

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Matériaux et Traitement des Surfaces

**Thème : Evaluation de la résistance à l'usure et les propriétés
mécaniques d'un revêtement composite**

Proposé et dirigé par:

Mr. A. ABDERRAHMANE

Présenté par :

Mr. BENKHELIF AHMED

Promotion Juin 2016

Thèse : Evaluation de la résistance à l'usure et les propriétés mécaniques d'un revêtement composite

RESUME

Cette étude vise à développer des revêtements composites à matrice métallique résistants à l'usure par projection flamme. Nous avons élaboré des revêtements composites de type 10009(Cr-Ni-B-Si-Fe)+WC17C₀ (0 %, 15 %, 30 %, 45 %, 60%). Le comportement tribologique et les propriétés mécaniques du substrat et de différents revêtements sont abordés.

L'étude tribologique montre que les revêtements composites (30% WC17Co) présente une meilleure résistance à l'usure avec une augmentation du coefficient de frottement

La micro dureté et le module élastique croissent avec le taux de WC jusqu'à 30%(2179 HV). Au-delà, il y a une baisse significative de cette dernière. .

Mot clé : Revêtement, flamme, tribologie, composite, indentation instrumentée.

Thesis: Evaluation of the wear resistance and the mechanical properties of a composite coating

SUMMARY

The aim of this study is to develop composite coatings metal matrix wear resistant, by flame projection. We developed composite coatings of 10009-type (Cr-Ni-B-Si-Fe) + WC17C₀ (0%, 15%, 30%, 45%, 60%). The wear behavior and mechanical properties of the substrate and different coatings are discussed.

The wear study shows that the composite coatings (30% WC17Co) exhibits better wear resistance with an increase in the coefficient of friction

The micro hardness and elastic modulus increase with WC rates up to 30% (2179 HV). Beyond that, there is a significant reduction of the latter.

Key-words: coating, flame, teratology, composite, instrumented indentation

أطروحة : تقييم المقاومة علي اتاكل و الخصائص الميكانيكية لمركب الطلاء

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير مركب الطلاء مقاوم الاحتكاك بشعلة اللهب. قمنا بتطوير المركب من نوع 10009 (الكروم، النيكل، الحديد، سيليس، بور) + WC17C₀ (0% ، 15% ، 30% ، 45% ، 60%) و تناقش السلوك الاحتكاك و الخواص الميكانيكية لطبقات مختلفة 30WC17Co % يسلك أفضل مقاومة التآكل مع زيادة في معامل الاحتكاك وتشير الدراسة إلى صلابة الصغيرة والمرنة زيادة معامل مع معدلات WC17C₀ تصل إلى 2179 HV .

Remerciements

Avant tous, je rends mes profondes gratitudees à Allah le miséricordieux pour tous ses biens faits.

*Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur **Mr A. ABDERRAHMANE**, pour sa patience, et surtout pour sa Confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.*

Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir Accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et Critiques,

Je tiens aussi à remercier mes collègues : Touafek Ishak, Rchidi Nour Sadate, Djalal roibah ,Tebben samir ,Rahmani Mahdi, et le personnel du hall technologique pour leur soutien inestimable.

A tous mes enseignants qui m'ont initié aux valeurs authentiques, en Signe d'un profond respect.

Enfin, j'exprime mes vifs et sincères remerciements à toutes personnes ayant participé de près ou de loin pour l'achèvement de ce modeste travail

Merci à vous tous

INTRODUCTION GENERALE

La demande industrielle pour l'amélioration de la résistance aux frottements et à l'usure des pièces, tant mécaniques que de structure, est en constante croissance depuis plus de 20 ans. Elle se justifie notamment par la volonté de réduire les pertes considérables liées aux phénomènes de frottement/usure. Il est généralement admis qu'elles représentent de 6 à 10 % du Produit National Brut des pays industrialisés. Dans ce contexte, la stratégie industrielle est souvent de recourir aux revêtements pour améliorer les performances et allonger la durée de vie d'un système mécanique. Ces revêtements sont techniquement et/ou économiquement avantageux par rapport à un changement du matériau constituant la pièce à améliorer [76].

Ces dernières années, les études menées dans le domaine de la tribologie font ressortir l'intérêt des revêtements composites et notamment des revêtements composites projetés. Plus particulièrement, les dépôts à matrice métallique renforcés par une céramique présentent un fort potentiel pour des applications tribologiques dans les industries mécaniques et aéronautiques.

Ce mémoire vise à appliquer des revêtements durs sur la surface d'un acier ordinaire pour augmenter la dureté et la résistance à l'usure. Pour ce, la matière en poudre convenable devrait être choisie pour la synthèse de revêtement dur. Un composite largement utilisé est le carbure de tungstène - 17% cobalt (WC17Co). Le WC17Co est remarquable pour sa haute dureté. Un autre composite utilisé pour produire ces propriétés de dépôt est un alliage fondant de type NiCrBSiFeC(10009). En ajoutant une portion de la poudre WC17Co à NiCrBSiFeC, on peut changer des propriétés physiques et mécaniques du mélange..

La technique utilisée dans cette étude est la projection thermique à la flamme oxyacétylénique. Une torche à flamme de type fusion-refusions de Castollin Eutectic désigné par Eutalloy Super Jet a été utilisée pour l'exécution des revêtements sur les substrats. Le but de cette étude consiste à l'évaluation de l'influence de la concentration de WC17Co dans la poudre NiCrBSiFeC-WC17Co sur les propriétés physiques et mécaniques après qu'il soit projeté. Les concentrations de WC17Co utilisées dans cette étude varient de 0 % à 60% dans le mélange.

Débuté par une introduction générale, Ce mémoire est organisé selon quatre chapitres.

Le chapitre I comporte une étude bibliographique sur les modes d'endommagement et les différents procédés de projection thermique utilisés pour la réalisation d'un revêtement épais et dur.

Les différentes techniques de caractérisation mécaniques et tribologiques des revêtements sont traités dans le chapitre II.

Le chapitre III présente la méthodologie et les équipements utilisés pour l'élaboration et la caractérisation des nos revêtements.

L'ensemble des résultats obtenus sont exposés et discutés dans le chapitre IV. Tout d'abord sont présentés les résultats des analyses physiques (épaisseur et rugosité) suivi des résultats de l'observation macroscopique. Ensuite sont présentés les résultats d'essais mécaniques (dureté, module élastique, microdureté) et tribologiques (coefficient de frottement et le taux d'usure).

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Thème : Evaluation de la résistance à l'usure et les propriétés mécaniques d'un revêtement composite

RESUME

Cette étude visait à développer par projection flamme des revêtements composites à matrice métallique résistants à l'usure et à étudier le Comportement tribologique et les propriétés mécaniques de différents revêtements et du substrat.

Ce travail a été consacré à l'élaboration par projection flamme des Revêtements composites 10009(Cr-Ni-B-Si-Fe)+WC17C₀ avec différentes concentrations de WC17Co (0 %, 15 %, 30 %, 45 %, 60%) sur un substrat en acier ordinaire.

Mot clé : Revêtement, flamme, tribologique, composite.

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
Chapitre I : PROTECTION DES SURFACES PAR REVETEMENTS	
I.1 Introduction.....	2
I.2.l'endommagement par usure.....	2
I.2.1. Définitions.....	2
I.2.2. Les Différent mode l'endommagement par usure.....	3
I.2.2.1.Endommagement par adhésion	3
I.2.2.2. Endommagement par abrasion	4
I.2.2.3. Endommagement par érosion	6
I.2.2.4. Endommagement par fissuration.....	7
I.3 Revêtement par projection thermique.....	8
I.3.1. Principe.....	8
I.3.2. <i>Procédés à l'arc fil électrique</i>	10
I.3.3. Procédés basés sur la combustion.....	10
I.3.4. Procédés basés sur le canon à détonation.....	11
I-3.5. Projection thermique par plasma.....	12
I.3.6. Projections hypersonique « HVOF »	13
I.3.7. Projection supersonique à froid «cold spray ».....	13
I.4. Revêtements durs et extra durs.....	14
I.4.1.Définition.....	14
I.4.1.1. Revêtements durs.....	14
I.4.1.2. <i>Revêtement extra dur</i>	15
I.4.2. Les revêtements durs en monocouche.....	15
I.4.3. Les revêtements durs en multicouches	16
I.4.4. Les revêtements composites	17
CHAPITRE II : TECHNIQUES DE CARACTERISATION MECANIQUES DES REVETEMENTS	
II.1.Essais de dureté.....	18
II.2.l'indentation instrumentée.....	19

II .2.1. Micro indentation instrumentée Vickers	19
II .2. 2 . Extraction des propriétés élastiques	20
II. 3. Propriétés tribologique	23
II.3.1. Définition de système	23
II.3.3.différent tribomètres utilisés en mécanique	24
II.3.3.1.Tribomètre pion-cylindre.....	25
II.3.3.2.Tribomètre pion-plans	25
II.3.3.3. Tribomètre pion –disque rotatif	26
II.3.4. Coefficient de Frottement	26
II.3.5. Taux d’usure	27
II.3.6 .Théorie du troisième corps	28
II. 4 . Contrôle de rugosité	29

CHAPITRE III : METHODOLOGIES EXPERIMENTALES

III.1.Introduction	30
III.2. Substrat	30
III.3. Poudres composites.....	31
III.4. Préparation de surface.....	31
III.5. Procédé d’élaboration des revêtements	32
III.5.1.Réalisation des revêtements	32
III.5. 2. Paramètres de projection des poudres	33
III .6.Technique de caractérisation	33
III.6.1.Microscopie métallographique	33
III.6.2.profilomètre mécanique.....	35
III.6.3.Etude d’indodation instrumentie.....	35
III.6.3.1.l’instrument d’indentation.....	35
III.6.3.2 .Essai d’indentation	36
III.6.4.Etude de micro dureté.....	36
III.6.4.1. Machine d’essais Micro Dureté	37
III.6.4.2. Essai de micro dureté.....	37
III.6.5. Etude tribologique	38
III.6.5.1.L’instrument tribomètre pion / disque.....	38
III.6.5.2.Essai d’usure	39

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 Introduction.....	40
IV.2 Résultats de la rugosité (Ra) et épaisseur de revêtements.....	40
IV.3. Etude métallographique des revêtements	41
IV.4 Etude tribologique des revêtements composites et du substrat.....	42
IV.4.2 les profils de piste d'usure.....	43
IV 4.3 Taux d'usure.....	44
IV.5 Etude de micro dureté.....	48
IV.6 Essais d'indentation instrumentée.....	51
IV.6.1 La Variation de dureté(HV) avec la force pénétration.....	53
IV.6.2 La variation du module (E) avec la force pénétration	54
IV.6.3 La variation de l'énergie élastique (W_{elas}) avec la Force pénétration.....	55
IV.6 Analyse morphologique par MEB de revêtement 0%ET 30% WCC17Co.....	55

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Evaluation générale de la perte de matière par usure en fonction Du temps..2	2
Figure I. 2 : Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive	3
Figure I. 3: a- L'usure adhésion à leur opération de coupe b-Revêtement multicouche en nitrure de bore cubique poly cristallin.....	3
Figure I. 4 : Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive d'après.....	4
Figure I. 5 : a- d'usure abrasion de arbre came b – arbre came Volkswagen AG avec revêtement DLC	5
Figure I.6 : Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans un fluide en mouvement.....	6
Figure I.7 : Erosion en fonction de l'angle d'incidence des particules.....	6
Figure I.8. a-. segment racleur avec revêtement de CrNi . b-Usure érosion <i>du segment racleur</i>	7
Figure I. 9 : Usure par fissuration (cas des matériaux fragiles) d'après	7
Figure I.10 : usure par fatigue Attache aube de turbine.....	8
Figure I .11: Le principe de la projection thermique.....	9
Figure I.12 : Schéma de principe de la projection à l'arc.....	10
Figure I.13: Schéma de principe de la projection à la flamme fil gouache et poudre adroite.....	11
Figure I.14 : principe de projection plasma.....	12
Figure I.15 : Schéma de principe de la projection HVOF.....	13
Figure I.15 : principe de supersonique à froid.....	14
Figure 1.16 : Classement des matériaux céramique en fonction de la nature de leurs liaisons chimiques.....	15
Figure I.17: Images de Sections des dépôts Al ₂ O ₃ obtenus par projection plasma	16
Figure I.18: Images de section transversale obtenues par microscope électronique à balayage des multicouches de CrN/TiAlN.....	16
Figure I.19: Images de section transversale.....	17
Figure II.1: Principe de l'essai de micro-indentation, (a) allure typique de la courbe charge décharge, (b) courbe obtenue avec logiciel, (c) illustration de la pénétration de l'indenteur Vickers illustré en (d).....	20
Figure II.2.Structure du système tribologique.....	23
Figure II.3 : Schéma du tribomètre pion-cylindre	25

Figure II.4 : Schéma du tribomètre Pion-plan alternatif	25
Figure II.4 : Schéma du tribomètre pion-disque rotatif	26
Figure II.5: Aspect d'un profil de piste d'usure par rugosimètre.....	28
Figure II.6: Troisième corps	28
Figure II.7: Paramètre de rugosité Ra.	29
Figure III.1 : La microstructure d'aciers ordinaire.....	30
Figure III.2 : poudres composites Cr-Ni-B-Si-Fe.....	31
Figure III.3 : appareil de grenailage.....	32
Figure III.4: kit Eutalloy	32
Figure III.5 : microscope métallographique Axio vert 40 MA.....	34
Figure III.6: <i>Profilomè</i> de type Taylor Hobson Talysurf 120.....	35
Figure III.7 : Instrument de micro indentation Vickers.....	36
Figure III.8 : Machine d'essais Micro Dureté.....	38
Figure III.9 : Instrument de tribomètre pion /disque.....	38
Figure VI.1 : Profil caractéristique de la rugosité superficielle du substrat après rectification.....	39
Figure VI.2 : Evolutions de la rugosité superficielle de projetée et après rectification...40	40
Figure IV.3 : La micrographie de différents revêtements.....	41
Figure IV.4 : Evolution caractéristique du coefficient de frottement d'un substrat.....	43
Figure IV.5 : Evolution caractéristique du coefficient de frottement des revêtements....	44
Figure IV.6: Taux d'usure de substrat et différent revêtement.....	46
Figure IV.7 : Micrographie optique des pistes d'usure du revêtement.....	47
Figure IV.8: Micrographies illustrant les différentes indentations opérées sur les différents échantillons (200X).....	49
Figure IV.9 : La Micro dureté Vickers de différent revêtement.....	49
Figure IV.10 : Différentes courbes charge-décharge en indentation Vickers.....	51
Figure IV.11 : La Variation de dureté avec la force d'indentation.....	52
Figure IV.12 : La variation du module élastique avec la pénétration de l'indenteur.....	53
Figure IV.13 : Evolution de l'énergie élastique avec le décharge d'indentation.....	54

Liste des Tableau

Tableau I-1 : caractéristiques des différents procédés de projection thermique.....	9
Tableau II.1 : les différents types de l'indenteur.....	18
Tableau II.2 : résultat bibliographique de différent film/substrat.....	22
Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier utilisé pour les substrats.....	30
Tableau III.2 : les paramètres de la projection fusion – refusion.....	33
Tableau III. 3 : Paramètre des essais d'indentation.....	36
Tableau III. 4 : Paramètre des essais de micro dureté.....	38
Tableau III. 5 : Paramètres des essais tribologiques.....	39

Chapitre I : Protection des surfaces par revêtements

I.1 Introduction:

L'endommagement des pièces mécaniques par usure présente plus de 30% des cas de pannes enregistrées dans les secteurs industriels. Depuis le dix huitième siècle, l'usure fait l'objet de nombreuses recherches, ces 60 dernières années des efforts considérables ont été faits pour mieux appréhender le problème en termes d'estimation, de contrôle et de prévention. Le développement des tests d'usure a connu une évolution rapide cependant, les mécanismes d'usure restent toujours difficiles à modéliser [1]. Parallèlement, la compréhension à différentes échelles (macroscopiques et microscopiques) des mécanismes d'usure a été développée. Récemment, la relation entre la microstructure, les propriétés mécaniques et l'usure a été l'objet de plusieurs travaux de recherches, les résultats obtenus jusqu'à présent sont souvent spécifiques à une configuration et à des conditions de sollicitations particulières.

I.2. l'endommagement par usure :

I.2.1. Définitions :

L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris et à l'endommagement de surfaces [2]. 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 [3]. La perte de matière d'un organe mécanique en fonction du temps présente généralement trois phases distinctes (Figure .I.1).

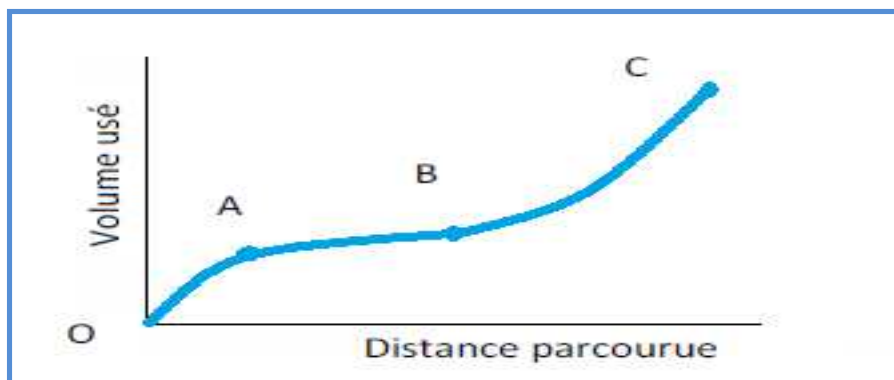


Figure .I.1 : Evaluation générale de la perte de matière par usure en fonction du temps [4].

La phase **OA** est une phase d'adaptation des surfaces souvent appelée phase de rodage ou d'incubation. La partie **AB** correspond à l'utilisation normale de l'organe mécanique. La perte de matière est faible, régulière en fonction du temps. La phase **BC** traduit la mise hors service du composant due à une usure exagérée qui tend à modifier les conditions nominales de Fonctionnement [4].

1.2.2. Les Différent mode d'endommagement par usure :

1.2.2.1. Endommagement par adhésion :

Elle est associée à la formation de joints d'adhérence aux points de contact situés sur les aspérités des surfaces de deux corps frottant. La résistance de la jonction adhésive est fonction de la nature physico-chimique des matériaux en contact. Sous l'effet du cisaillement, un transfert de matière entre les deux corps se met en place (Figure I. 2). Dans le cas de liaisons d'adhésion peu résistantes, le transfert de matière est limité et l'usure reste douce. L'usure adhésive est donc à la fois d'origine mécanique et physicochimique.

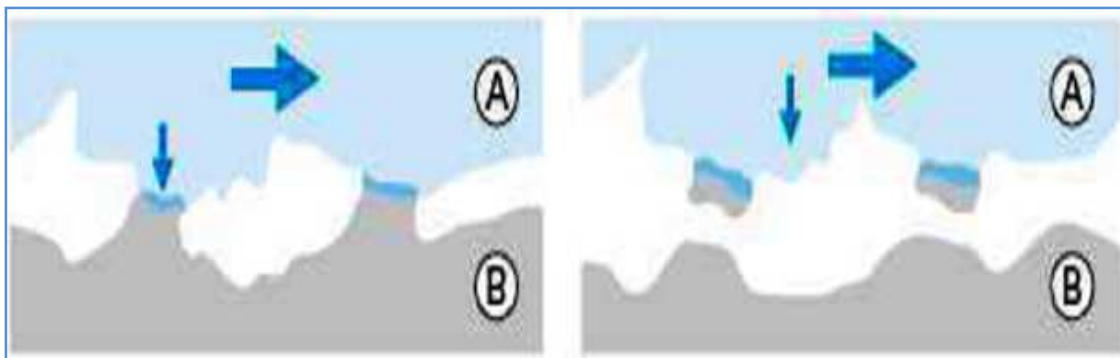
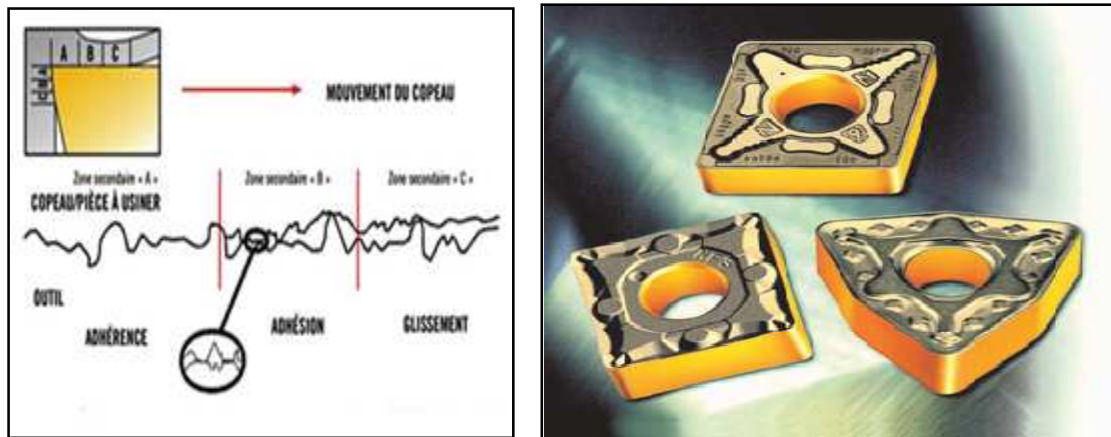


Figure I. 2 : Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive d'après [2].

Par exemple lors d'une opération de coupe, un outil déforme la matière à usiner jusqu'à ce qu'elle détache sous forme de copeaux. Le processus de déformation génère de la chaleur et de la pression, contraintes qui finissent par provoquer l'usure ou la défaillance de l'outil. Selon la théorie classique de l'usure, La figure I.3.a offre une vue agrandie de ce qui se passe dans la zone B. dans la zone A, la matière usinée appuie contre l'arête de coupe avec une force extrême et commence à adhérer à l'outil. Dans la zone B, la matière adhère à la face de coupe. Dans la zone C, le copeau se détache de la face de coupe et glisse sur cette dernière, terminant ainsi la phase de contact entre le copeau et l'outil [5].



(a)

(b)

Figure I. 3:L'usure adhésive dans l'opération de coupe [5] b-Revêtement multicouche en nitrure de bore cubique polycristallin [6]

L'adhérence de matière à usiner sur la face de coupe de l'outil commence par de fines couches qui s'accumulent et épaississent. Ce processus peut conduire à un phénomène nuisible connu sous le nom d'arête rapportée. Si une quantité importante de matière s'accumule sur l'outil, elle peut modifier le profil de l'arête de coupe. La matière accumulée peut également se détacher et endommager l'arête. Dans le pire des cas, l'accumulation de matière sur l'arête peut se déposer sur la pièce à usiner [5].

Les revêtements adamantins obtenus par dépôt chimique en phase vapeur offrent actuellement les meilleures performances pour la coupe des métaux non ferreux, le graphite, les matériaux composites à matrice métallique, les alliages légers à haute teneur en silicium et de nombreux autres matériaux abrasifs [7].

Les revêtements céramiques sont utilisés principalement pour des profondeurs de coupe plus importantes que le nitrure de bore cubique qui est limité à une profondeur de 0,5 mm (figure I.3.b). La céramique est une alternative économique intéressante par rapport au nitrure de bore dans la mesure où les exigences liées à une précision et à une qualité de l'état de surface conventionnelle sont primordiales [6].

I.2.2.2. Endommagement par abrasion :

Le phénomène d'abrasion apparaît lorsqu'un corps dur déforme plastiquement, avec ou sans enlèvement de matière, un corps plus mou. Ce mécanisme d'usure qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes (usure à deux corps), devient rapidement une usure à trois corps (Figure I. 4). En général, des sillons formés parallèlement

à la direction de déplacement par les aspérités du corps le plus dur ou des empreintes (déformation plastique) sont bien visibles à l'issue de ce type d'usure.

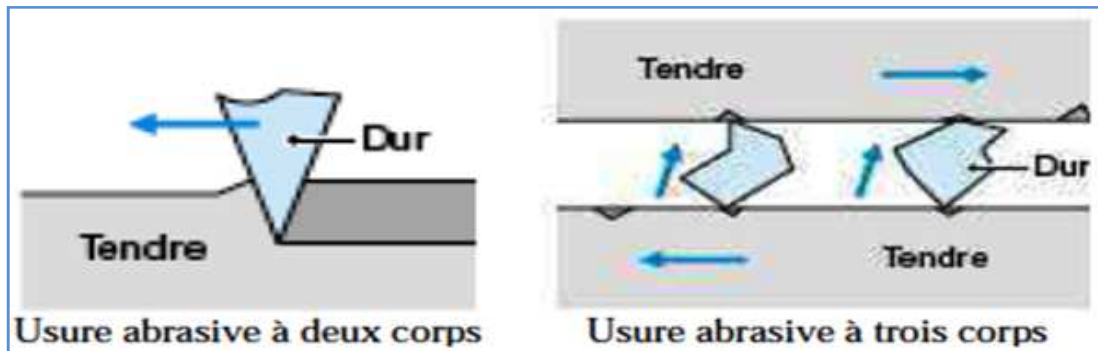


Figure I. 4 : Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive d'après [2]

L'allure typique des stries d'abrasion peut être constatée sur ce tourillon (figure I.5.a), il s'agit ici d'une usure abrasive à trois corps, car l'arbre tournait dans un poussoir moins dur que lui. Un exemple d'usure abrasive à trois corps nettement plus sévère, elle s'est produite au niveau d'un joint d'étanchéité qui a provoqué un point d'accumulation de débris abrasifs.



(a)

(b)

Figure I. 5 : a- Usure par abrasion d'un arbre à came b - arbre à came Volkswagen AG avec revêtement DLC [8]

Les arbres à cames des moteurs sont habituellement faits à partir de fonte d'acier avec les lobes des cames durcis par induction ou flamme. La surface de glissement du poussoir est habituellement en fonte d'acier ou en acier durci. Les revêtements protecteurs sont principalement réalisés par PVD/CVD. Les plus utilisés sont des dépôts durs destinés à

diminuer le frottement tels que les DLC [34] (Figure I. 5. b) ou WC/C [9]. Pour des pièces à plus faible coût des dépôts phosphatés existent.

I.2.2.3. Endommagement par érosion :

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 I.6).

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 I.7). 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 [2].

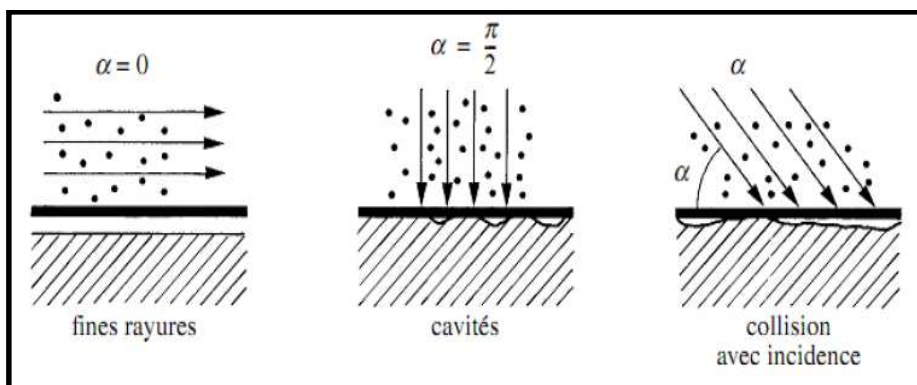


Figure I.6 : Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides
Contenues dans un fluide en mouvement[2].

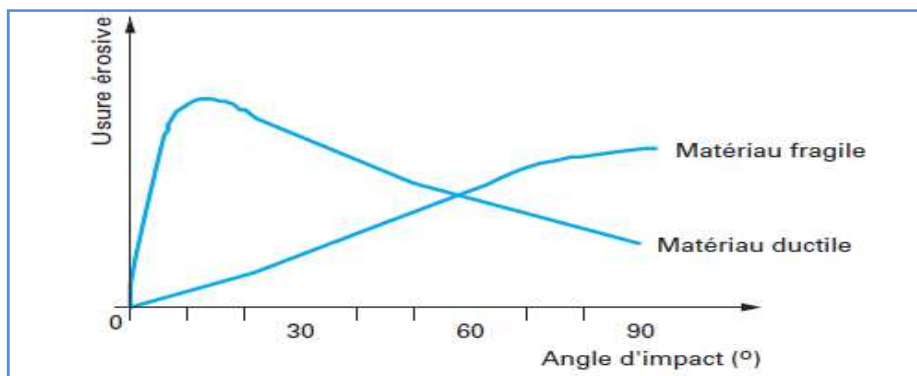
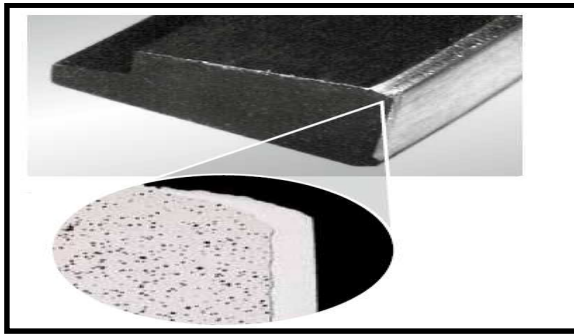
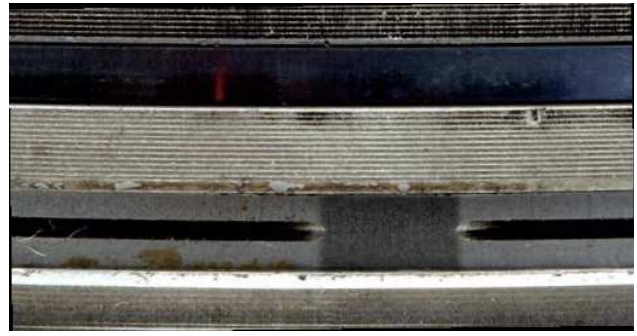


Figure I.7 : Erosion en fonction de l'angle d'incidence des particules [2].



(a)



(b)

Figure I.8. a. Segment raclieur avec revêtement de CrN. **b.** Usure érosion du segment raclieur [10]

Citons comme exemple, les surfaces de frottement des segments de piston endommagées par érosion peuvent être protégées par un revêtement afin d'améliorer leurs propriétés tribologiques. Les revêtements des segments les plus utilisés sont le nitrure de titane (TiN) le nitrure de chrome (CrN) (Figure I.8.a) et les DLC réalisées par procédé PVD/CVD [11], de même il existe des revêtements composites à matrice métallique réalisés par projection thermique. L'épaisseur de dépôt est de l'ordre de 10 à 100 μm . Les carbures ont une grande dureté et une adhésion supérieure aux nitrures. Comme leur température de fonte est élevée, les carbures purs ne peuvent pas être fondus et déposés sur une surface d'où l'utilisation de cermets, dans lesquelles les carbures sont enrobés dans des matériaux servant de liants et plus faciles à fondre et de haute ductilité tels que Ni, Co, Cr, Ti et autres mixtures et alliages.

II.2.2.4. Endommagement par fissuration :

Les contraintes mécaniques générées par le frottement peuvent entraîner la création et la propagation de fissures. Pour les céramique 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 I.9). Il s'agit d'une usure par fracturation [2].

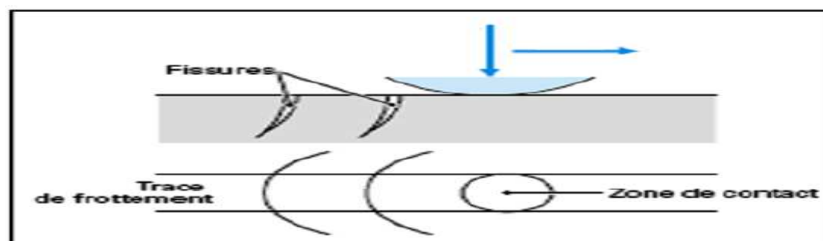


Figure I. 9: Usure par fissuration (cas des matériaux fragiles).

L'usure par fissuration peut se produire aux interfaces de contact des pieds d'aubes (Figure I.10). Les études expérimentales de ce type d'endommagement sont importantes pour comprendre les mécanismes qui interviennent. Contrairement à l'aspect fissuration le phénomène d'usure sous sollicitations de fatigue est moins bien formalisé car il doit prendre en compte des mécanismes plus difficiles, c'est un phénomène complexe mettant en jeu différentes physiques.

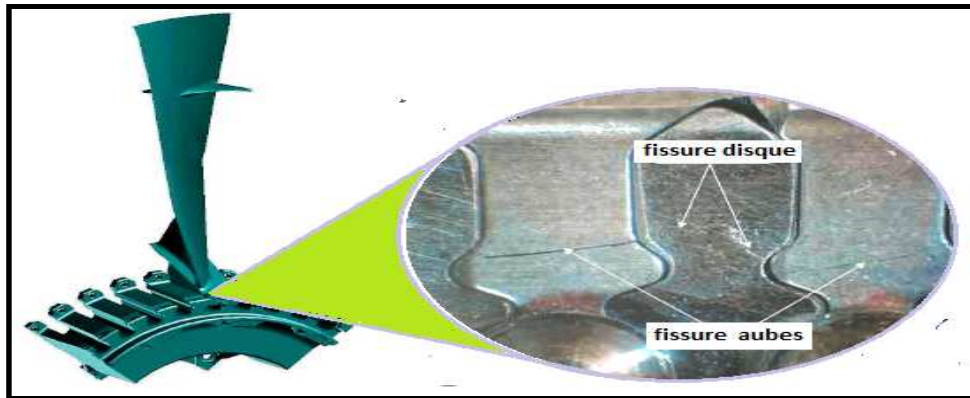


Figure I.10 : Usure par fatigue Attache aube de turbine

I.3 Revêtement par projection thermique :

I.3.1. Principe:

Le matériau d'apport solide qui peut se présenter sous forme de fil ou de poudre, est fondu au moyen d'une source de chaleur importante, provenant de la flamme d'un chalumeau oxyacétylénique, ou d'un arc électrique. Réduit à l'état liquide, il est ensuite pulvérisé sous forme de gouttelettes et véhiculé à grande vitesse au moyen d'un vecteur gazeux. Ce dernier est généralement de l'air comprimé, mais peut aussi être de l'argon, ou de l'azote, mélangé au gaz provenant de la combustion des gaz (flamme oxy-gaz) ou de l'ionisation des gaz (plasma d'arc).

La vitesse des particules pulvérisées est de l'ordre de 100 à 200 m/sec pour les pistolets à gaz et supersonique pour les pistolets à plasma d'arc. Sous l'effet de ces grandes vitesses, les particules viennent s'écraser sur le substrat à traiter, situé à une distance comprise entre 150 et 250 mm. Durant le trajet de la buse au projectile, les particules se refroidissent légèrement et peuvent se présenter dans un état magmatique (pâteux, du moins en périphérie), au moment de l'impact. Sous le choc, le métal va être écrasé et martelé par les particules suivantes qui en s'écrasant vont se souder entre elles. Le dépôt se présente donc sous la forme d'un amas, apparemment compact, de particules liées entre elles de façon mécanique.

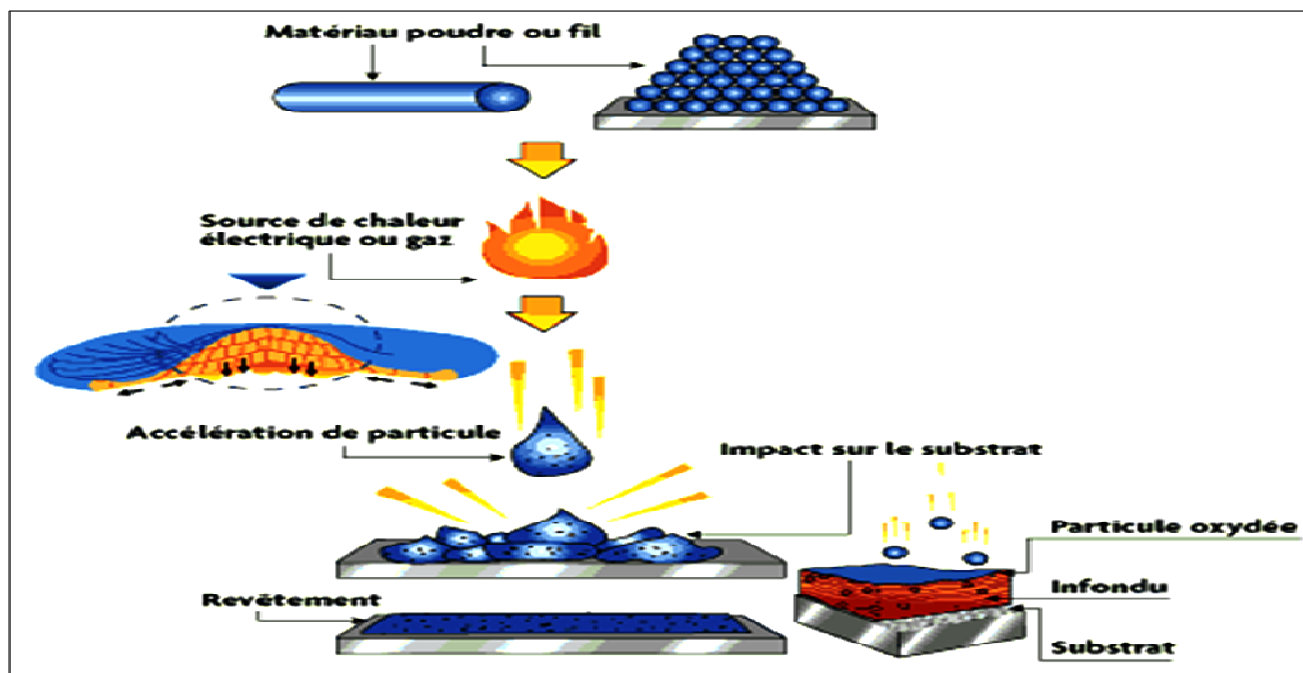


Figure I.11: Le principe de la projection thermique [12].

Caractéristiques	Projection Flamme poudre	Projection flamme fil	Projection HVOF	Projection par canon à détonation	Projection arc électrique	Projection plasma
Source de chaleur	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Flamme oxy-acétylénique	Arc électrique	Plasma
Température de flamme (°C)	3 000	3 000	3 000	3 000	6 000	12 000
Transport des particules	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz flamme	Gaz flamme	Air comprimé	Gaz plasma (Ar/H)
Vitesse des particules (m/s)	40	150	700	950	250	200
Forme du matériau d'apport	Poudre	Fil ou cordon	Poudre	Poudre	Fil	Poudre
Rendement moyen (%)	50	70	70	70	80	70
Epaisseur (mm)	0,1 à 1,5	0,1 à 1,5	0,05 à 1	0,05 à 1	0,2 à 3	0,05 à 1,5
Exemple de matériaux d'apport	-Métaux -Céramiques -Carbures dans matrice métallique	-Métaux -Céramiques -Carbures dans matrice métallique	-Métaux -Carbures	-Métaux -Céramiques	-Métaux	-Métaux -Céramique -Carbures

Tableau I-1 : caractéristiques des différents procédés de projection thermique [12].

I.3.2. Procédés à l'arc électrique :

Le principe de la projection par arc électrique consiste à faire jaillir un arc électrique entre deux fils consommables, un jet d'air comprimé pulvérisant le métal fondu et le projetant sur le matériau support. La température de fusion peut atteindre 6000°C. L'épaisseur du dépôt est alors comprise entre 0,2 et 3 mm avec une porosité de 5 à 10%.

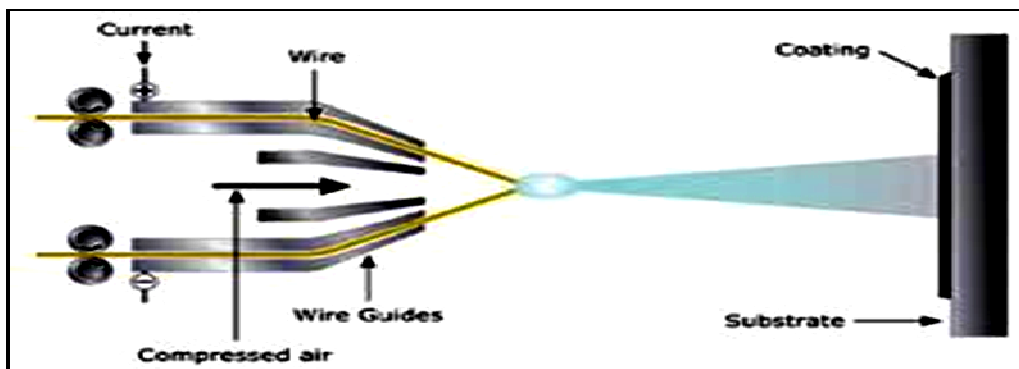


Figure I.12 : Schéma de principe de la projection à l'arc [12].

Les matériaux projetés sont des métaux conducteurs électriques (aluminium, cuivre, zinc, molybdène), des aciers mais aussi des alliages comme NiCrAl et NiMoAl. L'une des limites importantes du procédé est la nature des matériaux (traficabilité et conductibilité). La gamme des matériaux projetés peut être élargie en utilisant la technologie des fils fourrés qui permet de déposer des carbures (CrC, WC, TiC) et des oxydes ainsi que d'élaborer des couches composites [17]. Ce procédé est principalement utilisé dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique (protection des structures métalliques extérieures en ambiance marine).

I.3.3. Procédés basés sur la combustion :

Le procédé de projection à flamme a été développé par l'ingénieur suisse Schoop au début de xx^e siècle. Initialement, la projection par flamme était appliquée surtout pour le dépôt de zinc contre la corrosion et appelée « métallisation ». Dans les années 1930, des matériaux durs ont été projetés sur des pièces de machines, la projection des céramiques par flamme a été entreprise à partir des années 1950.

Dans ce type de projection thermique, une réaction chimique est utilisée comme source d'énergie. Les matériaux à projeter sont introduits soit sous forme de poudre soit sous forme de fil (figure I.13), de tige ou de cordon (pour les céramiques dans ces deux derniers cas). Dans le premier cas, la température de fusion ne peut dépasser 0,7 à 0,8 fois la

température de la flamme alors que dans le second, il est possible de fondre des matériaux dont le point de fusion est de 0,95 fois la température de flamme. Les matériaux déposés par cette technique sont usuellement des métaux, des alliages, des cermets ou des céramiques à basse température de fusion [13].

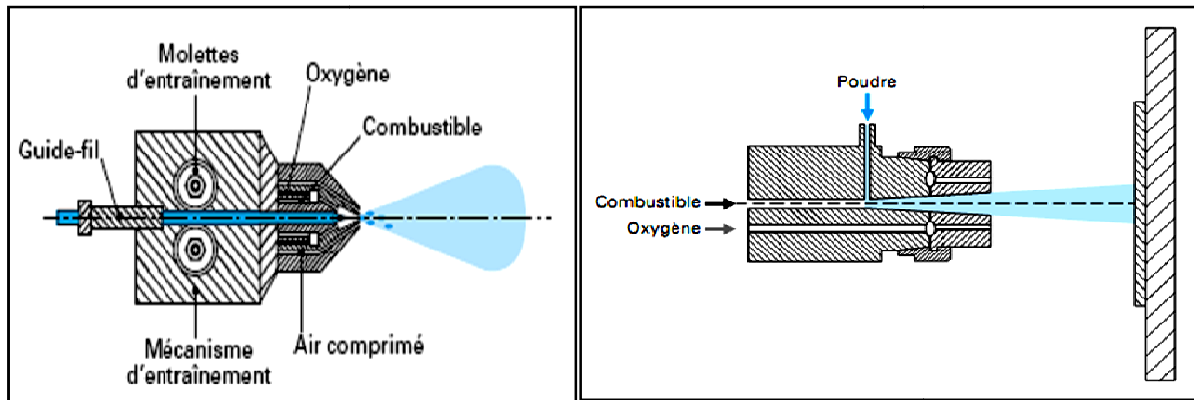


Figure I.13: Schéma de principe de la projection à la flamme fil gouache et poudre adroite . Les premiers matériaux utilisés étaient le plomb et le zinc pour des applications de protection anticorrosion. Depuis, la gamme des matériaux ainsi que les applications ont été élargies. Des métaux pur comme Zn, Al, Cu, Sn, Pb, Ni, Mo, des aciers y compris des aciers inoxydables, des alliages à base de Zn, Cu, Ni ou Sn, mais aussi des polymères peuvent être utilisés comme matériaux d'apport sous forme de poudre ou en fils. Des céramiques Al_2O_3 , $Al_2O_3-TiO_2$, Cr_2O_3 , ZrO_2-CaO sous forme de cordons ou de baguettes peuvent être aussi déposées en utilisant cette technique [13].

I.3.4. Procédés basés sur le canon à détonation :

Dans ce procédé, le matériau est projeté grâce à l'énergie de détonation d'un mélange gazeux qui est le plus communément, un mélange oxygène-acétylène. Le mélange est injecté dans le canon en même temps que la poudre d'apport véhiculée par un gaz inerte. Le canon est constitué d'un long cylindre fermé à une de ses extrémités et refroidi à l'eau. L'onde de détonation, créée par une étincelle dans le mélange détonnant, chauffe et accélère les particules, injectées à mi-longueur du canon, jusqu'à la sortie du canon où elles sont éjectées à une vitesse élevée (jusqu'à 900-1300 m/s) vers la surface du substrat à traiter. Entre chaque tir le tube est balayé par un jet de gaz neutre (azote). Au maximum dix tirs peuvent être effectués par seconde. L'énergie cinétique élevée des particules à l'impact sur le substrat conduit à l'édification d'un revêtement dense et adhérent (porosité

inférieure à 1% et adhérence supérieure à 80 MPa). Les matériaux généralement utilisés sont les carbures de chrome ou de tungstène avec un liant métallique (Ni, Co) [17].

I-3.5. Projection thermique par plasma :

Le principe de la projection par plasma consiste en l'utilisation d'une torche plasma comme source de chaleur. Pour fondre et accélérer une poudre du matériau qui doit revêtir le substrat préalablement préparé, cette poudre est véhiculée jusqu'au plasma à l'aide d'un gaz porteur. Un arc électrique de forte intensité (plusieurs centaines d'ampères) est généré entre les deux électrodes de la torche refroidies par une circulation d'eau, permet d'ioniser partiellement un mélange gazeux à base d'argon, d'hydrogène, d'hélium et/ou d'azote, le milieu ainsi créé est électriquement neutre et constitué d'un mélange de molécules, ions, atomes et électrons appelés plasma thermique (Figure I. 13).

Parmi toutes les sources de chaleur utilisées dans les divers types de projection thermique, ce plasma dit "thermique", permet de fondre la plus grande variété de matériaux (polymères, métaux et céramiques) [14].

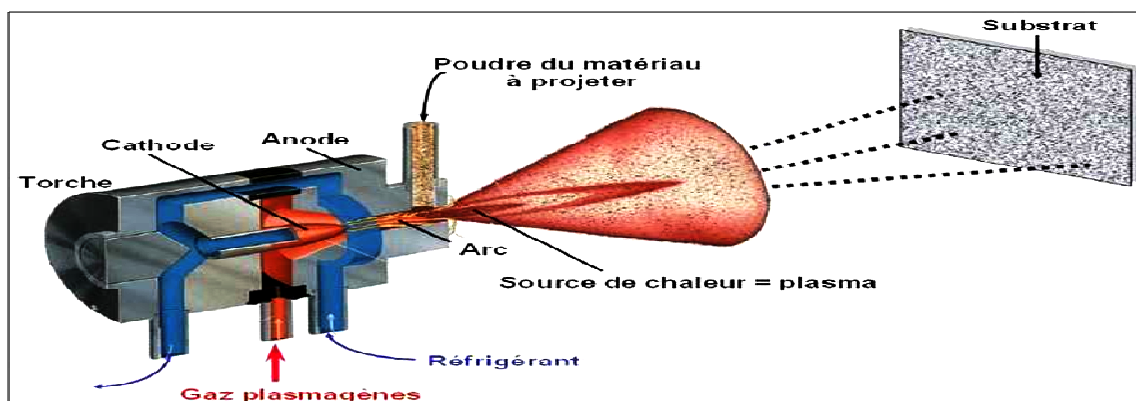


Figure I.14 : principe de projection plasma [17].

I.3.6. Projections hypersonique « HVOF » :

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 1MPa ce qui augmente légèrement la température de combustion. 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 600 à 700 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 [14].

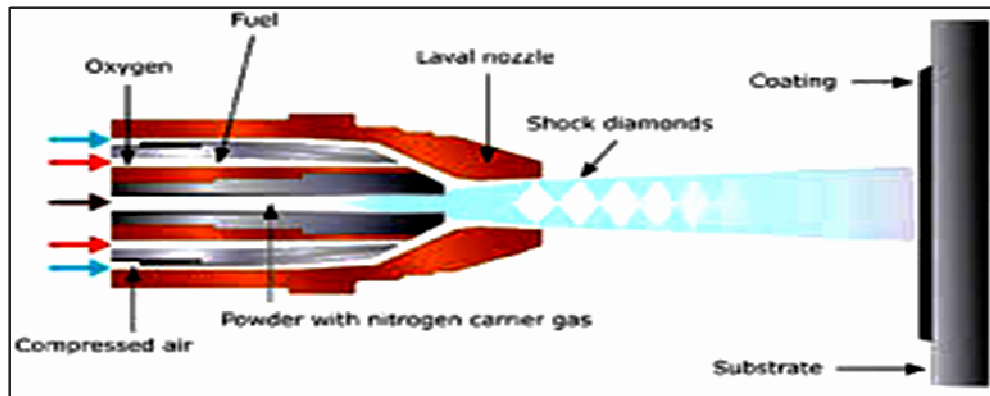


Figure I.15 : Schéma de principe de la projection HVOF [17]

I.3.7. Projection supersonique à froid « cold spray » :

La définition du Cold Spray a été donnée par l'un de ses inventeurs, Anatoli Papyrin un procédé permettant de réaliser des dépôts en exposant un substrat métallique à un jet de particules à haute vitesse (300-1200 m/s) accélérées au moyen d'un écoulement supersonique d'un gaz comprimé.

Le procédé est fondé sur l'injection d'un gaz (air, azote, hélium) comprimé, généralement entre 1 et 4 MPa, dans une tuyère De Laval (Figure I-15). Ce type de tuyère présente une géométrie particulière de type convergent-divergent. Le gaz injecté est accéléré dans la partie divergente de la buse jusqu'à atteindre une vitesse supersonique. Les particules sont introduites axialement à l'aide d'un gaz porteur dans la partie convergente de la tuyère et sont accélérées lors de la détente du gaz après le passage du col. Le temps de séjour des particules dans le gaz de projection éventuellement préchauffé est relativement bref, si bien que la température des particules reste toujours très inférieure à la température du gaz. Dans tous les cas, les particules sont toujours à l'état solide lors de leur impact sur le substrat. Cet impact se caractérise par une forte déformation plastique de la particule permettant son adhésion sur le substrat ou les autres particules déjà déposées. [14].

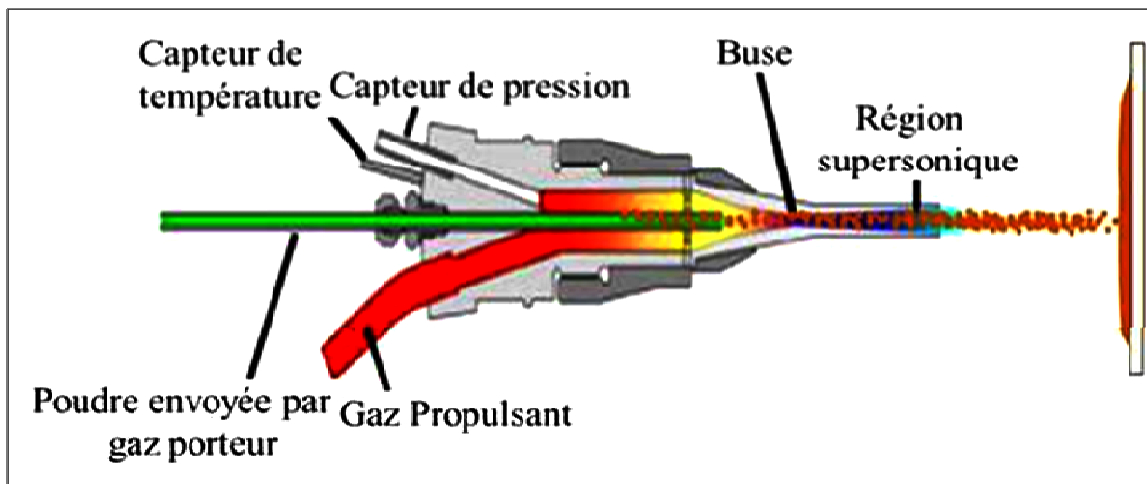


Figure I.16 : principe de supersonique à froid [14].

I.4. Revêtements durs et extra durs :

I.4.1. Définition :

Les traitements de la surface par des revêtements durs restent un secteur stratégique pour augmenter la durée de vie des pièces opérant dans des conditions sévères, mais aussi pour augmenter les cadences de production et atteindre de nouveaux marchés. Le revêtement dur est une technique de plus en plus utilisée, elle consiste à augmenter les propriétés à la surface par dépôt mince au épais (de quelques millimètres à quelque microns). Cette couche appelée revêtement, peut être utilisée afin d'augmenter la dureté, d'assurer la protection contre l'usure, la corrosion et la fatigue. Musil et al [18] ont classé les revêtements selon leur dureté en deux catégories

I.4.1.1. Revêtements durs :

Avec une dureté inférieure à 40 GPa ces revêtements sont essentiellement monophasés comme les oxydes les nitrures et les carbures. Les oxydes tels que SiO_2 (12GPa), Al_2O_3 (21GPa), TiO_2 (11GPa) ...etc. Les nitrures s'accordent sur des valeurs de dureté de l'ordre de 25 GPa pour le TiN plus que le CrN qui est plus « tendre » avec une dureté variant entre 18 et 23 GPa, selon les conditions de dépôts, et le Si_3N_4 (15GPa). Les carbures des familles WC (32.5GPa), TiC (35GPa), $\text{B-C}_3\text{N}_4$ (30GPa), et les nanocouches comme TiN/MON , Ti/NbN et TiN/TaN dont la dureté est un alentours de 30 GPa [17].

I.4.1.2. Revêtement extra dur :

Les revêtement extra dur présente une dureté élevée qui dépasse 40GPa comme le nitrure de bore cubique (c-BN)(48GPa), le carbone amorphe(DLC) (65GPa), le nitrure de carbone amorphe (a-CN_x)(50-60GPa)et le diamant poly cristallin (PCD). Cependant ces revêtements extra durs sont instables thermodynamiquement et connaissent une limitation d'utilisation dans plusieurs applications. Pour l'instant, de fait de la haute affinité que possède le carbone pour le fer, l'application des outils de coupe revêtus en diamant est limitée à l'usinage de l'aluminium et ses alliages et à l'usinage du bois. L'application des revêtements c-BN trouve des problèmes similaires lors de l'usinage des aciers dus à la dissolution chimique du bore dans le fer [16].

I.4.2. Les revêtements durs en monocouche :

Les revêtements de carbure de titane (TiC) ou de nitrure de titane (TiN) peut jouer un rôle déterminant sur la capacité de mise en charge pour les applications mécaniques tels que les roulements, les engrenages. Le nitrure de silicium Si₃N₄ peut être formé en faisant réagir des gaz appropriés de sorte que ce composé se dépose sur (ou dans) un substrat pour obtenir une coque ou un solide de forme voulue. Lorsque des solides sont ainsi élaborés à partir d'une phase vapeur, ils possèdent en général une structure qui rappelle celle des produits moulés : des grains colonnaires poussent à partir de la surface du substrat et peuvent se prolonger dans toute l'épaisseur de la section. Pour cette raison, les pièces élaborées par CVD ont en général de médiocres propriétés mécaniques [20].

Les revêtements céramiques Al₂O₃, Cr₂O₃ ou ZrO₂, par projection plasma de poudres sont fréquemment utilisés pour résister à l'usure dans des applications à température ambiante et à haute température. Ces revêtements donnent des coefficients de frottement de l'ordre de 0,1 à 0,2 en contact avec l'acier, leur taux d'usure est faible [21] :

- TiO₂ pour augmenter la ténacité des dépôts d'Al₂O₃.
- ZrO₂ pour augmenter la résistance à la fissuration.
- SiC pour augmenter la résistance à l'usure abrasive.
- h-BN pour diminuer le coefficient de frottement.

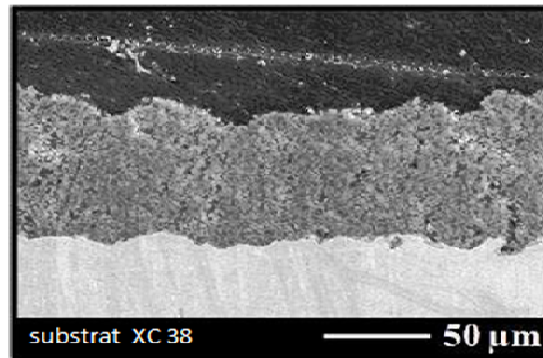


Figure I.17: Dépôts Al_2O_3 obtenus par projection plasma

I.4.3. Les revêtements durs en multicouches :

Les multicouches sont développées pour améliorer l'adhérence et d'autres propriétés mécaniques et physiques des monocouches de base. La combinaison de monocouches ayant de faibles contraintes résiduelles, une dureté élevée, un faible coefficient de frottement et une bonne adhérence permet d'avoir des multicouches ayant d'intéressantes propriétés mécaniques et tribologiques. De ce fait, les multicouches restent parmi les revêtements durs les plus utilisés.

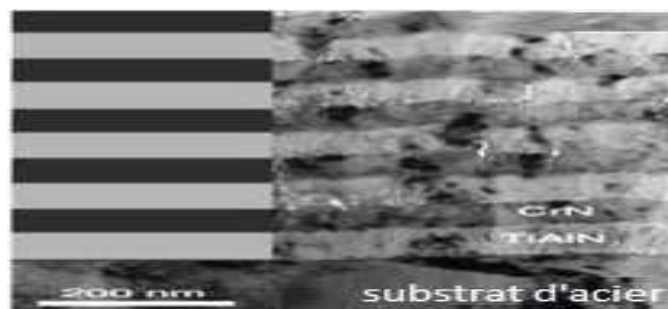


Figure I.18: Images de section transversale obtenues par MEB des multicouches de CrN/TiAlN [22]

Miklaszewski *et al.* [23] ont testé des multicouches de TiC/VC, des couches de nitrure de bore cubique c-BN et des couches de diamant nanocristallin NCD. Ils ont remarqué que les multicouches TiC/VC augmentent la durée de vie des outils en WC-Co destinés à l'usinage du MDF d'un facteur de deux. Par contre, la meilleure résistance à l'usure est obtenue avec le NCD. **Selon Stewart** l'utilisation des revêtements de TiN, ZrN et PCD diminue les efforts de coupe et par conséquent l'usure des outils [24]. Dans une étude récente menée par **Pinheiro *et al.* [25]**, des mono et des multicouches (de 3, 5, 9, 11 et 21 couches) à base de CrWN et TiWN ont été développées pour être testées en usinage d'OSB (Oriented Strand Board). Ces revêtements présentent respectivement des duretés

de plus de 44 et 45 GPa et des modules d'Young de plus de 606 et 625 GPa. Les résultats des tests d'usinage ont montré que l'utilisation des multicouches donnent des résultats très intéressants et que les meilleures performances contre l'usure ont été observées.

I.4.4. Les revêtements composites :

Prenons l'exemple des dépôts composites de carbure de tungstène et de cobalt utilisé pour améliorer la résistance à l'usure. Un dépôt WC-Co contenant des particules nanométriques de WC offre une densité de dislocations plus faible qu'avec des particules micrométriques. En conséquence, une structure nanométrique peut donner au matériau une grande dureté et une ténacité élevée [26].

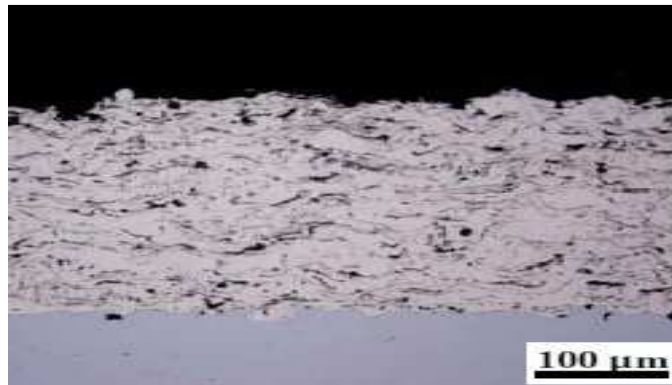


Figure I.19: Images de section transversale

Par ailleurs, la résistance à l'usure abrasive des dépôts cermets WC-Co augmente avec la diminution de la taille de grain WC. Les composites à structure d'échelle nanométrique montrent ainsi une déformation à la rayure purement ductile et une résistance à l'abrasion doublée par rapport au plus résistant des dépôts micrométriques grâce à l'effet spécifique de la taille de grain sur la résistance à l'abrasion. Cependant, lors de la projection thermique, et quel que soit le procédé, le précurseur WC-Co peut se décomposer en W₂C, W et autres phases amorphes (phases de Laves) entraînant alors une diminution de la résistance à l'usure. L'augmentation du taux d'usure est attribuée aussi au plus haut degré de décomposition subit par les particules nano composites pendant la projection ce qui amène à la réduction de la phase WC primaire résistant à l'usure et la formation de phases amorphes fragiles au sein du dépôt [19].

CHAPITRE II : Techniques de caractérisation mécaniques des revêtements

II.1.Essais de dureté:

Les essais de dureté mesurent la pression moyenne de contact des matériaux lors de l'enfoncement d'un indenteur sur une surface plane, elles permettent de mesurer la dureté qui caractérise la résistance à la déformation plastique du matériau. Les résultats obtenus constituent essentiellement des repères, ils permettent d'effectuer des classements, de vérifier la conformité avec les exigences imposées, et en se référant à des approches empiriques et analytiques d'estimer les propriétés mécaniques des matériaux. L'essai de dureté est un essai mécanique simple, peu coûteux, ponctuel et pratiquement non destructif. De ce fait, il est très utile et largement pratiqué dans la caractérisation des matériaux. Il est réalisé selon différentes méthodes, les plus utilisées consistent à enfoncer un pénétrateur de forme bien définie contre la surface du matériau soumis à l'essai, on caractérise ainsi la résistance du matériau à l'enfoncement, sous une charge imposée. les dimensions de l'empreinte après retrait du pénétrateur constitue les paramètres prises en compte pour le calcul de la dureté. Un résumé des différents essais de dureté est présenté dans le [tableau II.1](#) [27].

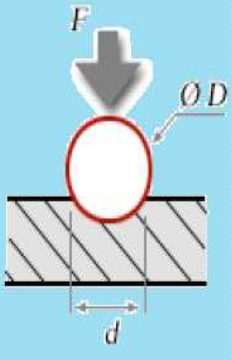
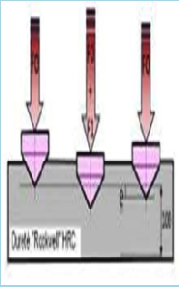
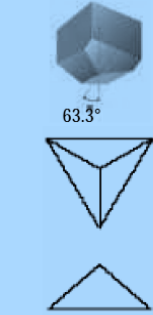
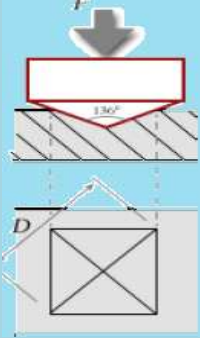
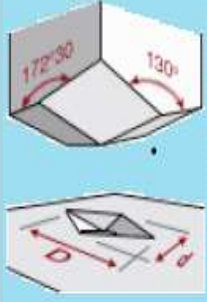
Indenteur	<i>brinell</i>	<i>Rockwell C</i>	<i>Breckoviche</i>	<i>Vickers</i>	<i>Knoop</i>
Nature	<i>carbure</i>	<i>diamant</i>	<i>diamant</i>	<i>Diamant</i>	<i>Diamant</i>
Forme	<i>sphère</i>	<i>Cône</i>	<i>P/ triangulaire</i>	<i>P/ base carrée</i>	<i>P/base losange</i>
Dimensions					
Dureté	$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	HRC=100-e	$H = \frac{P}{(4.95 \cdot d)^2}$	$HV = \frac{1854.5P}{d^2}$	$HK = \frac{14.229F}{D^2}$

Tableau II.1 : Les différents essais de dureté.

II .2 l'indentation instrumentée :

En indentation instrumentée la méthode de mesure est plus efficace, au lieu de s'intéresser à une empreinte rémanente après essai d'indentation, la force normale F en fonction de la profondeur de pénétration h sont mesurées et enregistrées instantanément en continu (in situ) pendant l'essai à l'aide d'un dispositifs d'indentation munis de capteurs, ainsi on obtient une courbe dite de charge- décharge. L'exploitation de la courbe charge- décharge nous permettent par suite de caractériser le comportement mécanique du matériau sous indentation.

L'indentation instrumentée est actuellement très utilisée, Suivant la charge mise en jeu, on peut distinguer trois techniques [28] :

- 1- La macro-indentation : Utilisée pour la détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux massifs. Les forces varient entre quelques centaines de newtons.
- 2- La micro-indentation : Concerne des forces de l'ordre de quelques milli newtons à quelques newtons de 0,1 à 10 N. Elle s'applique à la caractérisation de couches minces et des revêtements avec des épaisseurs moins d'une dizaine de microns mètres.
- 3- La nano-indentation : Permet la mesure des propriétés de surfaces à des profondeurs Inférieures au micromètre. On peut utiliser des charges inférieures au milli newton.

L'instrumentation de l'indentation permet dans les trois cas de déterminer la courbe charge-décharge. Plus la dureté, plusieurs propriétés mécaniques peuvent êtres caractérisées comme l'élasticité, la rigidité et l'énergie de déformation.

II .2.1 Micro indentation instrumentée Vickers :

L'utilisation de couches de revêtements de plus en plus minces a nécessité pour l'étude de leurs propriétés mécaniques, le développement récent d'essais de micro-indentation, où la profondeur de l'empreinte peut se limiter à quelques dizaines de micromètres. Le pénétrateur utilisé est généralement de type Vickers en diamant pyramidal à base carré. La dureté H est obtenue par le rapport de la charge maximale appliquée F_{max} à l'aire A de contact pénétrateur/ échantillon, cette aire est généralement vérifiée après essai par examen en Microscope à réflexion de l'empreinte obtenue. L'instrumentation du micro-indenteur permet de tracer la courbe « force $F_z \times$ déplacement h » [29].

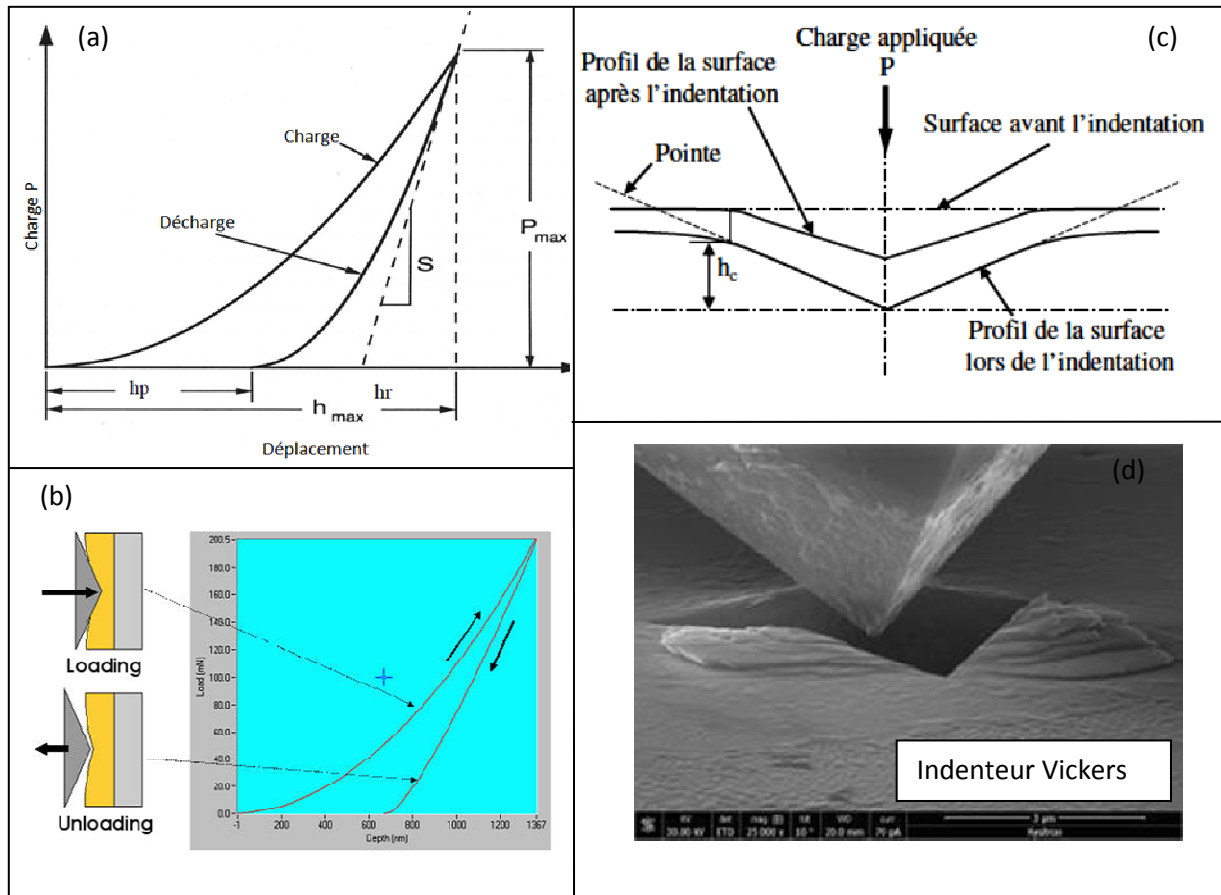


Figure II.1: Principe de l'essai de micro-indentation, (a) allure typique de la courbe charge décharge, (b) courbe obtenue avec logiciel, (c) illustration de la pénétration de l'indenteur Vickers illustré en (d)[28].

II .2. 2. Extraction des propriétés élastiques :

L'analyse de la courbe expérimentale de déplacement de l'indenteur en fonction de la charge (courbe charge-déplacement, Figure II. 1) permet de déduire les propriétés mécaniques de la surface du matériau suivant :

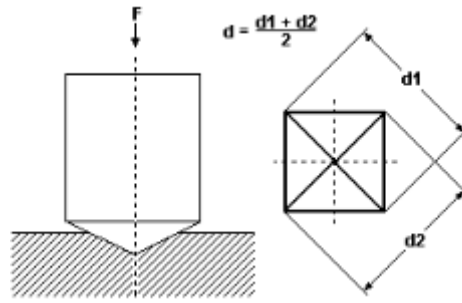
❖ **dureté Vickers:**

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2F \sin 68^\circ}{d^2} = \frac{(1.854F)}{d^2}$$

F: Point de charge en N

A: Surface de l'empreinte en mm²

d: Taille de l'empreinte en mm (Moyenne des diagonales d1 et d2)



❖ **Module élastique :**

$$E = \frac{1 - \nu_s^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \dots\dots\dots(\text{Équation 1})$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\Pi}}{2C \sqrt{A_p}} \dots\dots\dots (\text{Équation 2})$$

Avec :

ν_s : Coefficient de Poisson de l'éprouvette (0.3).

ν_i : Coefficient de Poisson du pénétrateur (0,07 pour diamant).

E_i : Module du pénétrateur en N/mm² (1,14 x 10⁶N/mm² pour diamant).

E_r : Module réduit du contact de pénétration en N/mm²

$A_p = 4.950 \times h_c$ pour pénétrateur Vickers.

$$h_c = h_{max} - e (h_{max} - h_r) \dots\dots\dots(\text{Équation 3})$$

$$C = \frac{1}{m h_r} \dots\dots\dots(\text{Équation 4})$$

mhr: Pente de la droite hr en N/mm.

h_{\max} : Pénétration maximale en mm.

hr : Point d'intersection de la pente hr avec l'axe de pénétration en mm.

$e = 0,75$ (pénétrateur Vickers/Berkovich).

❖ **l'énergie de déformation élastique :**

$$W_{\text{elast}} = W_{\text{total}} - W_{\text{plast}} \dots\dots\dots(\text{Équation 5})$$

W_{total} : Travail de pénétration total (Nmm)

W_{plast} : Travail de déformation plastique (travail de pénétration en Nmm)

W_{elast} : Travail de déformation élastique (Nmm)

Le [tableau II.2](#) présente des données bibliographiques de dureté Vickers avec une charge de 0.5N et le module élastique associées au différents couples de films et substrats obtenus par un processus industriel de déposition physique en phase vapeur.

Film/substrat	HV _s (Gpa)	E _s (Gpa)	E _F (Gpa)	HV _c (Gpa)
Cr/acier HSLA	5.0	200	280	6.1
TiN/acier à outil	6.0	200	600	9.7
TiC/acier à haut C	6.4	200	460	17.4
ZrN _{0.7} /acier	3	220	460	6.9
DLC/acier de bas C	1.9	200	440	4.3
Al ₂ O ₃ /verre	6.6	75	150	10.5

Tableau II.2 : Résultat bibliographique relatifs aux différents film/substrat [30].

II. 3. Propriétés tribologique :

II.3.1. Définition de système :

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. [31].

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. 2) : deux solides 1 et 2 en contact (premiers corps) et le milieu interfacial 3 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 4 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, ... [32].

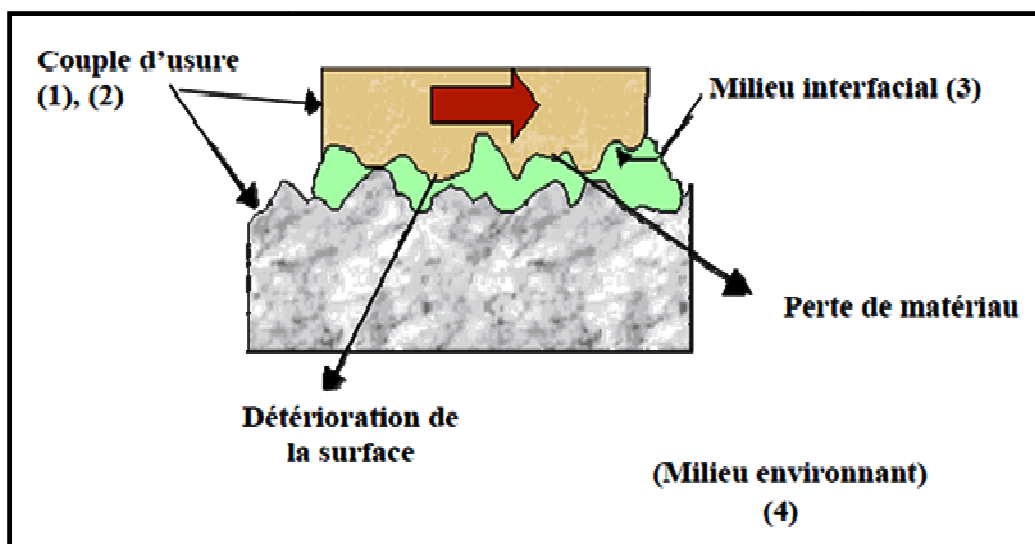


Figure II.2. Structure du système tribologique.

II.3.2. paramètre tribologiques :

Les paramètres tribologique sont des caractéristiques des systèmes mécaniques ayant des surfaces qui interagissent en mouvement relatif. La résistance au mouvement (friction) ou la résistance à l'endommagement des surfaces (usures) dans un environnement donné sont déterminées en relation avec l'action d'un ou plusieurs types de sollicitations.

Un tribosystème est donc caractérisé par des paramètres tribométriques, associés aux conditions opérationnelles, à la microstructure des matériaux et aux modes d'interaction dépendant du contact de la lubrification.

Les principaux paramètres tribologiques sont classés dans les groupes suivant :

- ❖ Les paramètres opérationnels caractérisent les conditions fonctionnelles du tribosystème. Ce sont, dans la plupart des cas, des variables indépendantes qui peuvent être modifiées pour les tests. Les déplacements, le temps et la température.
- ❖ Les paramètres structuraux sont liés aux mécanique d'un tribosystème est constitué des premiers corps et de leur l'interface.
- ❖ Les paramètres d'interaction caractérisent l'action des paramètres opérationnels sur les composants des tribosystème. ils caractérisent le mode de contact (distribution des contraintes de contact), l'état de surface (rugosité) et le type de lubrification pour un couple de matériaux donnés. Ces conditions peuvent être associées aux processus de frottement et d'usure (adhésion, abrasion, réactions tribochimiques, etc.). les forces d'interaction entre les surfaces en contact dépendent, de manière complexe, de la nature physico-chimique et des énergies des surfaces. les contraintes de contact dépendent de la géométrie du contact, de l'élasticité ou dureté des matériaux et de la force externe statique ou dynamique.
- ❖ Les paramètres tribométriques sont des valeurs qui résultent des mesures des interactions à l'interface de contact, donc des systèmes tribologiques. Le frottement sera décrit par des mesures de force ou d'énergie et l'usure par des mesures de géométrie modifiée ou de matière enlevée. D'autres caractéristiques tribométriques peuvent offrir un intérêt : les vibrations induites au frottement, le changement de composition des surfaces, la caractérisation des débris d'usure [33].

II.3.3. différents tribomètres utilisés en mécanique

II.3.3.1. Tribomètre pion-cylindre

Ce tribomètre est simulé le frottement des pièces segment/chemise de compresseurs à sec. Il a été utilisé dans de nombreux cas d'applications comme guides fils de machines textile, frein automobile et ferroviaire, rotules de tramways, cage de roulements à billes et vis à rouleaux aéronautiques, caténaire/pantographe du TGV (Trains à Grande Vitesse), fourchettes de boîte à vitesse.

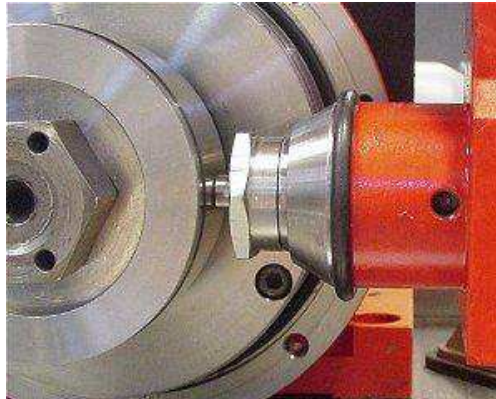


Figure II.3 : Schéma du tribomètre pion-cylindre [34].

II.3.3.2. Pion-plan alternatif

Le tribomètre pion-plan à mouvement alternatif est un modèle de tribomètres très courant, sa cinématique correspond à de nombreuses applications industrielles (piston/chemise de moteur, compresseur et pompes, joint radial/axe de vérins, palier alternatif de machine textile...).



Figure II.3 : Schéma du tribomètre Pion-plan alternatif [34].

II.3.3.3. Tribomètre pion –disque rotatif :

Le pion-disque est un des modèles de tribomètre les plus courants dans les laboratoires de par sa simplicité. En tribométrie, une bille, une pointe ou un plan est placé en contact avec la surface de l'échantillon sous une charge prédéfinie. Le dispositif est monté sur un bras de levier, et associé à un capteur de déplacement. Le coefficient de frottement est déterminé durant le test en mesurant la déflexion de ce bras élastique. Les taux d'usure pour la bille et le pion sont calculés en déterminant la perte de volume durant le test. Cette méthode simple facilite l'étude des mécanismes de frottement pour une grande variété de couple de matériaux avec ou sans agent de lubrification. En outre, le contrôle des paramètres de test tels que la vitesse, la pression de contact, la fréquence, la durée de test ainsi que les paramètres environnementaux (température, hygrométrie, lubrification), permettent de reproduire les sollicitations réelles d'utilisation de ces matériaux.

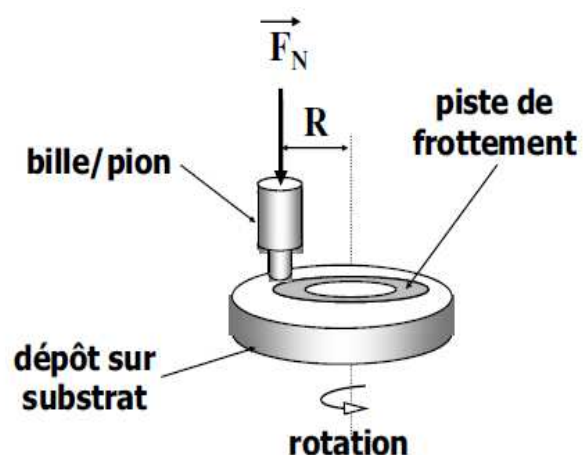


Figure II.4 : Schéma du tribomètre pion-disque rotatif [34].

II.3.4. Coefficient de Frottement

Le frottement est défini comme la résistance au mouvement d'un corps quand il se déplace tangentiellement par glissement ou par roulement sur un autre. La force tangentielle qui agit dans la direction opposée au mouvement est nommée force de frottement. La force tangentielle requise pour initier le mouvement est la force de frottement statique F_s , alors que la force tangentielle requise pour produire le mouvement relatif est connue comme force de frottement cinétique ou dynamique F_k , avec la force de

frottement statique supérieure ou égale à la force de frottement cinétique. Les lois fondamentales qui gouvernent le frottement des corps solides ont été proposées par Coulomb en 1875 avec les hypothèses suivantes [35]:

- le frottement statique doit être supérieur au frottement dynamique.
- le frottement est indépendant de la vitesse de glissement.

Le frottement est communément représenté par le coefficient de frottement (μ), qui est le rapport de la force de frottement (F_f) sur la force normale appliquée (F_n).

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \quad (\text{Équation 6})$$

II.3.5. Taux d'usure :

En 1953, Archard [36], 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 :

$$k = \frac{V}{F_n \cdot l} \quad (\text{Équation 7})$$

Avec : k : le taux d'usure (en $\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$)

V : le volume de matière perdue (en m^3)

F_n : la charge appliquée (en N)

l : la longueur de glissement (en m)

II.3.6. Taux d'usure du disque :

Le coefficient d'usure de la piste k_p ($\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$) est calculé à partir des relations suivantes [36] :

$$k_p = \frac{V_p}{F_n \cdot l} = \frac{2\pi \cdot r \cdot S_{usure}}{F_n \cdot 2\pi \cdot r \cdot n} \quad (\text{Équation 8})$$

$$k_p = \frac{S_{usure}}{F_n \cdot n} \quad (\text{Équation 9})$$

S_{usure} : l'aire de la section de la piste d'usure sont déterminées profil mètre (figure II.8)

n : le nombre de Tours

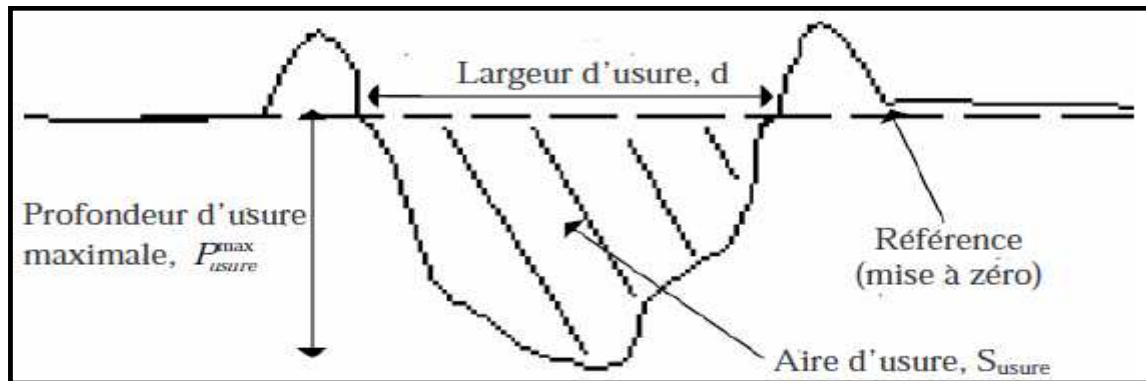


Figure II.5: Aspect d'un profil de piste d'usure par rugosimètre.

II.3.7. Théorie du troisième corps :

Rappelons ici que l'usure peut se séparer en plusieurs étapes à savoir la formation des débris, leur évolution dans le contact, leur comportement (évacuation ou accumulation). Les débris ont ainsi une action mécanique très importante et contrôlent l'usure ainsi que la réponse au frottement. Les débris se compactent en films superficiels denses à partir de grains arrachés des surfaces. Une quantité constante de débris conduit à une stabilisation du coefficient de frottement et une augmentation de ce coefficient traduit une phase de compaction alors qu'une diminution reflète une élimination de débris. En fait, il y a souvent accumulation de débris jusqu'à une valeur maximale correspondant à un état stationnaire. Comme précédemment, on peut dire que l'action agressive ou protectrice des débris dépend essentiellement de la quantité piégée dans le contact et que le troisième corps aura soit un rôle lubrifiant soit un rôle abrasif [37].

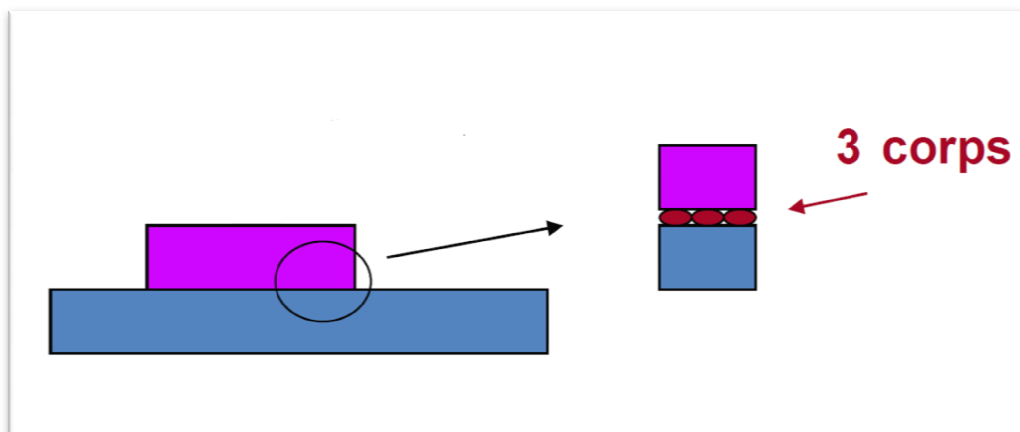


Figure II.6: Troisième corps .

II. 4 Contrôle de rugosité :

La rugosité concerne les défauts micro géométriques de la surface réelle. La cotation des états de surface fait essentiellement référence à l'usinage par enlèvement de matière. Les défauts sont des stries et des sillons creusés par les arêtes coupantes des outils (outils de tournage, fraises, meules, etc...). la rugosité joue un rôle sont très varies :

- en mécanique, elle crée du frottement, de l'usure, une force de trainée, etc. Elle peut parfois être bénéfique pour capturer les huiles
- en adhésion, la rugosité s'oppose à un contact intime entre les deux objets, difficulté contournée par la déformabilité des matériaux collants[38].

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx$$

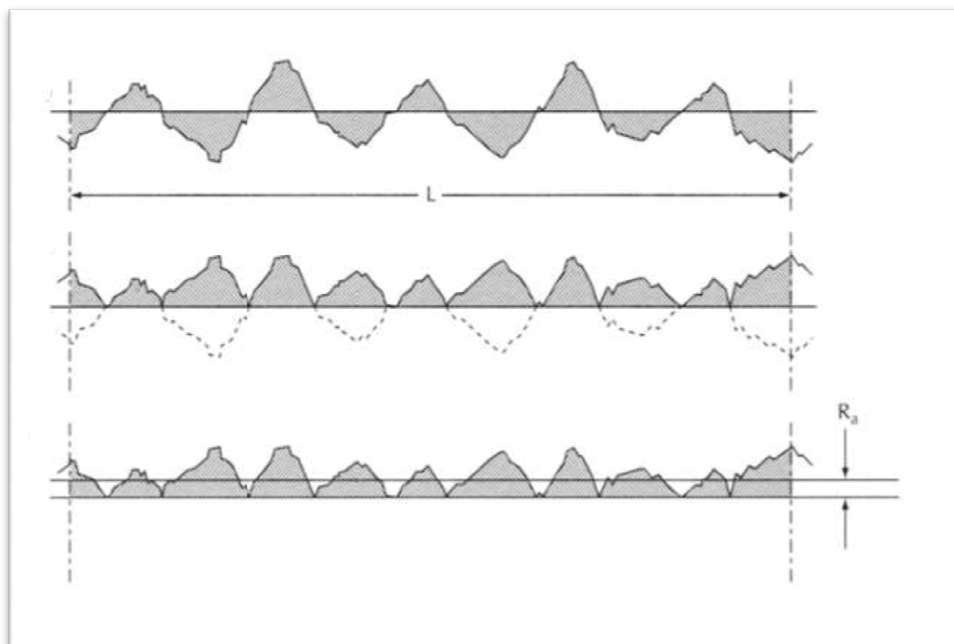


Figure II.7: Paramètre de rugosité Ra

III.1.Introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter les divers moyens d'élaboration et de caractérisation employés au cours de ce travail, ainsi que les informations qu'ils fournissent. Ces dernières seront détaillées ainsi que leurs conditions de validités.

III.2. Substrat :

Un acier ordinaire de très faible taux de carbone a été utilisé dans cette étude comme substrat. Cet acier est disponible au niveau de l'atelier de soudage sous forme de tôle épaisseur de 4 mm, coupées en forme parallélépipédique 50 x 50 mm (figure.III.1.B). L'analyse chimique du substrat a été réalisée au niveau du laboratoire de l'entreprise BCR Aïn El Kebira Sétif, sa composition chimique est donnée dans le [Tableau III-1](#).

TYPE	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	AL	Cu
XC10	0.09	0.03	0.39	0.018	0.013	0.01	0.01	0.00	0.057	0.00
V	Sn	As	Ca	B	N	C ₀	Fe	Ti		
0.00	0.00	0.005	0.0001	0.021	0.024	0.00	99.35	0.0007		

Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier utilisé pour les substrats.

La microstructure de cet acier (C=0.09) est constituée principalement de la ferrite avec une très faible portion de perlite dans les joints de grains. (Figure III.1).

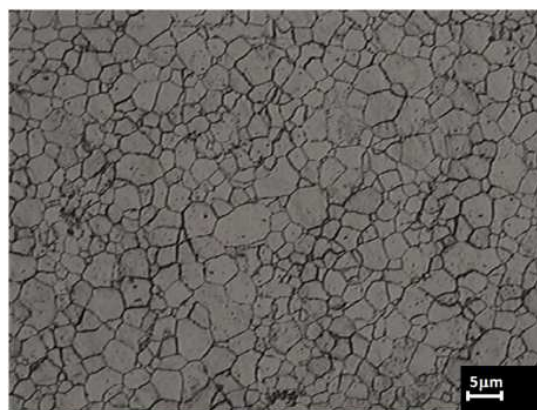


Figure III.1 : Microstructure du substrat.

III.3. Poudres composites :

Les poudres utilisées dans le cadre de ce projet ont été préparées par mélange de deux poudres sélectionnées parmi celles disponibles au niveau du laboratoire LTSM Blida, et ce pour les propriétés très intéressantes dont elles disposent en terme de résistance à l'usure, à l'érosion et à la corrosion :

- ❖ Poudre d'un alliage Cr-Ni-B-Si-Fe nommé sous Eutalloy® Borotec 10009 selon la désignation du producteur Castollin Eutectic.
- ❖ Poudre d'un alliage de carbures de tungstène avec 17% de cobalt WC17Co désigné WOKA 3203 selon le producteur Sulzer Metco.

Plusieurs poudres composites ont été utilisées avec différentes proportions de WC17Co.



Figure III.2 : Poudre composite Cr-Ni-B-Si-Fe

III.4. Préparation de surface :

Le sablage a été utilisé dans la préparation de surface des échantillons afin de créer la rugosité nécessaire pour favoriser l'ancrage mécanique et assurer l'adhésion du revêtement au substrat. Cette opération est faite aussi pour éliminer toute trace de graisse, de rouille et d'oxydes qui se trouvent éventuellement sur la surface des échantillons. L'augmentation de la rugosité de surface est obtenue par un jet à grande vitesse des grains de tailles micrométriques de sables d'alumine (Al₂O₃) contre l'échantillon à l'aide de l'air comprimé sous une grande pression. Le grenailage est réalisé au niveau du laboratoire LTSM Blida.



Fuguer III.3 : Appareil de sablage.

III.5. Procédé d'élaboration des revêtements :

III.5. 1.Réalisation des revêtements :

Après la préparation des surfaces, la réalisation des revêtements a été faite par projection thermique à la flamme oxyacétylénique. Une torche à flamme de type fusion-refusions de Castollin Eutectic désigné par Eutalloy Super Jet a été utilisé pour l'exécution des revêtements sur des substrats en acier. Le kit Eutalloy Super Jet utilisé est représenté dans la [figure III.4](#).



Figure III.4: Kit Eutalloy

III.5. 2. Paramètres de projection des poudres :

Les paramètres de projection utilisés lors d'élaboration sont donnés dans le [tableau III.2](#).

Paramètres de projection	
Pression d'oxygène	2.5 bars
Pression d'acétylène	0,6 bar
Distance de projection	30 – 40 mm
Angle de projection	90°
Distance de la refusions	15 – 20 mm
Angle de refusions	45°

Tableau III.2 : Les paramètres de la projection fusion – refusion

La technique de projection est décrite comme suit :

- ❖ Afin d'assurer une bonne adhérence du dépôt au substrat un préchauffage de la surface du substrat a été effectué jusqu'au bleu (250 C°-300 C°) par un passage de la torche sans apport de poudre.
- ❖ Projection thermique de la poudre par un balayage de toute la surface du substrat par la torche à flamme.
- ❖ Refusions du revêtement déposé par un repassage avec la torche (sans apport de poudre) sur le substrat afin de faire fondre la matrice et noyer les particules de carbures de tungstène dans celle-ci.

III .6. Technique de caractérisation :

III.6.1. Microscopie métallographique :

L'observation microscopique des échantillons a été faite à l'aide d'un microscope métallographique de type Axio vert 40 MAT muni d'une caméra « Carl Zeiss ». La qualité optique est assurée par un large éventail de méthodes de contraste, image redressée et une source de lumière standard en réflexion (12V/35W). Muni de revolver porte objectifs, la variante de revolver à 5 objectifs fond clair permet d'obtenir rapidement des grossissements standards sans avoir à démonter les objectifs (10X ,20X, 40X, 100X, 200x).



Figure III.5 : Microscope métallographique Axio vert 40 MA

III.6.2. profilomètre mécanique :

La rugosité (R_a) ainsi que la surface de piste d'usure (S) ont été mesurées par un profilomètre mécanique de type TAYLOR HOBSON TALYSURF 120. Un profilomètre est composé d'un palpeur P, d'un capteur de haute pression, d'une unité de translation UT, d'un calculateur C, et d'un enregistreur de profil (logiciel sur un micro-ordinateur PC). Le palpeur est muni d'une extrémité en diamant sous forme conique, la pointe très fine du palpeur explore la surface de la pièce suivant un mouvement horizontal. Un capteur solidaire à la pointe permet de mesurer la position verticale Z lorsque l'unité de translation se déplace horizontalement (axe X) sur la surface. Le calculateur et unité d'enregistrement permettent ainsi d'établir le profil $Z=f(X)$ de la surface.



Figure III.6: Profilomètre de type Taylor Hobson Talysurf 120.

III.6.3. Etude d'indodation instrumentie :

III.6.3.1. l'instrument d'indentation :

L'indentation instrumentée a été réalisée par un micro indenteur Vickers ZWICK de type ZHU 2.5 KN (figure III.7) avec la méthode indentation Martens (EN ISO 14577). L'instrument est composé d'une tête d'indentation avec indenteur Vickers de forme pyramidale à base carrée d'angle au sommet θ de $136^{\circ} \pm 30'$.

La mesure l'empreinte résiduelle après le retrait de l'indenteur est assurée avec système optique muni de quatre grossissements (X10, X20, X40 et X100), le grossissement choisi est automatiquement pris en compte par l'unité de l'appareil. L'unité de commande de grande précision avec le logiciel intelligent test Expert permet d'appliquer une gamme de charge de 2-200N.

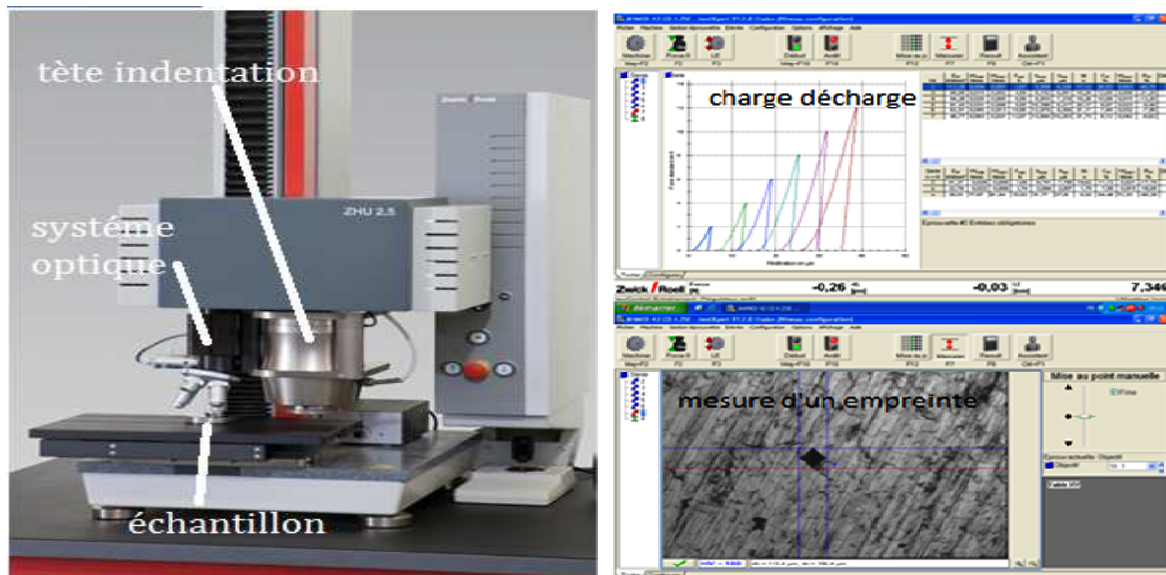


Figure III.7 : Instrument de micro indentation Vickers.

III.6.3.2 .Essai d'indentation :

Avant de procéder à l'indentation, les échantillons ont subis un polissage mécanique avec papier en carbure de silicium SiC jusqu'à 2500. Les essais d'indentation ont été réalisés avec une gamme de charge de 2-50 N. Les paramètres opératoires des essais sont donnés dans le [Tableau III. 3](#).

Vitesse du point de contact	0.5 (mm/min)
Vitesse de charge	0.5 (mm/min)
Vitesse de décharge	0.1 (mm/min)
Le temps d'attente	15 (S)
La température de Millau	25 (C°)
Le taux d'humidité	30 (%)

Tableau III. 3 : Paramètre des essais d'indentation.

III.6.4. Etude de micro dureté :

III.6.4.1. Machine d'essais Micro Dureté :

la micro dureté est réalisée sur un micro-duromètre de marque Tukon 2500. Cette d'une tourelle à 5 positions pour adapter l'appareil (1 à 2 cellules de force et de 1 à 4 objectifs). Le (ou les) pénétrateur(s) sont montés directement en sortie de cellule de force, pour une plus grande précision de mesure. L'appareil peut fonctionner avec une cellule (soit 05gramme à 1Kg, soit 300 grammes à 50Kg) ou avec deux cellules (gamme de 05gr à 50Kg). Ce système dispose d'un ensemble optique de très grande qualité, associée à une caméra numérique haute résolution de 5Mpx. Ce kit optique permet de travailler avec un zoom optique fournissant, pour un même objectif, une palette de 5 grossissements calibrés.



Figure III.8 : Machine d'essais Micro Dureté

III.6.4.2. Essai de micro dureté :

Nos échantillons ont été préparés en coupe transversale, et enrobés avec une résine époxy (EpoFix de Struers) qui réticule à froid en douze heures. L'enrobage a été réalisé sous vide avec dégazage de la résine au préalable. Puis les échantillons enrobés ont été tronçonnés à la meule avant polissage. Ils ont ensuite été polis à l'état miroir sur des papiers SiC de grades 1200, 2500, et 4000.

Les essais ont été réalisés sur des coupes transverses avec une charge de 0.1N sur une distance de 650 mm avec un pas de 50 mm. Les résultats donnés correspondent à des moyennes sur 3 mesures. Les paramètres opératoires sont précisés dans le [Tableau III.4](#).

Vitesse du point de contact	0.5 (mm/min)
Vitesse de charge	0.5 (mm/min)
Vitesse de décharge	0.1 (mm/min)
Le temps d'attente	15 (S)
La température de Millau	25 (C°)
Le taux d'humidité	32 (%)

Tableau III. 4 : Paramètre des essais de micro dureté.

III.6.5. Etude tribologique :

III.6.5.1.L'instrument tribomètre pion / disque :

Pour la caractérisation tribologique nous avons utilisé un tribomètre pion-disque de type NANOVEA T50 qui fournit l'usure et le coefficient de frottement conformément aux normes ISO et ASTM. Conçu, à la base, avec un moteur de haute qualité, le tribomètre T50 est conçu pour des charges de 100mn à 40N, aussi il offre une gamme de vitesses de rotation de 0,01 à 2000 tr/min (RPM).

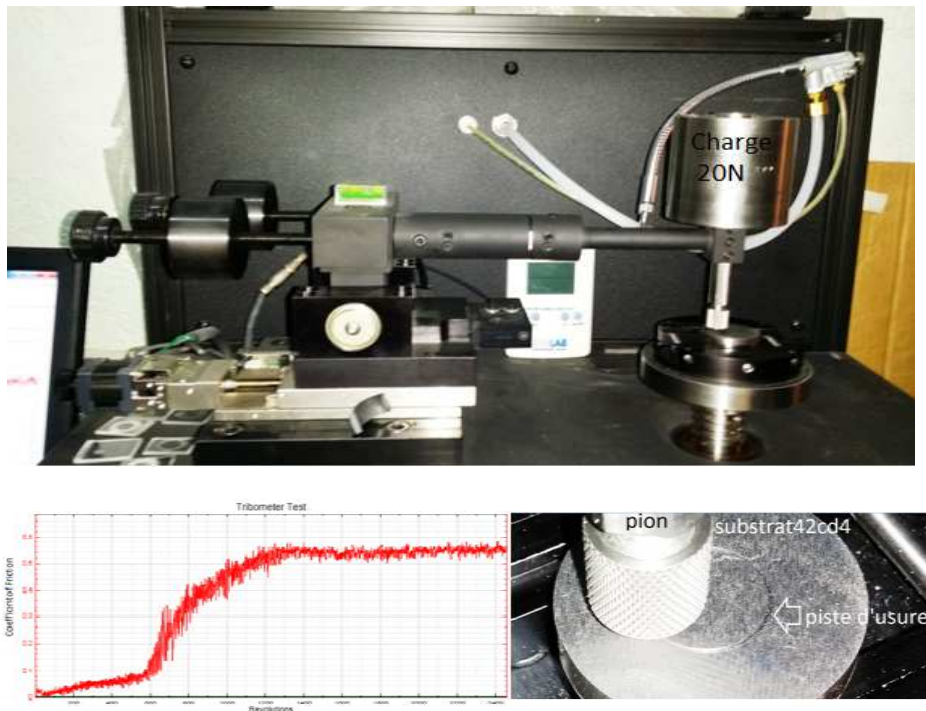


Figure III.9: Tribomètre NANOVEA T50 pion /disque.

III.6.5.2.Essai d'usure :

L'essai d'usure est assuré par le glissement relatif du disque (échantillon) avec la bille (pion) appuyant sur le disque avec une force choisie au préalable. Cette force est sélectionnée moyennant des essais préliminaires visant à fixer les conditions optimales pour un contact stable. Ainsi, la surface usée prendra la forme d'une couronne circulaire, nommée piste, de rayon moyen R , choisi d'avance, et d'une largeur dépendant de l'enfoncement de la bille dans le dépôt. Les paramètres opératoires des essais tribologiques effectués indiqués dans le [Tableau III. 5](#).

Pion	Bille 100C6 (diamètre 6 mm)
Charge appliquée	20 (N)
Distance de glissement totale	2400 (m)
Vitesse de rotation	30 (tr/min)
La température de Millau	20 (°C)
Le taux d'humidité	30 (%)

Tableau III. 5:Paramètres des essais tribologiques

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les principaux résultats obtenus dans cette étude. Des commentaires et les interprétations sont donnés pour chaque étape.

IV.2 Résultats de la rugosité (Ra) et épaisseur de revêtements

La rugosité du substrat et des différents revêtements ont été mesurées à l'état projetée et après rectification, exprimées par le paramètre Ra. Les valeurs numériques déterminées sont une moyenne de quatre mesures réalisées sur des profils décalés de 45° les uns des autres (Figure IV.1).

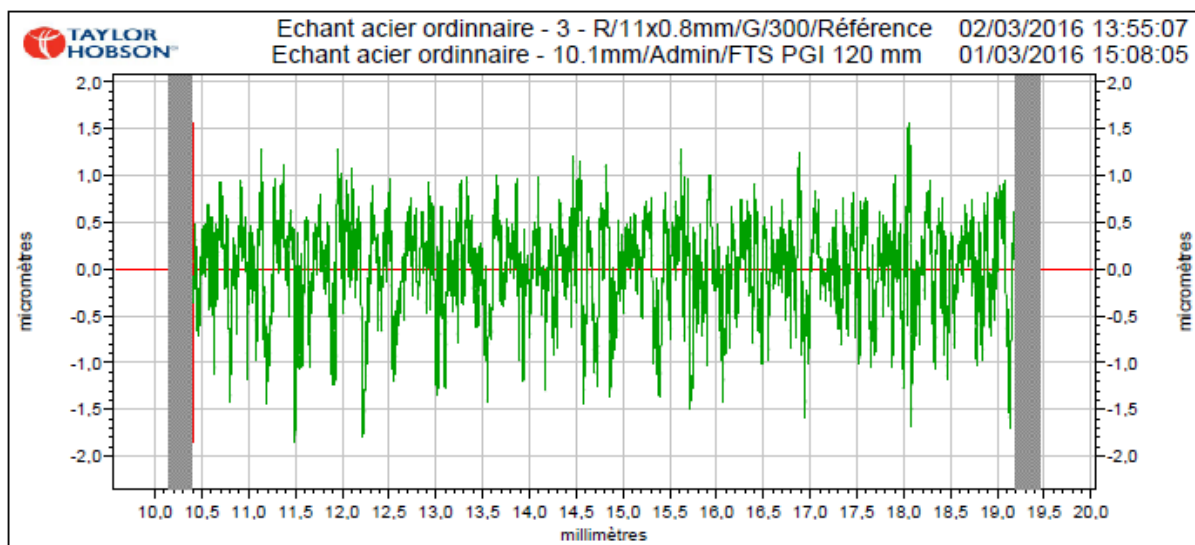


Figure VI.1 : Profil caractéristique de la rugosité superficielle du substrat .

SUBSTRAT		10009+0%	10009+15	10009+30	10009+45	10009+60
		WC17C ₀	%WC17C ₀	%WC17C ₀	%WC1C ₀	%WC17C ₀
R _a (μm) état Projetée		1.2562	1.9338	2.6162	4.1526	5.6152
R _a (μm)après Rectification	0.39 56	0.0276	0.047	0.065	0.1206	0.1976
Epaisseur du revêtement (μm)		270-280	340-350	350-360	300-310	290-300

Tableau IV.1 : différents résultat de rugosité et épaisseur.

D'après le [tableau IV.1](#) et la [figure IV.2](#), on constate que la rugosité des revêtements augmente avec l'augmentation de la concentration de WC17C₀, à l'état projetée ainsi qu'après rectification le revêtement à 0% de carbure de tungstène offre le meilleur état de surface par rapport aux différents autres revêtements élaborés ainsi que la plus grande épaisseur est remarquée dans le revêtement à 30% WC17C₀.

Nous constatons aussi que, comparés au substrat nu, les différents revêtements offrent un meilleur état de surface.

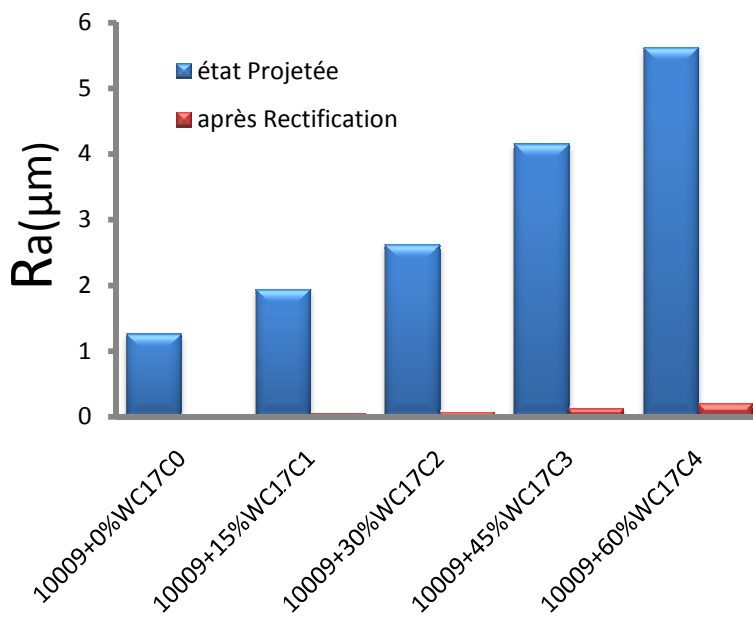
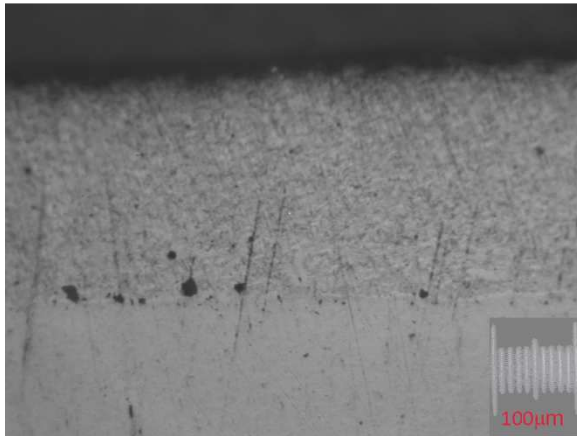


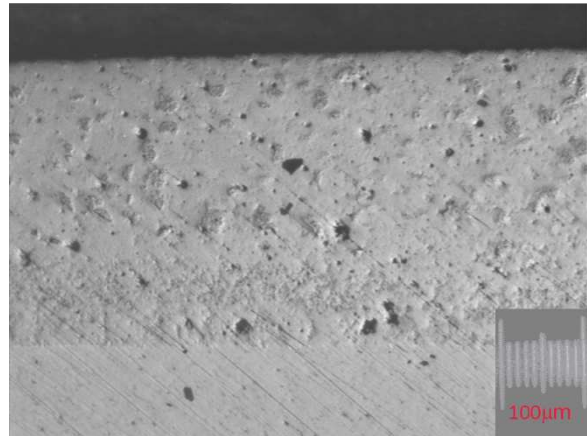
Figure VI.2 : Estogramme de la rugosité superficielle de projetée et après rectification.

IV.3. Etude métallographique des revêtements

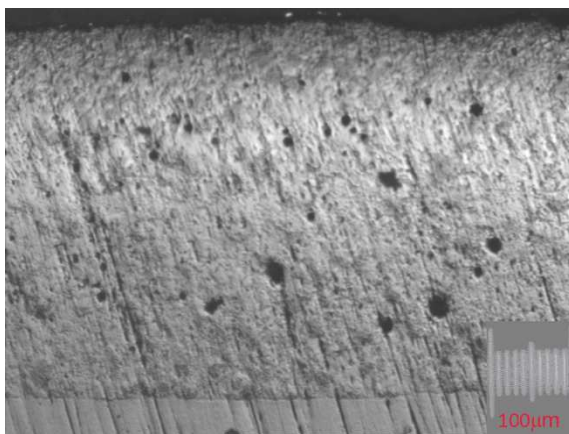
Après une bonne préparation métallographique, nous sommes passés à l'observation au microscope métallographique. Les micrographies optiques obtenues pour les différents revêtements, sont représentées dans la [Figure IV. 3](#).



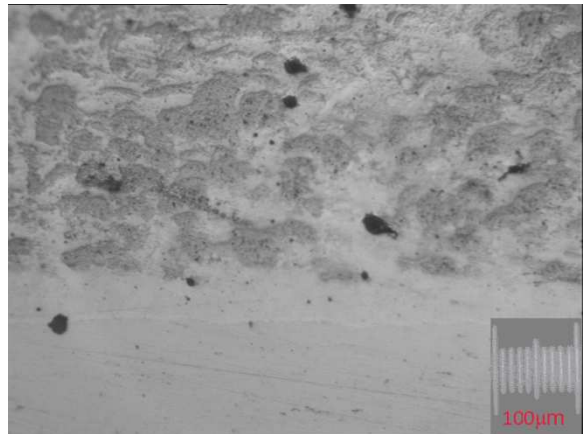
10009 -0%WC-17C₀



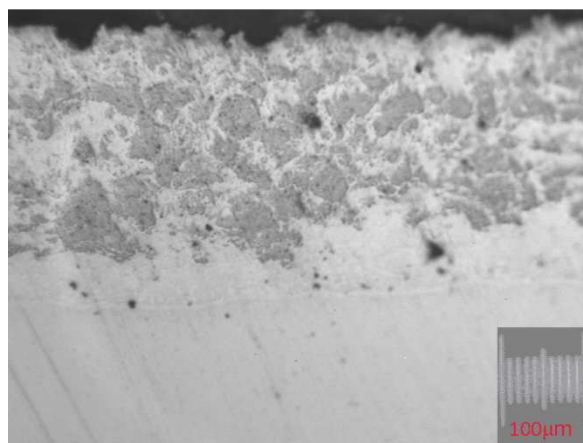
10009-15%WC-17C₀



10009-30%WC-17C₀



10009 -45%WC-C₀



10009 -60%WC-17C₀

Figure IV.3 : La micrographie de différents revêtements.

D'après ces micrographies, on peut constater ce qui suit :

- Un bon accrochage mécanique des revêtements sur le substrat, tel que nous n'avons pas constaté la présence des défauts ni des porosités, ni les délaminages à cet endroit, ce qui est un indice de bonne adhésion des revêtements.
- On remarque la présence de certains défauts dans les revêtements que nous considérons comme des particules non fondues liées aux conditions de projections. La Taille des particules non fondues augmente avec l'augmentation du pourcentage de carbure tungstène.
- Une distribution homogène des particules de carbure tungstène dans la couche pour 15% et 30% de WC17C₀.

IV.4 Etude tribologique des revêtements composites et du substrat

Il est bien connu que le comportement tribologique est étroitement lié à l'état des surfaces participant au contact tribologique. Afin de comparer l'usure du substrat (acier ordinaire) et des différents revêtements 10009+(0%-15%-30%-45%-60%) WC17C₀, la rectification des surfaces des revêtements et du substrat, dans les mêmes conditions, permet d'augmenter l'aire de contact avec la bille du tribomètre et favorise le contact élastique entre les deux corps.

IV.4.1 coefficient de frottement

Le **Tableau IV.2** présente l'évolution du coefficient de frottement à sec des dépôts contre une bille d'acier 100C6 de 6 mm de diamètre. Ses valeurs moyennes sont obtenues après 2451.416 Tour avec une charge de 20N et une vitesse linéaire de 30 mm/min. Le temps d'essais est de 15 min.

COF	Substrat	10009+0% WC17C ₀	10009+15 %WC17C ₀	10009+30 %WC17C ₀	10009+45 %WC17C ₀	10009+60 %WC17C ₀
μ	0,445101	0,0732683	0,1762946	0,3009390	0,4900973	0,5631068

Tableau IV.2 : les valeurs moyennes du coefficient de frottement.

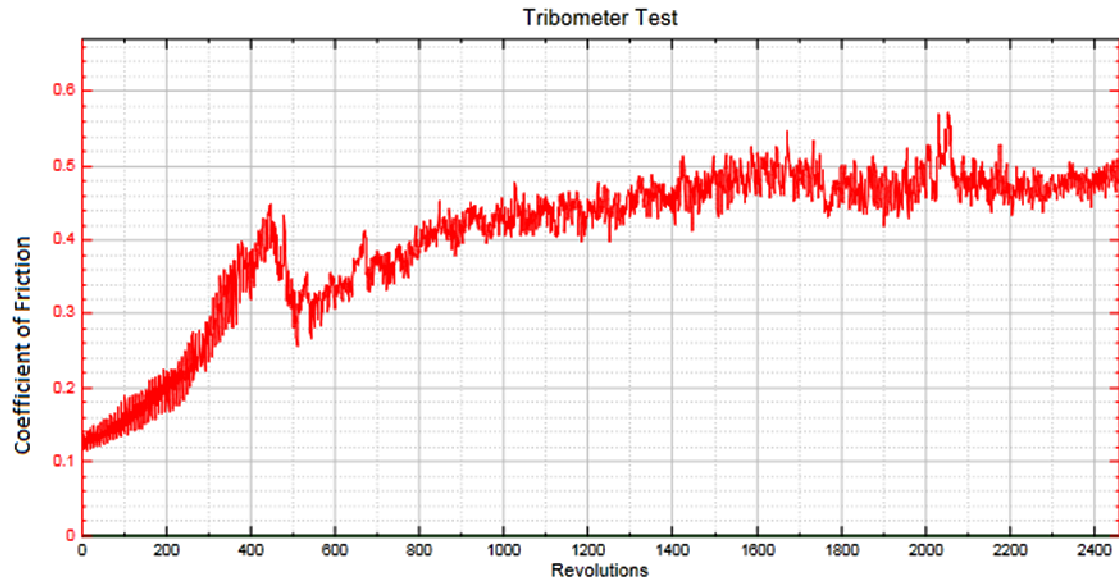


Figure IV.4 : Evolution caractéristique du coefficient de frottement d'un substrat.

La courbe de frottement du substrat (Figure IV. 4) met en évidence deux comportements, la première partie de la courbe correspond à la phase d'accommodation de surface du disque et du pion lorsque le contact s'établit, Elle est observée lors des 800 premiers révolutions. La deuxième phase présente une stabilisation du coefficient de frottement avec une faible évolution.

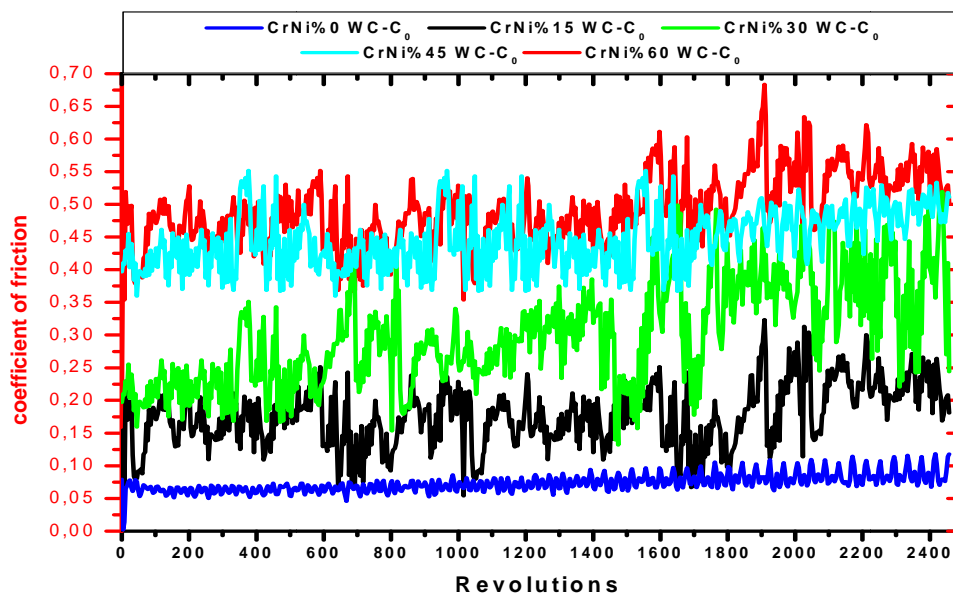


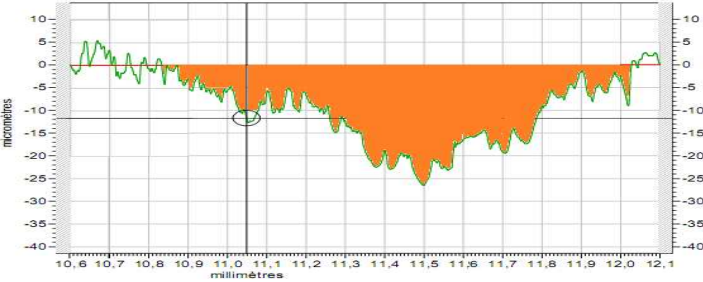
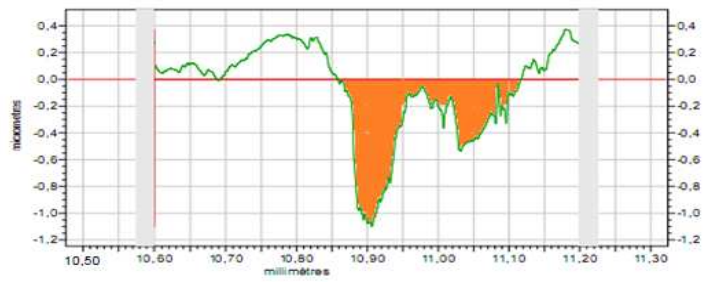
Figure IV.5 : Evolution caractéristique du coefficient de frottement des revêtements.

Les courbes de frottement des dépôts (Figure IV.5) mettent en évidence différents comportements en frottement pour différents pourcentages de carbure de tungstène. Plus le taux de carbure de tungstène est élevé plus le coefficient de frottement l'est aussi. Après une comparaison entre le substrat (acier ordinaire) et les revêtements on remarque que :

- ❖ amélioration du coefficient de frottement de 0.345 pour le substrat à 0.0732 avec le revêtement 10009-0% WC17C₀.
- ❖ l'augmentation de pourcentages de carbure de tungstènes dans le composite augmente le coefficient de frottement et les bruit.
- ❖ élimination de phase transitoire dans les Cinq revêtements.

IV.4.2 les profils de piste d'usure

Après chaque essai, les différentes caractéristiques du profil permettant de quantifier l'usure de l'échantillon. La largeur d, la profondeur maximale P et l'aire S_{usure} de la section de la piste d'usure sont déterminées par profilomètre à l'aide du rugosimètre. Les échantillons sont nettoyés par ultrasons dans un bain d'éthanol pendant 1 minute et séchés à l'air libre pour dégager les débris accrochés à la piste d'usure. Le Tableau IV.3 présente les profils de chaque échantillon.

dimensions	Le profil
Substrat (acier ordinaire) Largeur d'usure : 1,4 mm Profondeur d'usure : 28µm Surface d'usure : 16458,5µm ²	
10009+0%WC17C ₀ Largeur d'usure : 0,27 mm Profondeur d'usure : 1,1µm Surface d'usure : 869,5 µm ²	

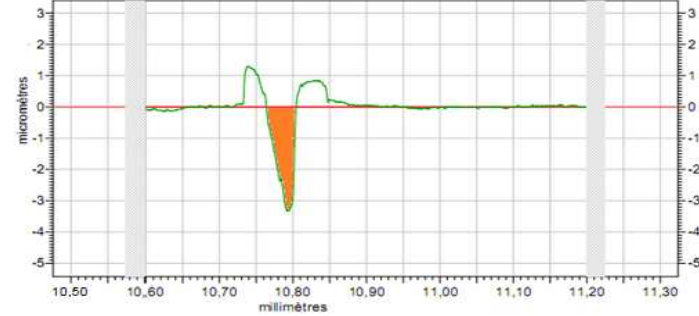

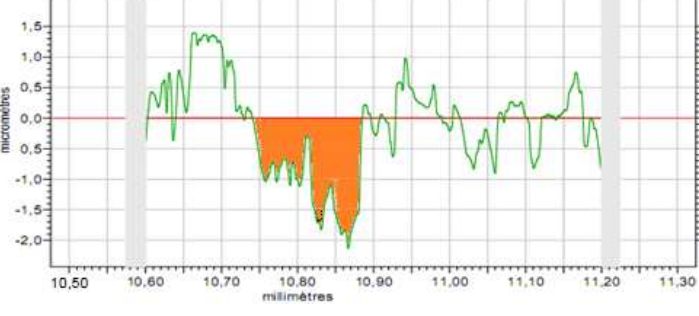

<p>10009+15%WC17C₀ Largeur d'usure : 0,025 mm Profondeur d'usure : 3,1µm Surface d'usure : 793,4 µm²</p>	
<p>10009+30%WC17C₀ Largeur d'usure : 0,05 mm Profondeur d'usure : 4,3µm Surface d'usure : 595,45µm²</p>	
<p>10009+45%WC17C₀ Largeur d'usure : 0.125 mm Profondeur d'usure : 1.9 µm Surface d'usure : 1156 µm²</p>	
<p>10009+60%WC17C₀ Largeur d'usure : 0.325 mm Profondeur d'usure = 10 µm Surface d'usure S=4426µm²</p>	

Tableau IV.3 : Les profils des pistes d'usure des différents revêtements et du substrat.

IV 4.3 Taux d'usure

Pour ces essais de frottement, le taux d'usure a été déterminé pour chaque échantillon (disque). La comparaison des résultats (Figure IV. 6) montre que le taux d'usure du substrat à $k=335,9456 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2/\text{N}$ diminue avec la diminution du taux de carbure de

tungstène dans le composite du revêtement, le plus faible volume perdu est obtenu pour le revêtement composite 10009+30%WC17C₀ à $k=10,719510^{-3}\mu\text{m}^2/\text{N}$.

Il est nécessaire d'évoquer aussi que la perte de matière du substrat est très importante car l'usure de ce type est toujours accompagnée par une déformation plastique. Alors que l'usure des revêtements composites est vraisemblablement contrôlée par cisaillement des débris, d'où l'écaillage observé.

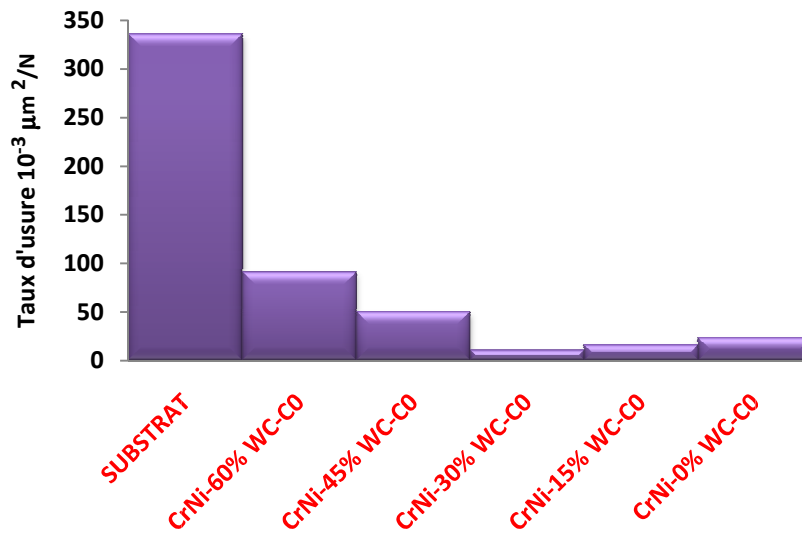
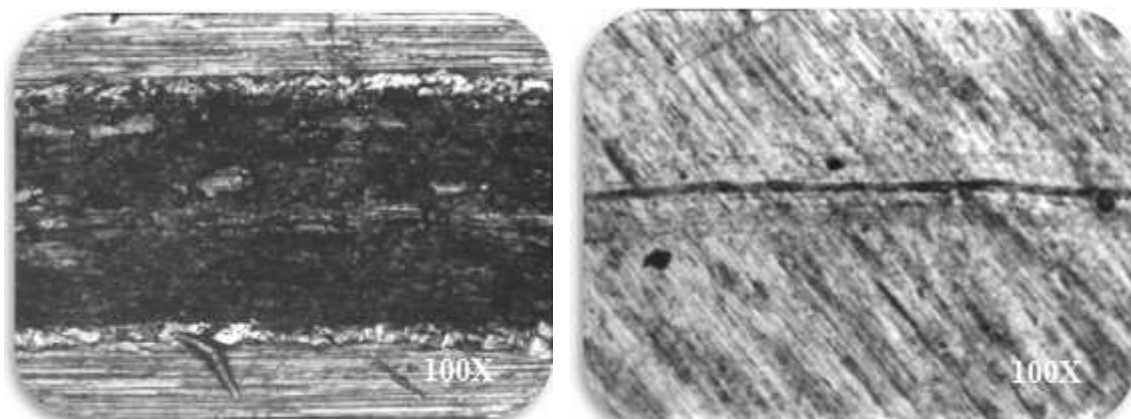


Figure IV.6: Taux d'usure de substrat et différent revêtement.

IV.4.4 Observations métallographiques sur les pistes d'usure

Pour identifier les mécanismes qui contrôlent l'usure du substrat et des revêtements étudiés, nous avons effectué des observations métallographiques afin de mettre en évidence les faciès de détachement des débris.



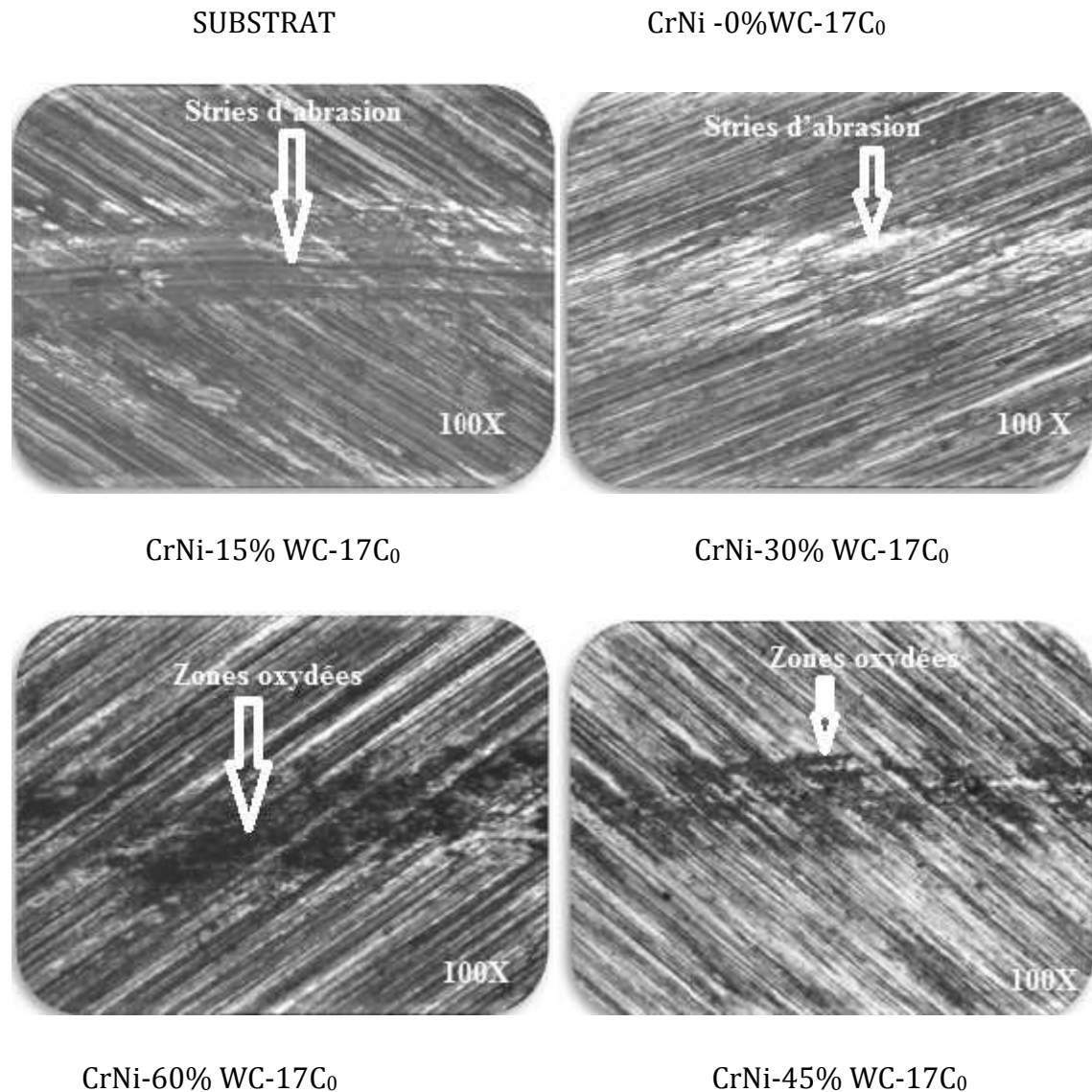
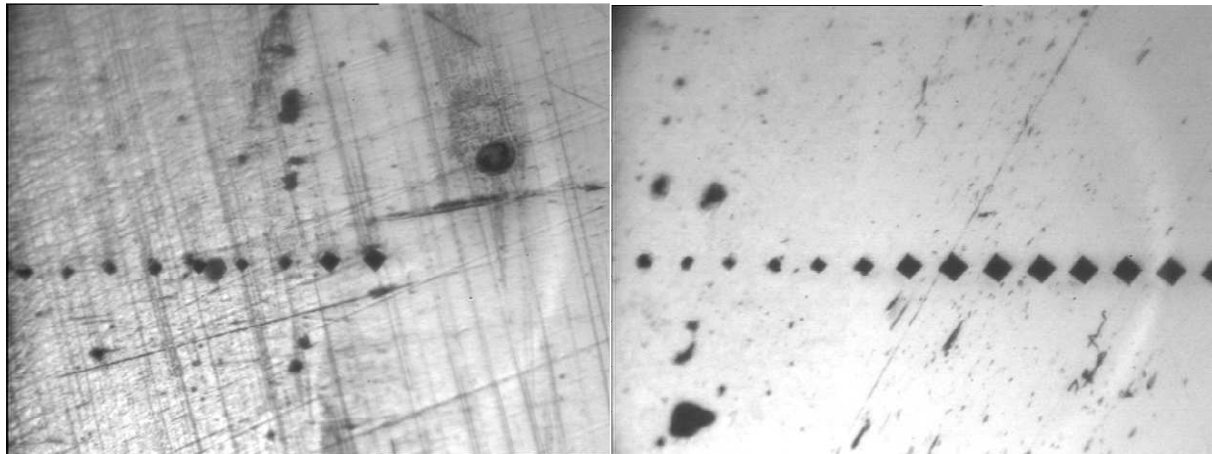


Figure IV.7 : Micrographie optique des pistes d'usure du revêtement.

La figure IV. 7 donne les micrographies optiques des pistes pour les différents revêtements et le substrat sous les mêmes conditions d'essais. On remarque que la piste du substrat est uniformément usée, les bords sont régulièrement délimités. Ceci prouve que l'usure est du type usure douce. Cependant, les micrographies des pistes des revêtements montrent une hétérogénéité importante dans le détachement des débris, les bords des pistes ne sont pas réguliers et les fonds des pistes sont déchiquetés, ces remarques laissent supposer que l'usure est de type abrasion (sévère).

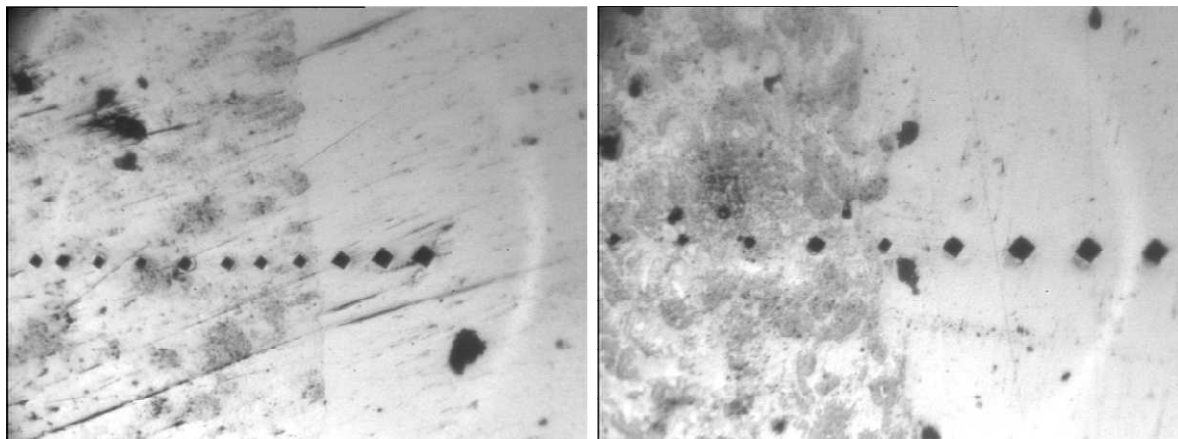
IV.5 Etude de micro dureté

Les mesures de micro dureté Vickers HV ont été effectuées sur une coupe transversale sous une charge de 0,1N. Pour avoir un bon profil de la micro dureté nous avons pris dix points avec un pas de 50 μ m en allant du dépôt vers le substrat. Les résultats donnés correspondent à des moyennes sur trois mesures.



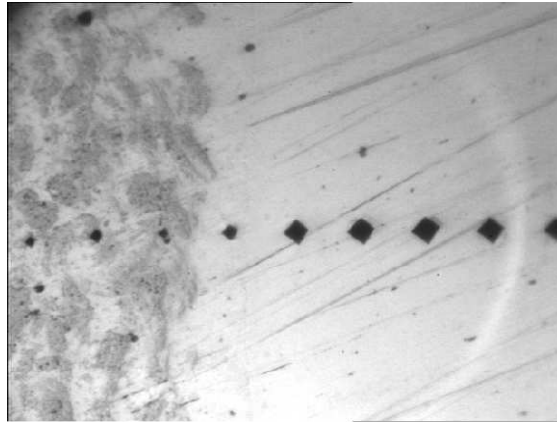
10009+0%WC17C₀

10009+15%WC17C₀



10009+30%WC17C₀

10009+45%WC17C₀



10009+60%WC17C₀

Figure IV.8: Micrographies illustrant les différentes indentations opérées sur les différents échantillons (200X).

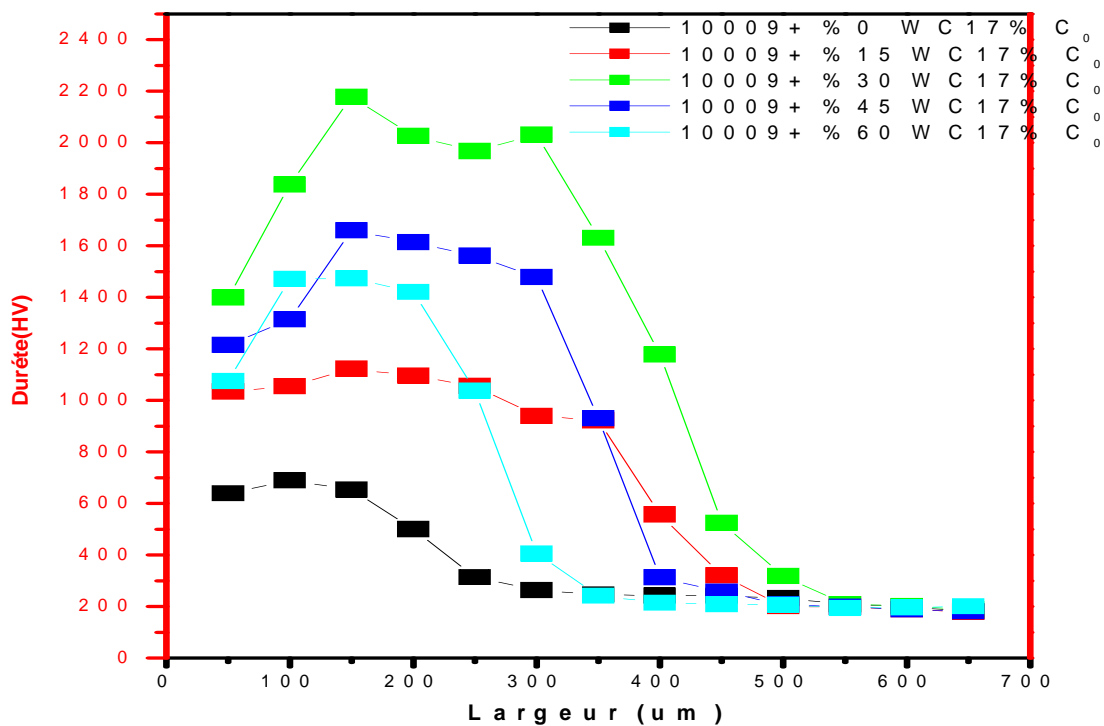


Figure IV.9 : La Micro dureté Vickers de différent revêtement.

La figure IV.9 donne la variation de micro dureté Vickers dans les dépôts et le substrat avec différents revêtements composites, on constate que :

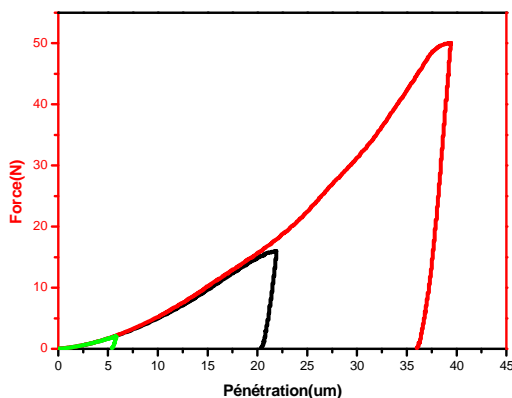
- ❖ La micro dureté au bord du revêtement est faible, elle augmente quand on pénètre dans le revêtement puis elle chute quand on accède au substrat, et ce pour tous les échantillons avec les différents revêtements. Ceci s'explique par la

quasi absence de grains de carbure de tungstène aux bords des revêtements comme on peut l'apercevoir dans les micrographies des figures IV.2 et IV.6. Puis, l'augmentation de la micro dureté au sein du revêtement s'explique par la présence plus ou moins importante de ces grains selon les revêtements, toujours selon les micrographies des figures IV.3 et IV.7.

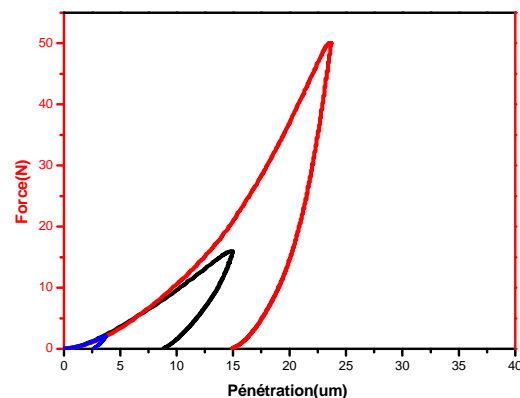
- ❖ Une augmentation de la micro dureté avec l'augmentation du taux de carbure de tungstène jusqu'à 30% puis une baisse pour les taux de 45% et 60%.

IV.6 Essais d'indentation instrumentée

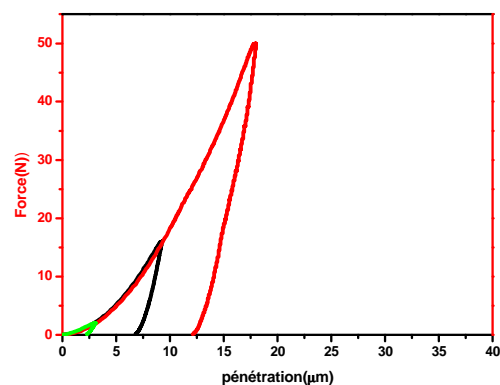
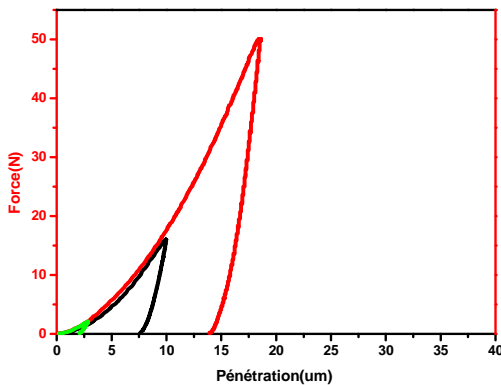
Les essais d'indentation ont été réalisés sur la surface de l'acier ordinaire et des revêtements composites 10009 avec différents pourcentages de WC17C₀, la gamme de charge d'indentation est de 2 à 50 N. Nous avons effectué un profil de trois mesures allant du cœur du substrat et les revêtements composites .



Substrat (acier ordinaire)



10009+0% WC17C₀



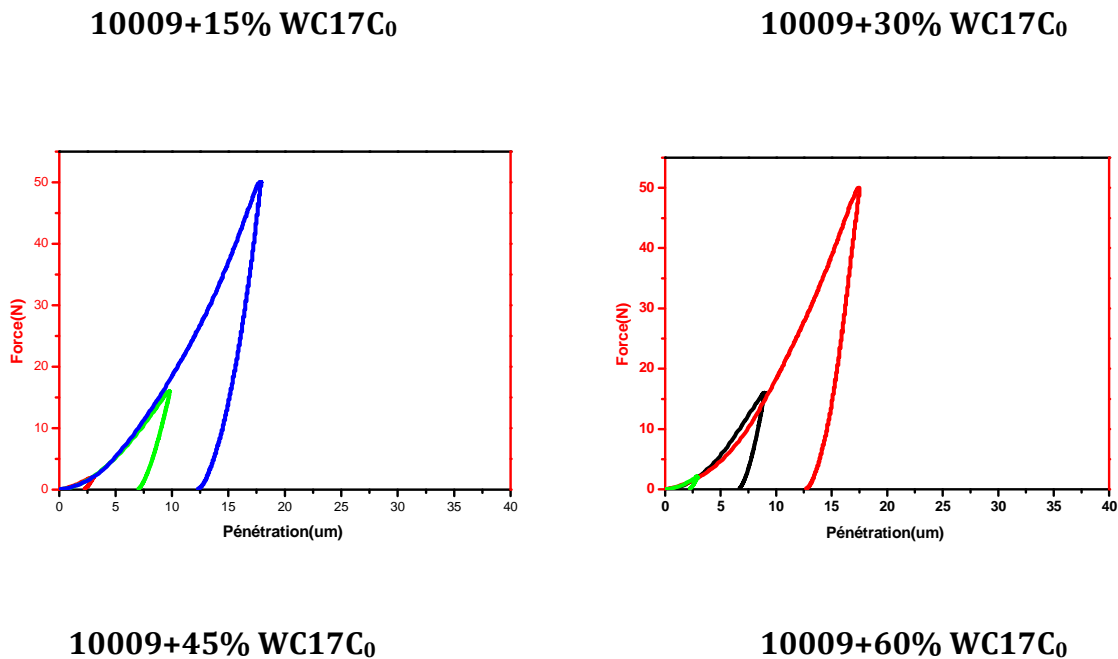


Figure IV.10 : Différentes courbes charge-décharge en indentation Vickers.

La [figure IV.10](#) montre les différentes courbes charge-décharge obtenues par essais d'indentation sur le substrat en acier et les différents échantillons revêtus. Elles expriment la variation de la charge en fonction de la profondeur de pénétration pendant le cycle charge-décharge qui montre une pénétration progressive de l'indenteur pendant le chargement suivie d'un retrait rapide pendant le déchargement. Un tel comportement prouve une plasticité importante du substrat. Cela est en parfaite cohérence avec le comportement d'un acier doux. Au contraire, le cycle charge-décharge sur le revêtement composite 10009+0% WC17C₀ montre le signe d'un comportement élasto-plastique. Avec l'augmentation des pourcentages WC17C₀ (30%- 45%-60%), il y a une certaine fragilité.

IV.6.1 La Variation de dureté(HV) avec la force pénétration

La figure IV.11 présente un bilan des résultats obtenus en termes de micro dureté Vickers du substrat utilisé et des revêtements composites.

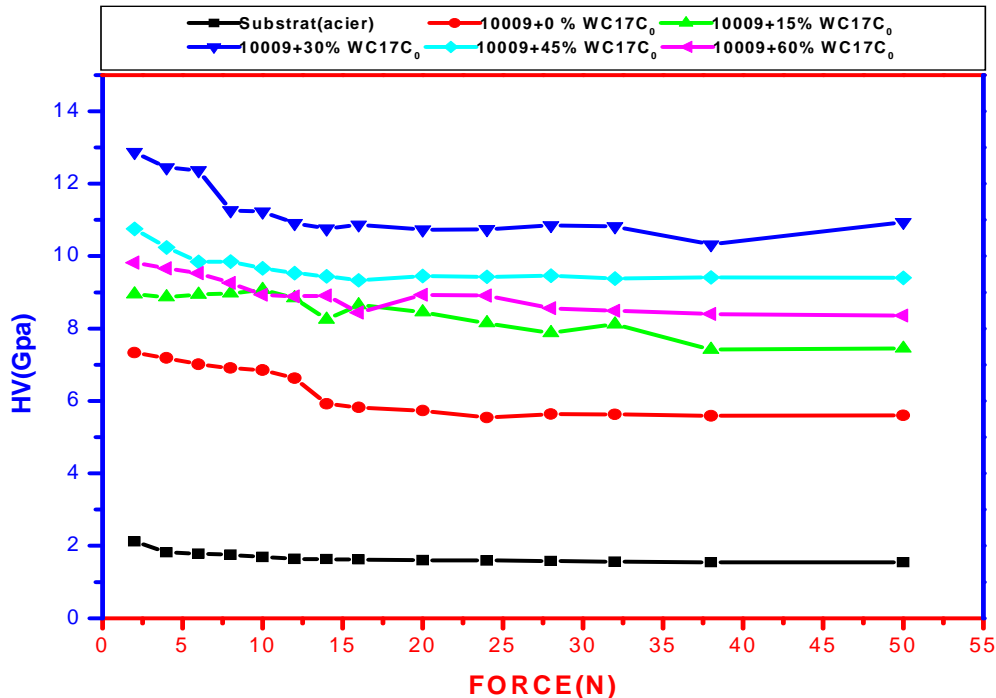


Figure IV.11 : La Variation de dureté avec la force d'indentation.

On remarque que le substrat présente une dureté variant entre 2,10 et 1,70 GPa. La valeur moyenne caractéristique de cet acier ordinaire est de l'ordre de 1,90GPa. Pour le revêtement composite 10009, on remarque une dureté superficielle plus grande que celle du substrat, elle est de 7,19 GPa avec une certaine dimension jusqu'à 15N de charge et qui se stabilise à 5,5 GPa. Les résultats des revêtements composites 10009 avec différents taux de WC17C₀ donnent la même allure, la variation de dureté se présente comme suit :

- ❖ Le revêtement composite 10009+15% WC17C₀ présente une dureté de 8,98 GPa avec une charge de 2N pour une charge maximale la dureté se stabilise à 8,20 GPa.
- ❖ Le revêtement composite 10009+30WC17C₀ donne une amélioration majeure de dureté superficielle à 12,87Gpa et qui se stabilise entre 11 et 12 GPa .
- ❖ L'augmentation du taux de WC17C₀ entre 45% et 60% dans le revêtement, entraine une diminution de la dureté superficielle à 10,75 GPa et 9,82GPa respectivement.

IV.6.2 La variation du module (E) avec la force pénétration

La Figure IV.12 présente les évolutions du module élastique E (en GPa) à la pénétration de l'indenteur (mm) dans le substrat utilisé et les différents revêtements composites.

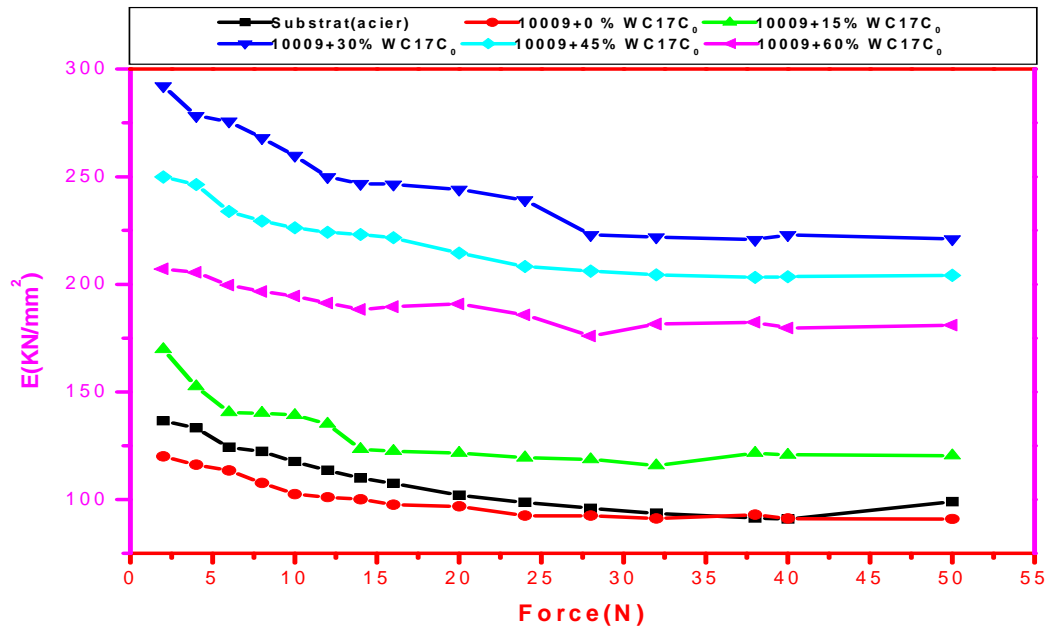


Figure IV.12 : La variation du module élastique avec la pénétration de l'indenteur.

On montre également, comme attendu, dans cette variation, qu'un module élastique important se traduit par une profondeur d'enfoncement faible et réciproque dans la première zone entre 2N et 15 N. Pour la deuxième zone d'indentation, le module est stable.

Le module à la pénétration du substrat se stabilise entre 100 et 110 GPa, par contre dans le revêtement 10009 le module élastique diminue à 100 et 90GPa. Les fortes variations obtenues dans le revêtement avec le composite 10009+WC17C₀ pour 15% le module élastique varie entre 175 et 140 GPa, pour le revêtement à 30% de WC17C₀ dans le composite donne une valeur majeure du module élastique à la pénétration de 290GPa qui se stabilise à 240 GPa.

Avec l'augmentation du Taux de composite WC17C₀ 45% et 60 %, le module élastique diminue à 220 GPa et 200 GPa respectivement.

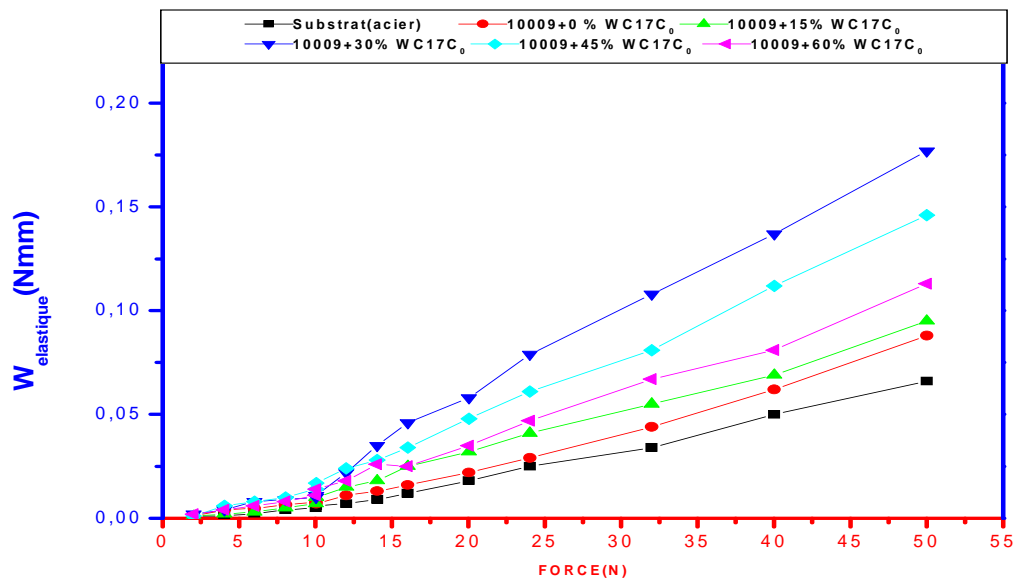
IV.6.3 La variation de l'énergie élastique (W_{elas}) avec la Force pénétration

Figure IV.13 : Evolution de l'énergie élastique avec le décharge d'indentation.

La figure III.13 présente les énergies élastique du substrat et des revêtements composites, calculées à partir des courbes d'indentation. Nous remarquons que les énergies élastiques (W_e) augmentent avec la charge maximale d'indentation, et que l'énergie élastique des revêtements généralement supérieure à celle du substrat.

On remarque que l'énergie élastique de revêtement 10009+30% et certaine augmentation à 0,175 Nmm qui va diminuer avec augmentions le taux de composite.

Conclusion

Cette étude visait à développer par projection flamme des revêtements composites à matrice métallique résistants à l'usure et à étudier le Comportement tribologique et les propriétés mécaniques de différents revêtements et du substrat.

La première partie de ce travail a été consacrée à l'élaboration par projection flamme des Revêtements composites 10009(Cr-Ni-B-Si-Fe)+WC17C₀ avec différentes concentrations de WC17Co (0 %, 15 %, 30 %, 45 %, 60%) sur un substrat en acier ordinaire. D'après leurs micrographies, on peut constater ce qui suit :

- Un bon accrochage mécanique des revêtements sur le substrat.
- Une distribution homogène des particules de carbure dans la couche.
- Epaisseur de différents revêtements entre 300 et 400 µm.
- La rugosité augmente avec l'augmentation de concentration WC17Co.

L'étude tribologique montre que la meilleure résistance à l'usure est démontrée par les revêtements composites qui contiennent 30% et 15% de WC17Co et une augmentation du coefficient de frottement avec le pourcentage de WC17Co.

Les résultats de micro dureté montrent une augmentation de la micro dureté avec l'augmentation du taux de carbure de tungstène jusqu'à 30%(2179 HV) puis une baisse pour les taux de 45% et 60%. La micro dureté au bord du revêtement est entre 1000 et 1400 HV, elle augmente quand on pénètre dans le revêtement puis décroît quand on accède au substrat à 200 HV, et ce pour tous les échantillons avec les différents revêtements.

L'étude de l'indentation instrumentée présente un comportement qui montre une plasticité importante du substrat. Cela est en parfaite cohérence avec le comportement d'un acier doux. Au contraire, les revêtements composites 10009+(0% et 15%) WC17C₀ montrent le signe d'un comportement élasto-plastique. Avec l'augmentation des pourcentages WC17C₀ (30%- 45%-60%), il y a une certaine fragilité.

Le revêtement 10009+30% WC17C₀ a donné de bonnes propriétés mécaniques, une dureté de 20.12GPa et un module de Young 292.56 GPa avec une énergie élastique de 1.87 N.mm.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] **Salah MEZLINI** , étude de l'usure par abrasion d'alliages d'aluminium ,thèse de doctorat , école centrale de Lyon 2003,p 1.
- [2] **P. KAPSA, M. CARTIER**, Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure, Techniques de l'Ingénieur BM5067, p. 1-13, 2001
- [3] **O. BARRAU**, Etude tribologique de revêtement en régulation de turbines, R, ENIT, 1999.
- [4] **H. JÖRG MATHIEU, E. BERGMANN, R. GRAS**, *Traité des matériaux : Analyse et technologie des surfaces, Couche minces et tribologie*, Presses polytechnique et universitaires Romandes. 2003, 495 pages.
- [5] **OUTILS DE COUPE**- Hanovre www.secotools.com – consulté le 19-02-2016.
- [6] **OUTILS DE COUPE**- Hanovre www.trametal.com - consulté le 19-02-2016.
- [7] **HAMADI BILLEL**, étude des revêtements durs et applications sur outil de coupe , mémoire de magister , université mentouri Constantine ,juin 2010,p 3.
- [8] **MICHEL DEBOIS** ,Les revêtements DLC les Applications dans l'industrie Automobile
- [9] **P. FAUCHAIS, M. VARDELLE, A. VARDELLE, L. BIANCHI**, Plasma spray: Study of the coating generation, Ceram. Int., 22(4) (1996), pp. 295-303.
- [10] **NECKARPRIN ZEN GMBH**, Segme piston pour les moteurs à combustion interne, isbn 2010,p5.
- [11] **PAULIN C.** Etude de l'endommagement du contact multicouche aube/disque sous chargement de fretting : impact des sollicitations variables et de la dimension du contact. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006.
- [12] **ADVANCED COATING** –<http://www.advanced-coating.com/projection.htm> consulter le 10/02/2016
- [13] **SURFACTEC**- <http://www.surfatec.org/> consulté le 12-01-2016
- [14] **E.R SAMPSON**. Cored wires application using electric arc spray . p 133-137.OF Thermal spray meeting the challenges of the 21.st.century, pub. ASM .International, Materials park, OH-USA, 1998.
- [15] **BERNHARD ILSCHNER**, Dépôt physique ,technique, microstructures et propriétés ,presses polytechniques et universitaires romandes2003 ,p 54.

[17] **A. HARIR**, *Contribution à la faisabilité de dépôts composites, métal-lubrifiant solide élaborés par plasma d'arc : comportement tribologique*. Thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2002, 170 pages.

[16] **A. PRONER**, revêtements par projection thermique (éd) Techniques de l'ingénieur, M1645.P.1-20, 1999.

[25] **PRONER A.**, Techniques de l'ingénieur ; FAUCHAIS P., 2001.

[18] **H. HERMAN**, Les revêtements par projection plasma, Pour la Science 133, 1988, p. 48-55.

[19] **P. FAUCHAIS**, Understanding plasma spraying, Journal of Physics Applied Physics 37, 2004, p. R86-R108
and grain size. Materials chemistry and physics vol 54, p 116-122-(1998)

[20] **Musil (J)**, Hard and Superhard nanocomposite coatings surface and coatings surface and coatings technolog.vol 125,p322-330, (2000).

[21] **boch p**, propriétés et application des céramique, édition hermès science publication, paris,2001.

[22] **H. HOLLECK ET V. SCHIER**, Multilayer PVD coatings for wear protection, Surface and Coatings Technology 76-77 (1-3), 328-336, 1995.

[23] **S. MIKLASZEWSKI, P. BEER, M. ZBIEC, B. G. WENDLER, S. MITURA, A. MICHALSKI**, Resistance to wear of the surface-modified milling tools during the milling process of wood-based materials, Proceedings of the 14th International Seminar on Wood Machining, Epinal, Nancy, Cluny, FRANCE, 463-468, 1999

[24] **H. A. STEWART**, A comparison of tool materials, coatings, and treatments related to tool wear during wood machining, Forest Products Journal 41 (9), 61-64, 1991.

[25] **D. PINHEIRO, M. T. VIEIRA, M. A. DJOUADI**, Advantages of depositing multilayer coatings for cutting wood-based products, Surface and Coatings Technology 203 (20-21), 3197-3205, 2009.

[26] **K. JIA, T. E. FISCHER, B. GALLOIS**, Microstructure, hardness and toughness of and nanostructure end conventional WC-Co composites, Nanostructure. Mater, 10(5) (1998), pp. 875-891

[27] **GUY MURRY**, Aide-mémoire Métallurgie édition Métaux, livre, Paris,2010 p 53-54

[28] **OLEK MACIEJAK PASCAL AUBERT**, Techniques de l'Ingénieur, Mesure de dureté par nanoindentation, 2007.

- [29] MICHEL DUPEUX, aide-mémoire science des matériaux ,écoles d'ingénieurs, pari2005, p109.
- [30] J.H. AHN, D .KWON, Micromechanical estimation of composite hardness using nanoindentation technique for thin –film coatem. Material Science and Engineering A285 , 2000, P172.
- [31] J. FRENE, La tribologie de l'antiquité à nos jours, Mécanique et Industrie, Vol. 2, 2001,p.263-282.
- [32] GEORGES J.M, frottement, usure et lubrification : la tribologie ou science des surfaces, édition eyrolles , paris, 2000
- [33] ZERROUDI N . Automatisation des calculs des engrenages cylindriques à denture droite, E.N.P ,2000,PP2-6.
- [34] P. KAPSA, M. CARTIER, *Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure*, Techniques de l'Ingénieur BM5067, 2001, p. 1-13
- [35]ASM INTERNATIONAL, Metals Handbook: Friction, Lubrication and Wear technology Volume18, 1992.
- [36] M'ELISSA DELQUE, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007,p55
- [37] HADDOUR Lillia , amélioration des performances tribologiques des céramiques techniques. thèse de doctorats ,2010,p35.
- [38] Lakhdari Fouad. étude de l'endommagement des surfaces optiques par des particules abrasives , mémoire de magister , université Ferhat Abbas Sétif,2010,P13.