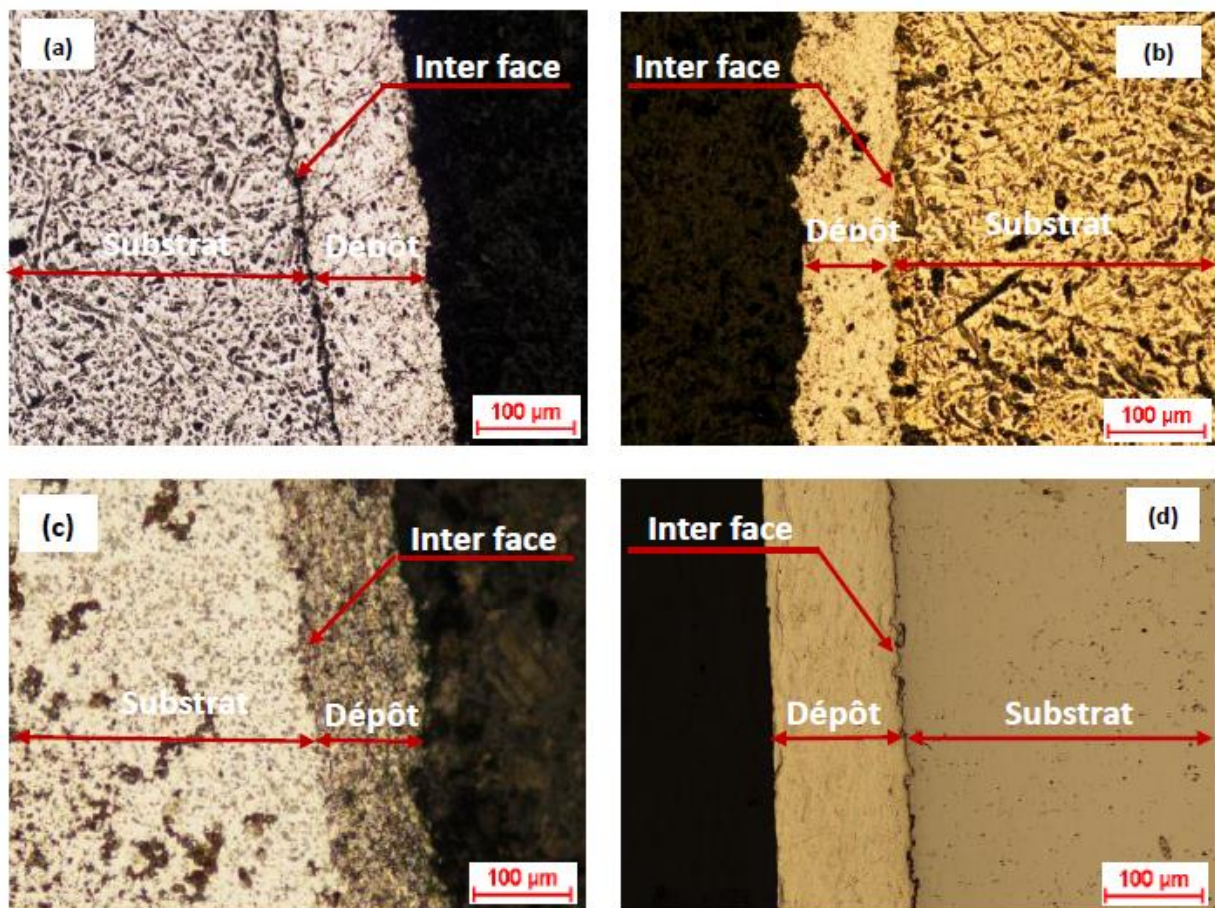


Figure IV.5 : Microstructures des revêtements (a) WC-12%Co, (b) Cr₃C₂-25%NiCr (c) Tribaloy- 400, (d) contre échantillon Babits

IV.3 mesure de microdureté :

Les mesures de microdureté Vickers HV0.3 sont prises sur une coupe transversale sous une charge 30 grf sont présentés dans le Figure (IV.6). Pour avoir un bon profil de la microdureté nous avons pris la moyenne de dix points sur chaque échantillon en allant du substrat vers le dépôt, les résultats de la microdureté font ressortir les constats suivants :

- Quel que soit le type de dépôt, sa dureté est plus élevée que celle du substrat elle est de l'ordre de 1200HV0.3 pour le WC-Co et de 860 et 650 pour le Cr₃C₂-25NI-Cr et le T-400 respectivement.

- La dureté de l'interface est plus élevée que celle de substrat cela signifie, la présence d'une zone d'inter diffusion plus dur. qui a une dureté qui varie entre 250 à 450 et cela pour les trois types de dépôt.

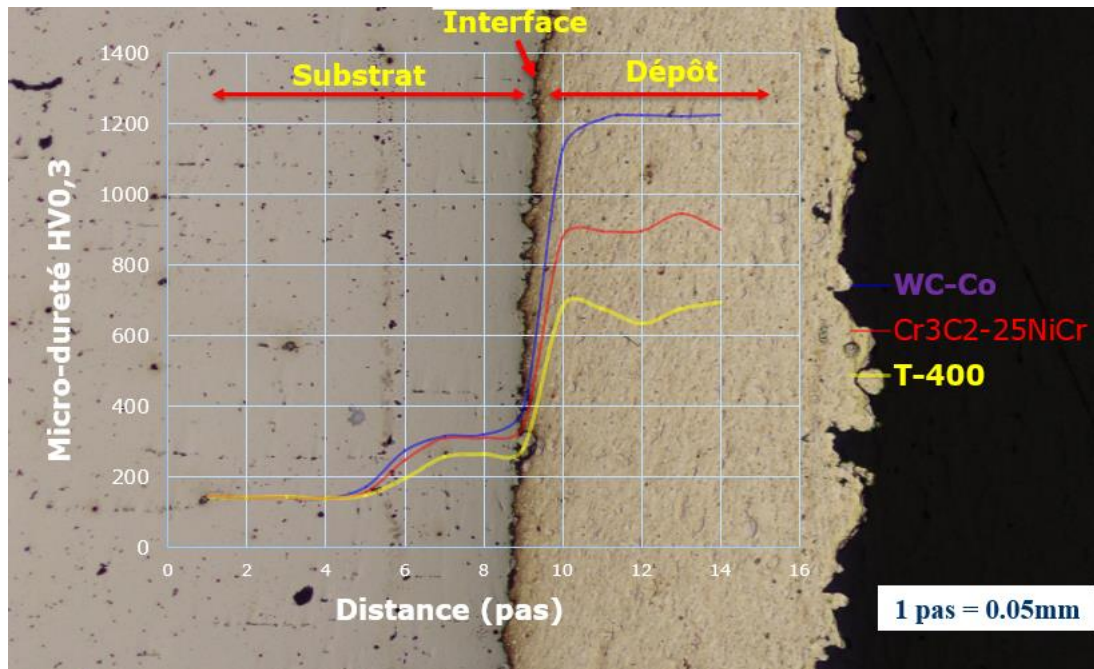


Figure IV.6 microdureté HV_{0,3} en fonction de la distance

IV.4 Essai de Rugosité

Les résultats de l'essai de rugosité effectués sur les différents dépôts sont illustrés dans la figure (IV.7). On constate que le dépôt ($WC-12Co$) présente les valeurs de rugosité les plus faibles, comprises entre 0.4 et 1.0 μm . le dépôt ($T-400$) ayant les valeurs de rugosité les plus élevées qui dépassent 2.5 μm Tandis que les valeurs de dépôt ($Cr_3C_2-25NiCr$) sont intermédiaires comprises entre 1 et 3 μm .

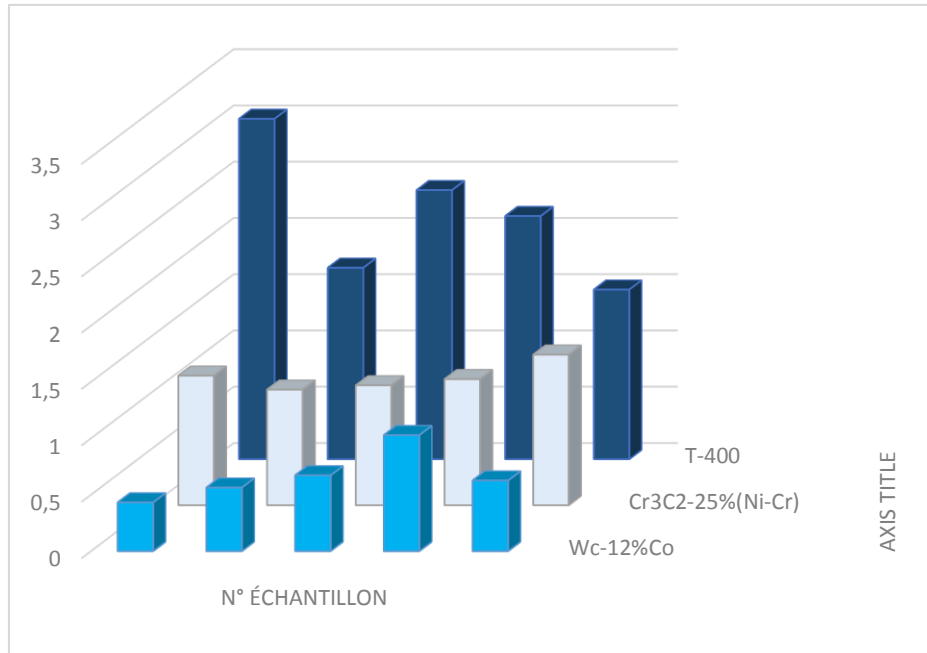


Figure IV.7 Essai de rugosité sur les échantillons

Les résultats des essais de rugosité effectués sont donnés dans les figures (IV.8, IV.9 et IV.10). Tous les diagrammes ont une allure en dents de scie, les valeurs fluctuent autour des moyennes égales à :

- 0.6836 μm pour le dépôt en ($WC-Co$) ;
- 1.1372 μm pour le dépôt en ($Cr_3C_2-25Ni-Cr$) ;
- 1.8996 μm pour le dépôt en ($T-400$) ;

Pour le dépôt en ($WC-12Co$), les fluctuations sont relativement faibles laissant supposer un état de surface lisse.

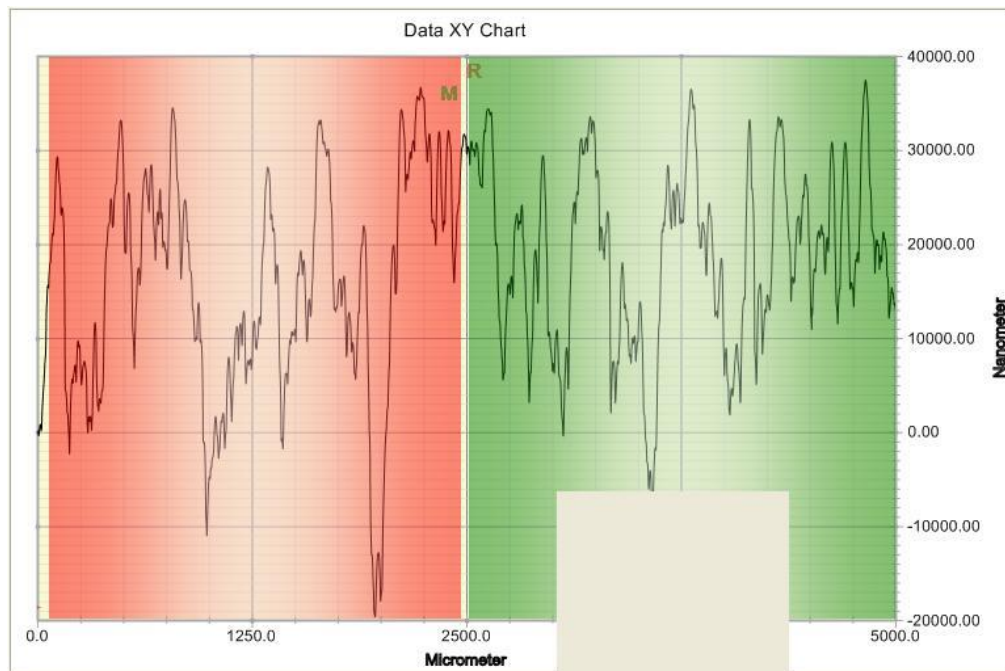


Figure IV.8 Essai de rugosité sur l'échantillon WC-12%Co

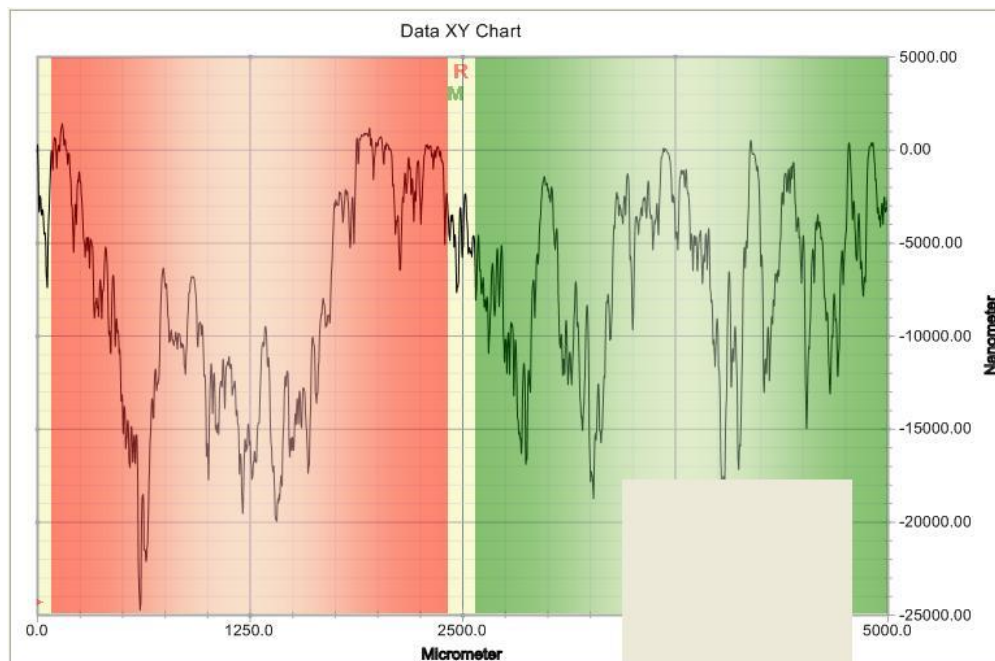


Figure IV.9 Essai de rugosité sur l'échantillon Cr3C2-25NiCr

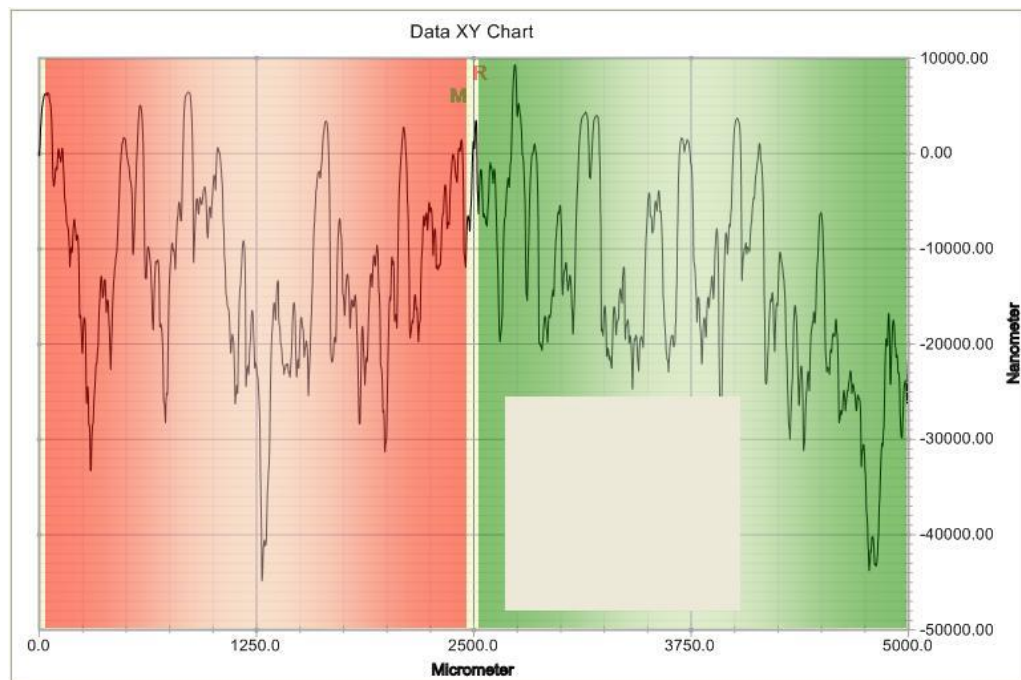


Figure IV.10 Essai de rugosité sur l'échantillon (Tribaloy – 400)

La figure IV.12 montre le profil de l'essai de rugosité du contre échantillon. Les valeurs de l'essai sont toutes inférieures à zéro, ce qui implique un état de surface lisse qui favorise la candidature de ce type de matériaux à son utilisation au niveau des portées de paliers.

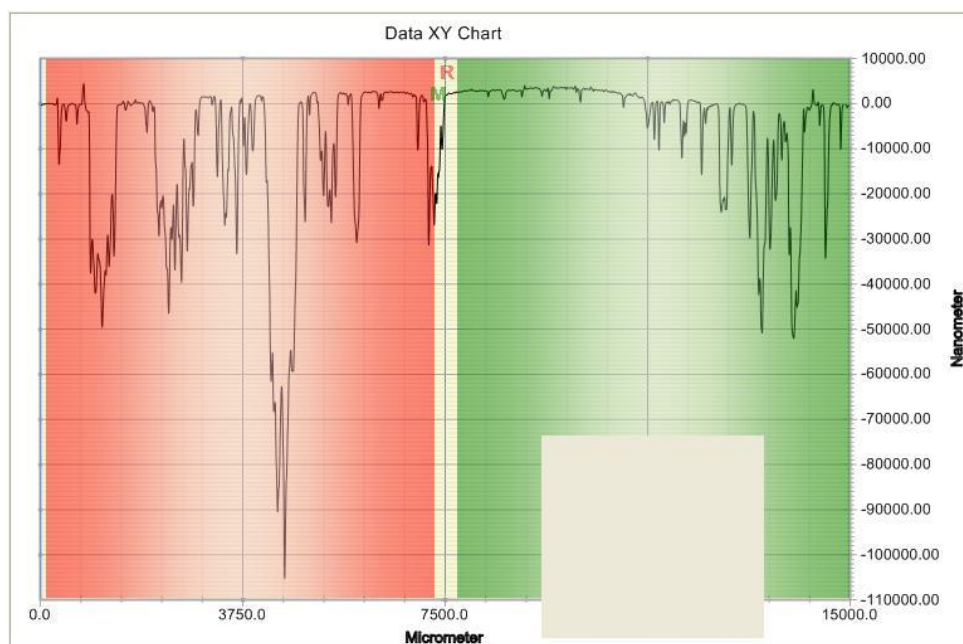


Figure IV.12 Essai de rugosité du babits (contre échantillon)

IV.5 Essais d'usure :

Les résultats des essais d'usure quantitatifs effectués pour les trois types de revêtements et des contre échantillons revêtus en babits sont présentés sur les figures IV 13, 14,15, représentant les pertes de masse en fonction de la charge appliquée et les pertes de masse en fonction de la vitesse de rotation. Il est à constater que lors de tous les essais avec les trois types de matériaux, les pertes de masse des revêtements en babits augmentent proportionnellement avec l'augmentation de la charge ainsi qu'avec celle de la vitesse de rotation.

Les pertes de masse des babits contre le (*WC- 12%Co*) sont 1.2899gr, contre le (*Cr3C2– 25%NiCr*) : 0.7901g, et contre le (*T- 400*) : 0.6524g. Cette évolution de perte traduisant l'usure due aux frottements est directement liée à la variation de la charge appliquée et à celle de la vitesse de rotation des échantillons revêtus. Les résultats montrent aussi que l'usure des babits est plus significative avec les échantillons en *WC-12%Co* qu'avec le *Cr3C2-25NiCr* et le *tribaloy400*.

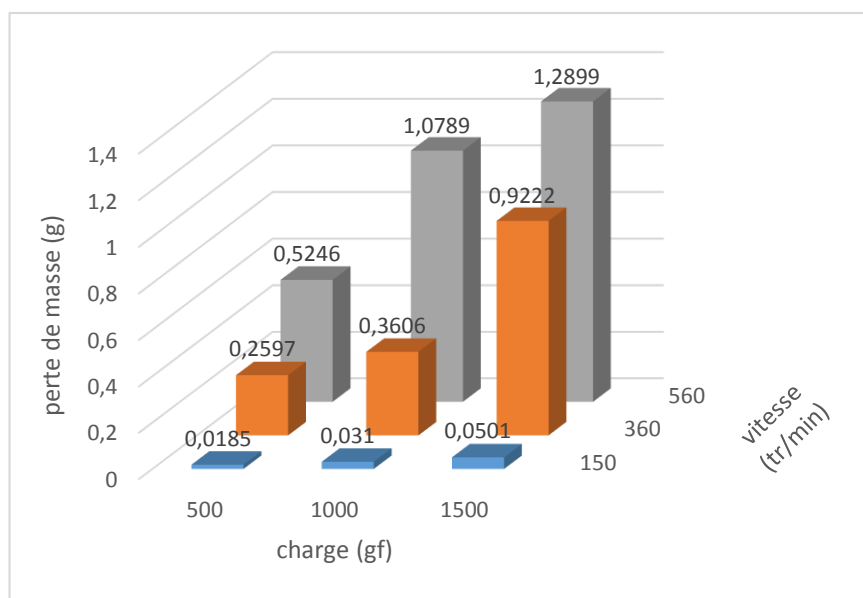


Figure IV.13 La perte de poids (contre échantillon Babits / WC- 12%Co)

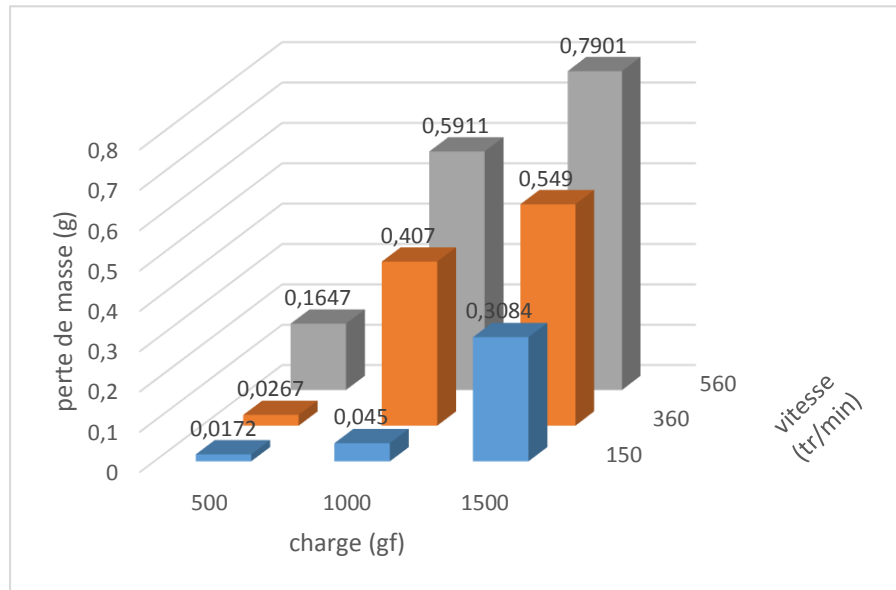


Figure IV.14 La perte de poids (contre échantillon Babits /Cr3C2-25%NiCr)

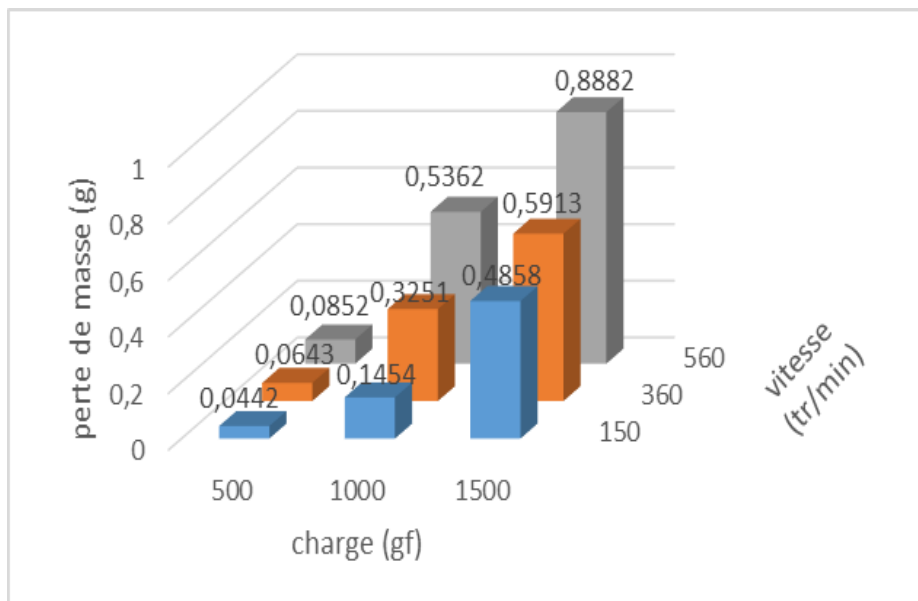


Figure IV.15 La perte de poids (contre échantillon Babits /T-400)

Les figures illustrant les stries résultant du frottement revêtement/babits montrent des traces (sillons) provoquées par les échantillons revêtus sur les disques antagonistes en babits pour différentes conditions d'essais. Des arrachements de matière sont aussi observés sur ces disques, caractérisés par des largeurs et des profondeurs de sillons pour chacun des matériaux. La largeur et la profondeur du sillon deviennent importantes quand la charge et la vitesse appliquée aux échantillons augmente. On note que les stries sont plus profondes et plus larges pour le T400, que pour les cermets. Cela est dû à la dureté caractéristique aux matériaux utilisés.

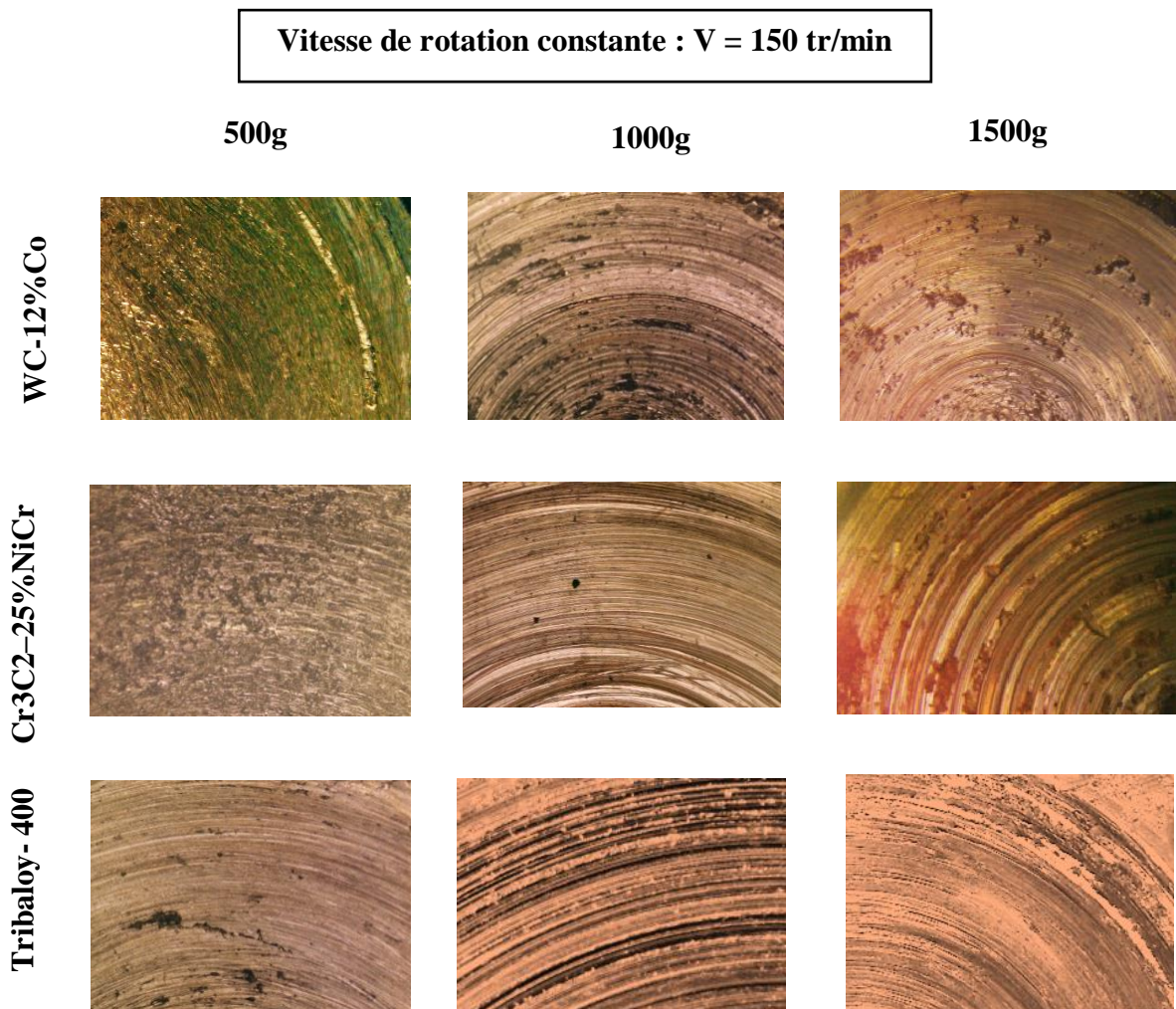


Figure IV.16 Vues macro les stries formées sur le contre-échantillon revêtues (Babits) (vitesse de rotation fixe : $v = 150$ tr/min, la charge variée).

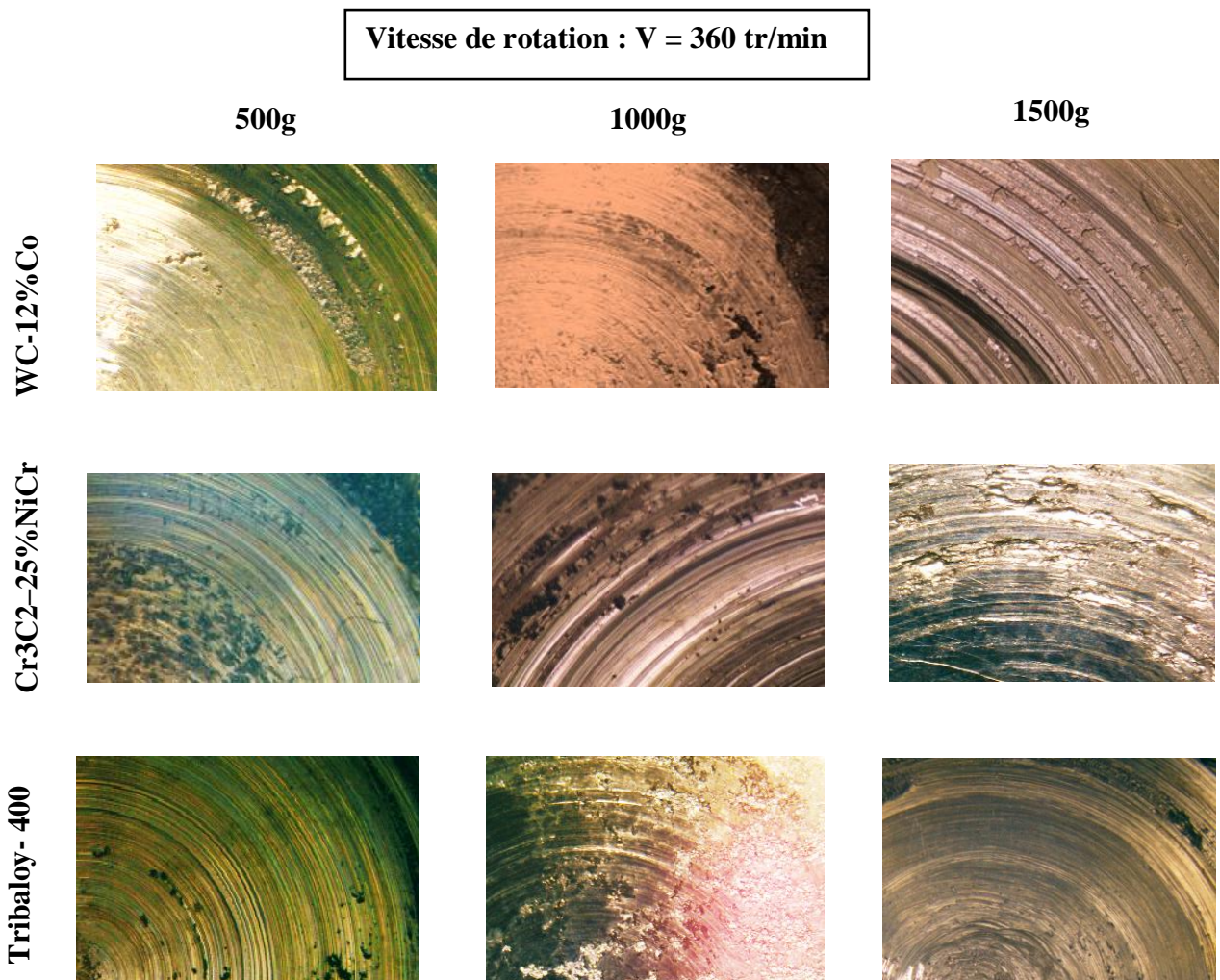


Figure IV.17 Vues macro les striés formées sur le contre-échantillon revêtues (Babits)
(vitesse de rotation fixe : $v = 360$ tr/min, la charge variée)

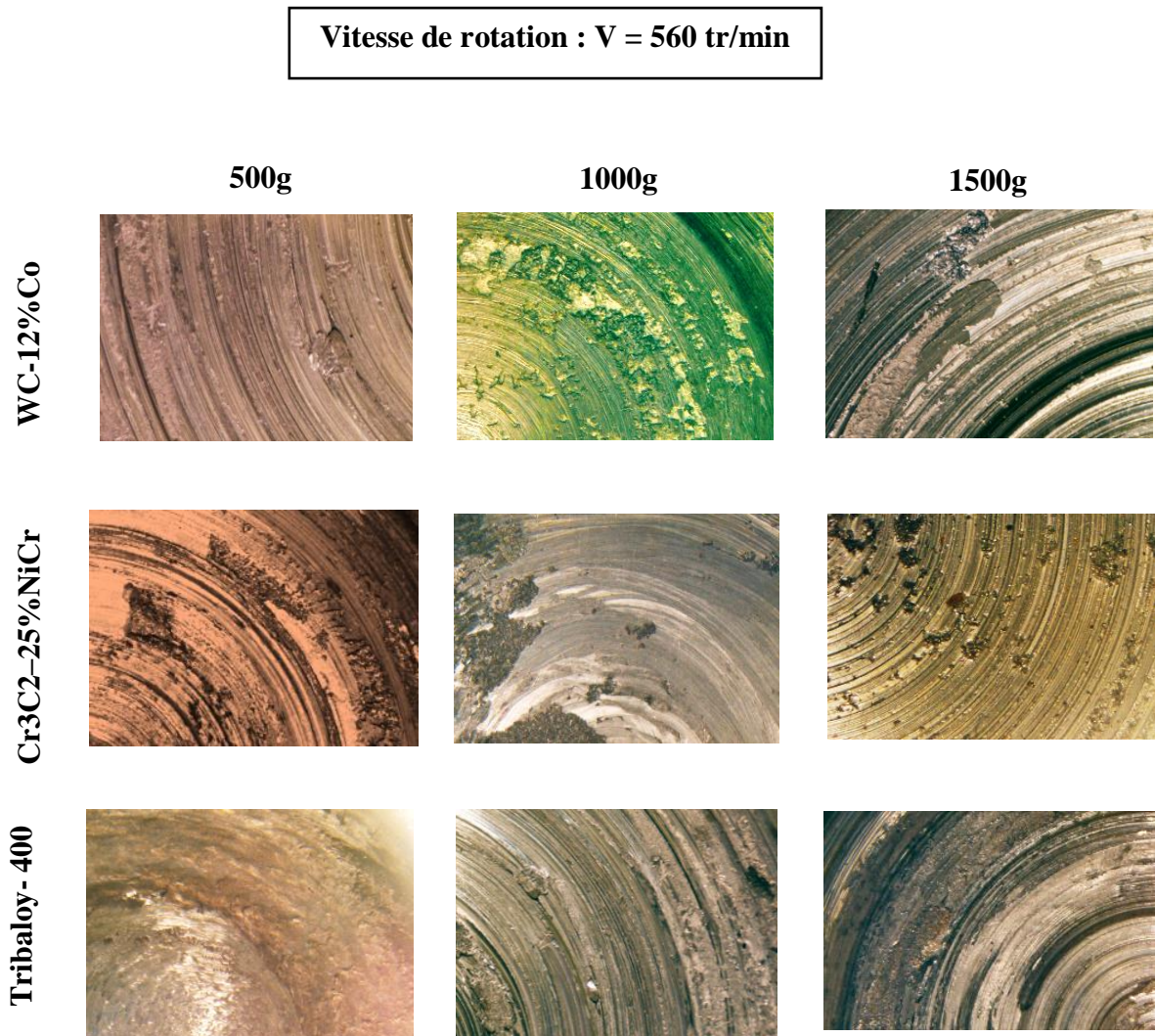


Figure IV.18 Vues macro les striés formées sur le contre-échantillon revêtues (Babits) (vitesse de rotation fixe : $v = 560$ tr/min, la charge variée).

CONCLUSION

Le travail effectué concerne principalement la conception et la réalisation d'un dispositif dédié aux essais de frottements et d'usure de revêtements élaborés par projection thermique. Une étude quantitative de l'usure de certains revêtements contre des contre échantillons en Babits a été effectuée.

Le choix de ces matériaux est basé sur leurs candidatures pour le remplacement du chrome électrolytique lors des opérations de maintenance par rechargement ou par revêtements de certaines composantes de turbines à gaz terrestres à savoir les arbres de turbines, de pompes ou de compresseurs.

Il a été montré que l'utilisation des Babits permet de prolonger la durée de vie des revêtements candidats au remplacement du chrome dur et par conséquent celle des pièces nobles. Comparativement au laiton les babits s'usent plus rapidement et ne provoquent pas une usure significativement des revêtements considérés.

La largeur et la profondeur du sillon deviennent importantes quand la charge et/ou la vitesse appliquée aux échantillons augmente.

Référence bibliographie

- [1] **Sébastien BEAUVAIS** étude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts réalisés par projection plasma, thèse doctorat, école supérieure des Mines de Paris, 2003.
- [2] **A. PRONER** ; M1645 revêtement par projection thermique (technique de l'ingénieur) 2005.
- [3] **Struers** A/S Pederstrupvej 84DK-2750 Ballerup, Denmark www.struers.com
Préparation métallographique des revêtements par projection thermique.
- [4] PFENDER E., 1992 ; FAUCHAIS P. 2001, Techniques de l'ingénieur.
- [5] <http://www.surfatec.org>.
- [6] **Yamina MEBDOUA** ; Etude Numérique des Phénomènes Thermiques Contrôlant la Solidification d'une Lamelle en Projection Thermique : Application à la Formation du dépôt (Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université de LIMOGES) (août 2008).
- [7] **S. NOUROUZI** ; Contribution à l'étude du procédé arc-fil pour la réalisation des dépôts métalliques durs résistants à l'usure abrasive (Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université de LIMOGES) (Thèse N° 49, Année 2004)
- [8] **M.GODET, L.VINCENT**, Propriétés tribologiques–Frottement–Usure, Pratique des Matériaux Industriels, Chapitre 2.2.4,
- [9] **J. FRENE**, La tribologie de l'antiquité à nos jours, Mécanique et Industrie, Vol. 2, p.263-282, 2001
- [10] **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
- [11] **M. CARTIER, P. KAPSA**, Usure des contacts mécaniques – Eléments de tribologie, Techniques de l'Ingénieur BM5066, p. 1-13, 2001
- [12] **Y. BERTHIER**, Experimental evidence for friction and wear modelling, Wear 139, p. 77-92, 1990
- [13] **M. DELQUÉ**, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma, Ecole des Mines de Paris, 2007
- [14] **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

- [15] **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
- [16] **RABINOWICZ.E**, friction and wear of materials, John Wiley and sons Inc.,) New York - London – Sydney (1965)
- [17] **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.
- [18] ASTM: Norme G40-90A(1990)
- [19] **H. B. ABDELOUNIS**, dynamique et vibroacoustique du contact rugueux: expérimentation et modélisation, thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, 2010
- [20] **F. P. BOWDEN, D. TABOR**, the Friction and Lubrication of Solids I, Clarendon Press, Oxford 1950.
- [21] **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.
- [22] **OECD**, Glossary of terms and definition in the field of friction, Organisation for economic cooperation and development (1969).
- [23] **P. KAPSA, M. CARTIER**, Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure, Techniques de l'Ingénieur BM5067, p. 1-13, 2001
- [24] **O. BARRAU**, Etude tribologique de revêtement en régulation de turbines, Rapport de stage Turboméca, ENIT, 1999
- [25] **F.P. BOWDEN, D. TABOR**, the Friction and Lubrication of Solids, Clarendon Press, Oxford, 1964
- [26] **E. FELDER**, Thermique du contact” cycle de cours, Groupe surface et tribologie CEMEF Sophia Antipolis (1989).
- [27] **J. F. ARCHARD, W. HIRST**, The wear of metals under unlubricated conditions, Proc. Roy. Soc, Lond.A236 (1956) p. 397-410
- [28] **T. SAHRAOUI**, Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty)