



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Ingénierie des Matériaux et des Surfaces(IMS)

Thème :

**Etude du comportement au frottement et des propriétés
mécaniques des revêtements composites NiCr-WC(Co)
réalisés par projection thermique à la flamme**

Promoteur :

Mr. A. Abderrahmane

Co Promoteur

Mr. Benkhelif Ahmed

Réalisé par :

Chanane Mohamed Amine

Haif Mohamed Abdechafie

Etude du comportement au frottement et des propriétés mécaniques des revêtements composites NiCr-WC(Co) réalisés par projection thermique à la flamme

Résumé

La projection thermique occupe un rôle important dans les industries de la mécanique comme la plupart des procédés de traitement de surface. C'est un moyen d'améliorer les propriétés de surface des matériaux pour résister aux frottements, à l'usure et à la corrosion. Dans ce cadre, nous avons réalisé des revêtements composites NiCr-WC(Co) à différentes % de WC(Co) par projection thermique à la flamme avec refusion. Le comportement tribologique et les propriétés mécaniques du substrat et des différents revêtements ont été étudiés. D'après l'analyse micrographique les revêtements présentent une bonne liaison avec le substrat. Aussi, une distribution homogène des carbures est remarquée dans l'ensemble des systèmes de revêtements. Les résultats des tests de dureté et de microdureté montrent que la dureté augmente avec le taux de WC jusqu'à 30%. Au-delà, il y a une baisse significative de cette dernière. Par ailleurs, l'étude tribologique a établi que la rugosité de surface et le coefficient de frottement augmente avec le pourcentage de WC17Co.

Mot clé : Revêtement, projection flamme, microstructure, dureté, indentation instrumentée, coefficient du frottement.

Remerciements Remerciements

Nous remercions tout d'abord Allah le tout puissant de nous avoir donné la foi, la volonté et le courage afin de réaliser notre projet de fin d'étude ...

*Nous remercions notre Promoteur **Mr. A.ABDERRAHMANE** d'avoir bien voulu nous proposer le sujet et ensuite encadrer notre travail en nous apportant l'orientation et l'aide nécessaire...*

*Nous remercions également notre Co-Promoteur **Mr. BENKHLIF AHMAD** de nous avoir accueillis à SETIF et nous fournir les aides nécessaires pour accomplir notre travail*

Nous n'oublions pas de remercier les enseignants de notre Département de Génie mécanique, en particulier ceux de la spécialité science des matériaux, pour nous avoir offert un agréable cadre de formation...

*Nous tenons à remercier **Mr.ch abdelwahab, Mr. Houcine, EL HADJE BRAHIM, Mr. LIYASS, CAPITAINE LAKHDAR** de l'atelier TTS de la base logistique militaire de l'URMA de Darelbaida*

*Sans oublier tous ceux qui ont participé avec nous dans ce travail **Mme. ROUIBI, Mr. AHMAD EL RALI** et **Mr. Muktari adel** que nous espérons trouvent ici l'expression de nos remerciements...*

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail trouve ici l'expression de nos vifs remerciements et notre profonde gratitude.

Dédicaces

A ma mère et mon père

Que je les souhaite une longue vie pleine de santé

A ma sœur

*A tous les enseignants du département
mécanique*

A tous mes amis sans exception

Et à tous ceux qui pensent à moi ...

Chanane

SOMMAIRE

Listes des abréviations

Listes des figure

Listes des tableaux

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1. APPROCHE SCIENTIFIQUE DES SURFACES ET DE LEURS TRAITEMENTS.....	3
1.1. Introduction	3
1.2. Objectifs des traitements de surfaces et domaines d'applications	3
1.2.1. Classification des traitements de surfaces	4
1.2.1.1. Les revêtements durs	4
1.2.1.1.1. Revêtements durs	4
1.2.1.1.2. Revêtements extra durs	4
1.2.1.1.3. Les revêtements durs en monocouche.....	5
1.2.1.1.4. Les revêtements durs en multicouches	5
1.2.1.1.5. Les revêtements composites	6
2. LA PROJECTION THERMIQUE.....	9
2.1. Principe général	9
2.2. Préparation de surface	9
2.3. Matériaux utilisés pour la projection	9
2.4. Procédés de projection thermique	11
3. LES THECHNIQUES DE CHARACTERISATION.....	11

3.1. L'essai de dureté	11
3.1.1. Principe de l'essai	12
3.1.2. Sélection de la meilleure méthode d'essai	12
3.1.3. Les quatre méthodes d'essai de dureté les plus fréquentes	12
3.1.3.1. L'essai de dureté Rockwell	12
3.1.3.2. Essai de dureté Vickers	13
3.1.3.3. L'essai de dureté Knoop	13
3.1.3.4. L'essai de dureté Brinell.....	14
3.2. Essai de l'usure.....	14
3.2.1. Les différents mécanismes d'usure.....	15
3.2.2. Usure adhésive	15
3.2.3. Usure abrasive	17
3.2.4. Mesure de l'usure	18
4. L'essai d'indentation instrumentée	19
4.1. Evaluation des propriétés du matériau	22
CHAPITRE II : MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	27
1. Introduction	27
2. Substrat	27
3. Poudres composites	29
4. Préparation de surface	29
5. Procédé d'élaboration des revêtements	30
5.1. Réalisation des revêtements.....	30
5.2. Paramètres de projection des poudres	31

6. Techniques de caractérisation	31
6.1. Microscopie optique	31
6.2. Profilomètre mécanique	32
6.3. Etude d'indentation	33
6.3.1. L'instrument d'indentation	33
6.3.2. Essai d'indentation	33
6.4. Etude de micro dureté	34
6.4.1. Machine d'essais Micro Dureté	34
6.4.2. Essai de micro dureté	35
6.5. Etude tribologique	35
6.5.1. L'instrument tribomètre pion / plan	35
6.5.2. Essai de frottement	36
6.6. Etude de dureté.....	36
6.6.1. Machine d'essais de dureté	36
6.6.2. Essai de dureté	37
CHAPITRE III : RESULTAT ET DISCUSSION.....	38
3.1. Introduction	38
3.2. Rugosité et épaisseur des revêtements	38
3.3. Etude métallographique des revêtements	39
3.4. Caractérisation mécanique	42
3.4.1. Dureté superficielle.....	42
3.4.2. Microdureté Vickers.....	43
3.4.3. Indentation instrumentée.....	44

7. Essai de frottement	46
Conclusion.....	49
Références Bibliographiques.....	51
Résumé	

-**WC17Co** : alliage carbure de tungstène.

-**NiCr** : **Alliage** nickel-Crome.

-**RTS** : revêtements et traitements de surface.

- **SATS** : Syndicat des Appicateurs en Traitements de Surface.

- **GPa** : 10^9 Pascals.

- **SiO2**: dioxyde de silicium.

-**TiO2**: dioxyde de titane.

-**TiN**: nitrure de titane.

- **CrN**: nitrure de crome.

- **Si3N4** : nitrure de silicium.

- **WC**: tungstène.

- **TiC** : Le carbure de titane.

-**TiN** : Le nitrure de titane.

- **B-C3N4** : Le nitrure de carbone graphitique.

-**CVD** : Chemical vapor deposition.

-**Al2O3** : L'alumine.

Cr2O3 : L'oxyde de chrome.

ZrO2 : Le dioxyde de zirconium.

MEB : La microscopie électronique à balayage.

CrN/TiAlN: nitrure de chrome/ Nitrure de titane aluminium.

TiC/WC: carbure de titane/ tungstène.

FeCr: Le Ferrochrome.

SiC: Silicon carbide.

Ta: Le tantale.

HVOF: High velocity oxygen fuel spraying

HRC : Rockwell hardness.

HV : Vickers hardness.

HK: knoop hardness.

HBW : Brinell Hardness.

τ_α : contrainte de cisaillement.

ρ_m : pression moyenne.

fa: coefficient de frottement.

Ψ : index de plasticité.

K : le coefficient d'usure.

IIT : Le test d'indentation instrumenté.

E : le module de Young.

H : dureté.

Ra : la rugosité moyenne arithmétique.

Rz : la hauteur maxi du profil.

Rq : la rugosité moyenne quadratique.

WC : alliage carbure de tungstène.

COF : coefficient de frottement.

Wc-Co: carbure de tungsten cobalt.

LISTE DES FIGURES

Figure I- 01 : Domaine d'application par pourcentage.....	1
Figure I-02 : Dépôts Al_2O_3 obtenus par projection plasma.	2
Figure I-03 : Images de section transversale obtenues par MEB des multicouches de CrN/TiAlN.....	3
Figure I-04 : Images de section transversale.....	4
Figure I-05 . Diffèrent traitements de surfaces.....	5
Figure I-06 . Schéma du principe de la projection thermique	6
Figure I-07 : Fil fourré contenant une gaine extérieure en métal et une cour en carbure de tungstène.....	7
Figure I-08 : L'essai de dureté Rockwell.....	8
Figure I-09 : Essai de dureté Vickers.....	9
Figure I-10 : L'essai de dureté Knoop.....	10
Figure I-11 : L'essai de dureté Brinell.....	11
Figure I-12 : Importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie.....	12
Figure I-13 : Exemples de surfaces usées par différents mécanismes.....	13
Figure I-14 : Mécanisme de l'usure adhésive.....	14
Figure I-15 : Exemple de grippage, manifestation sévère de l'usure adhésive.....	15
Figure I-16 : Mécanisme de l'usure abrasive.....	16
Figure I-17 : Déformations plastiques d'une surface d'aluminium après le passage d'un poinçon en V. Mesures par PIV.....	17

Figure I-18. Exemples de piste d'usure a) Piste en acier après frottement avec un pion en acier b) Piste d'une garniture mécanique après frottement.....	18
Figure I-19. Mesure du volume d'usure.....	19
Figure I-20. Schéma d'un test d'indentation.....	20
Figure I-21. Historique force-temps typique pour un essai d'indentation instrumenté ; l'origine de ce tracé est le point où le pénétrateur touche d'abord la surface d'essai.....	21
Figure I-22 : Courbe force-déplacement type pour un test d'indentation instrumenté ; ce tracé est la sortie de "Analyse Étape 1" et l'entrée à "Analyse Étape 2" Les nombres sur le tracé correspondent aux segments de test identifiés sur la Figure 21 ; les données des segments 2 et 4 sont tracés, mais ne sont pas visibles en fonction de déplacement.....	22
Figure I- 23. Impression résiduelle en nickel, réalisée par un Pénétrateur diamant Berkovich.....	23
Figure II.1. Échantillon de forme parallélépipédique 40 x 40x 10 mm.....	24
Figure II.2. Machine de sciage.....	25
Figure II.3. La microstructure de l'acier XC48.....	26
Figure II.4. Poudre composite Cr-Ni-B-Si-Fe.....	27
Figure II.5. Appareil de sablage.....	28
Figure II.6. Kit Eutalloy.....	29
Figure II.7. Microscope optique.....	30
Figure II.8. Profilomètre électronique.....	31
Figure II.9. Instrument de micro indentation Vickers.....	32
Figure II.10. Machine d'essais Micro Dureté.....	33
Figure II.11. Tribomètre NANOVEA T50 pion /plat.....	34
Figure II.12. Machine d'essais de dureté.....	35

Figure.III.1 Evolutions de la rugosité de surface des revêtements en fonction du pourcentage de WC(Co).....	36
Figure.III.2 : La micrographie de différents revêtements.....	37
Figure.III.3. La dureté Rockwell de différent revêtement.....	38
Figure.III.4. Micrographies illustrant les différentes indentations opérées sur les Différents échantillons (10X).....	39
Figure.III.5. Différentes courbes charge-décharge en indentation Vickers.....	40
Figure.III.6. Courbes du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles.....	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I- 01 : Différentes familles de traitement de surface.....	1
Tableau I-02 : Valeurs indicatives de coefficients de coefficient d'usure K de matériaux usuels en frottement à sec.....	2
Tableau I-03 : Résumé des termes courants	3
Tableau I-04 : fonction de zone pour divers pénétrateur géométrie	4
Tableau II.1. Composition chimique du substrat : acier XC48	5
Tableau II.2. Les paramètres de la projection fusion – refusion.....	6
Tableau II.3. Paramètre des essais d'indentation.....	7
Tableau II.4. Paramètre des essais de micro dureté.....	8
Tableau II.5. Paramètres des essais de frottement.....	9
Tableau.III.1. Résultats des tests de rugosité et de mesure d'épaisseur.....	10

Introduction générale

Depuis plus de 20 ans, la demande industrielle pour le perfectionnement de la résistance aux frottements et à l'usure des pièces, tant mécaniques que de structure, voit une croissance constante.

Cela se justifie par la volonté de diminuer les pertes considérables liées aux phénomènes de frottement/usure. Il est globalement admis qu'elles représentent de 6 à 10 % du Produit National Brut des pays industrialisés. Pour remédier à ce problème, la stratégie industrielle est souvent de recourir aux revêtements pour améliorer les performances et allonger la durée de vie des systèmes mécaniques. Ces revêtements sont avantageux d'un point de vue technique et/ou économique contrairement à un changement du matériau constituant la pièce à améliorer.

Ces dernières années, les études menées dans le domaine de la tribologie ont démontrés l'intérêt des revêtements composites notamment ceux projetés thermiquement. En particulier, 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 composites durs sur la surface d'un acier XC48 pour accroître sa dureté et sa résistance à l'usure notamment à haute température dans des milieux corrosives. Pour parvenir à un tel résultat, le choix des poudres convenables pour la synthèse du revêtement composite dur est très important. Un des matériaux les plus utilisés est l'alliage auto fondant de type NiCr. Cet alliage est conçu pour offrir des performances optimales après avoir subi un processus de fusion à haute température. Les dépôts à base de cet alliage présentent une bonne combinaison de résistance à l'usure et à la corrosion, seulement sa résistance se dégrade à haute température. Pour surmonter cette limite, un deuxième matériau utilisé dans la synthèse du dépôt composite, le carbure de tungstène – 17% cobalt (WC17Co). Le WC17Co est idéal pour sa dureté élevée notamment à haute température. En ajoutant une partie de la poudre de WC17Co à la poudre de NiCr, on peut changer les propriétés physiques et mécaniques du mélange. Ainsi, le composite présente une bonne résistance à l'usure et à la corrosion à la température ambiante et à haute température.

La technique utilisée dans cette étude est la projection thermique à la flamme oxyacétylénique.

Le but de notre étude consiste à évaluer l'influence de la concentration de WC17Co dans la poudre NiCr-WC17Co sur les propriétés mécaniques et tribologiques après qu'il soit projeté et refusionnés à la flamme. Les concentrations de WC17Co utilisées dans cette étude varient de 0 % à 60% dans le mélange.

Pour mener à bien notre travail, nous avons suivi le plan de travail suivant :

On a débuté par une introduction générale, le mémoire est ensuite organisé selon trois chapitres.

Le chapitre I comporte une étude bibliographique sur les traitements de surfaces, les différents procédés de projection thermique et les techniques de caractérisation.

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

L'ensemble des résultats obtenus sont exposés et discutés dans le chapitre III.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

.

CHAPITRE I SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Approche scientifique des surfaces et de leurs traitements

1.1. Introduction :

La notion de traitement de surface recouvre dans la pratique industrielle, un grand nombre de procédés ou gammes de traitement dont l'objectif est de conférer à la surface traitée soit des propriétés physico-chimiques particulières (composition, propreté, aspect, mouillabilité, adhérence...etc.), soit des propriétés mécaniques ou géométriques spécifiques (rugosité, contraintes superficielles, caractéristiques tribologiques...etc.).

Le secteur des revêtements et traitements de surface (RTS) a subi une mutation technologique importante, provoquée par de nouvelles exigences techniques et/ou réglementaires ou par de récents développements industriels. L'importance de ce secteur résulte non seulement de ses vastes domaines d'applications, mais aussi de sa pluridisciplinarité ; celle-ci fait en effet appel à la plupart des domaines scientifiques et technologiques. En permettant de concevoir et de réaliser des objets nouveaux ou en améliorant la durabilité, la qualité et la fiabilité de produits existants, les revêtements et traitements de surface sont générateurs de progrès et, à ce titre, ils doivent être intégrés dans tout processus d'élaboration, dès les premiers stades de conception d'un projet [03].

1.2. Objectifs des traitements de surfaces et domaines d'applications :

Le choix du traitement de surface adéquat dépend de l'objectif rechercher :

- L'augmentation de la fiabilité et de la durabilité des pièces traitées.
- Besoins de matériaux nouveaux ou « améliorés » (aspect, caractéristiques physico-chimiques ou mécaniques, barrières thermiques...etc.).
- Apparition de nouveaux procédés liés au développement de la microélectronique.
- Apparition de nouveaux concepts (ingénierie de surface, hybridation de techniques).
- Application de textes réglementaires, de recommandations, de normes.

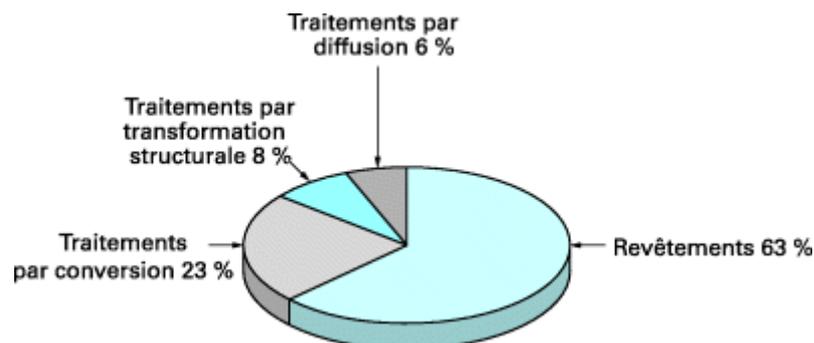


Fig.I.1. Domaine d'application par pourcentage.

1.2.1. Classification des traitements de surfaces :

Il existe différentes possibilités des traitements de surfaces. En se basant sur le mécanisme mis en jeu pour modifier la surface, on peut répartir les traitements de surfaces en quatre mécanismes ou ensembles [04] :

- Les revêtements : le matériau d'apport ne réagit pas ou peu avec le substrat.
- Les traitements par conversion chimique : le matériau d'apport réagit superficiellement avec le substrat.
- Les traitements thermo-chimiques avec diffusion : le matériau d'apport diffuse dans le substrat.
- Les traitements superficiels avec transformation structurale : la structure métallurgique du substrat est modifiée.

1.2.1.1. Les revêtements:

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 [05] ont classé les revêtements Selon leur dureté en deux catégories : durs et extra durs.

1.2.1.1.1. 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 SiO₂ (12GPa), Al₂O₃ (21GPa), TiO₂ (11GPa) ...etc. Les nitrures quant à eux s'accordent sur des valeurs de dureté de l'ordre de 25 GPa pour le TiN plus que le CrN qui est lui plus « tendre » avec une dureté variant entre 18~23 GPa, selon les conditions de dépôts, et enfin le Si₃N₄ avec une dureté de 15GPa. Les carbures des familles WC (32.5GPa), TiC(35GPa), B-C₃N₄(30GPa), et les nanocouches comme TiN/MON, Ti/NbN et TiN/TaN dont la dureté est aux alentours de 30 GPa [06].

1.2.1.1.2. Revêtements extra durs :

Les revêtements extra dur présentent 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, en vue 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 [07].

1.2.1.1.3. Les revêtements durs en monocouche :

Les revêtements de carbure de titane (TiC) ou de nitrure de titane (TiN) peuvent 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 gazes appropriées 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 des propriétés mécaniques généralement médiocres [08].

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 [09] :

- 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.

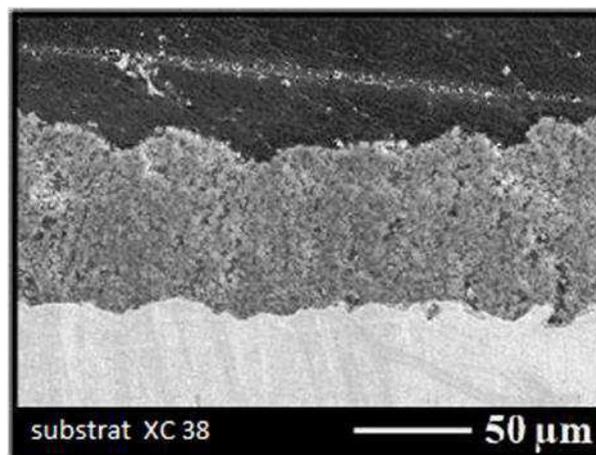


Fig.I.2. Dépôts Al₂O₃ obtenus par projection plasma.

1.2.1.1.4. 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 des propriétés mécaniques et tribologiques intéressante. De ce fait, les multicouches restent parmi les revêtements durs les plus utilisés.

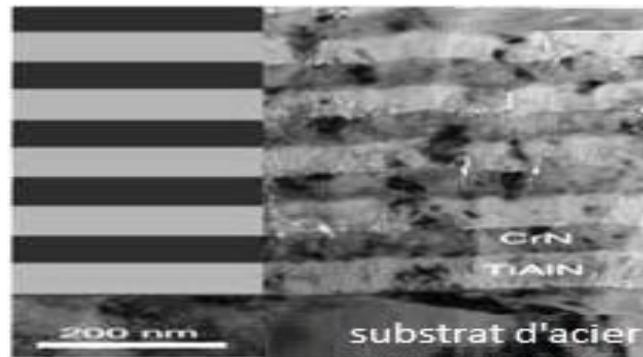


Fig.I.3. Images de section transversale obtenues par MEB des multicouches de CrN/TiAlN [10]

Miklaszewski *et al.* [11] 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 [12]. Dans une étude récente menée par **Pinheiro *et al.* [13]**, des monocouches 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.

1.2.1.1.5. 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 [14].

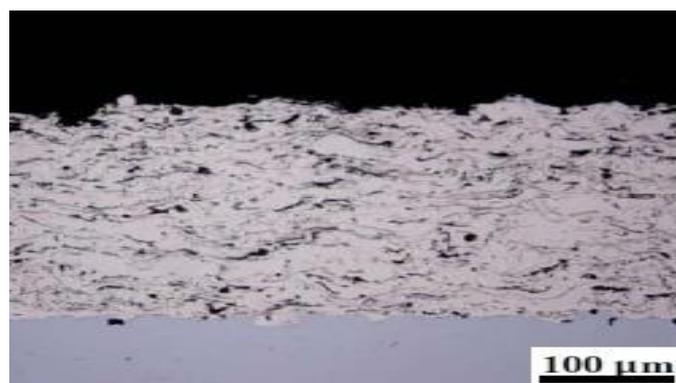


Fig.I.4. Images de section transversale [14]

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 W_2C , 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 [15].

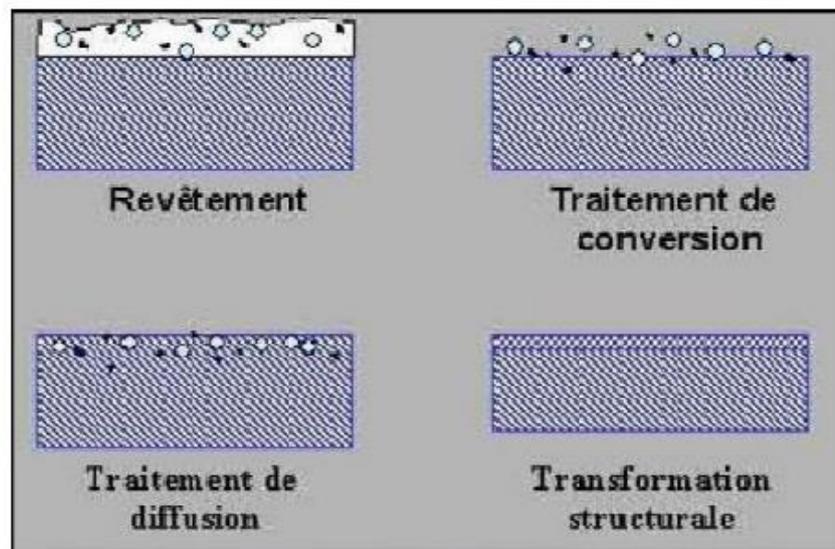


Fig.I.5. Différent traitements de surfaces.

Au sein de ces derniers ensembles, on trouve différentes familles de traitement de surface présentées dans le tableau ci-dessous [04] :

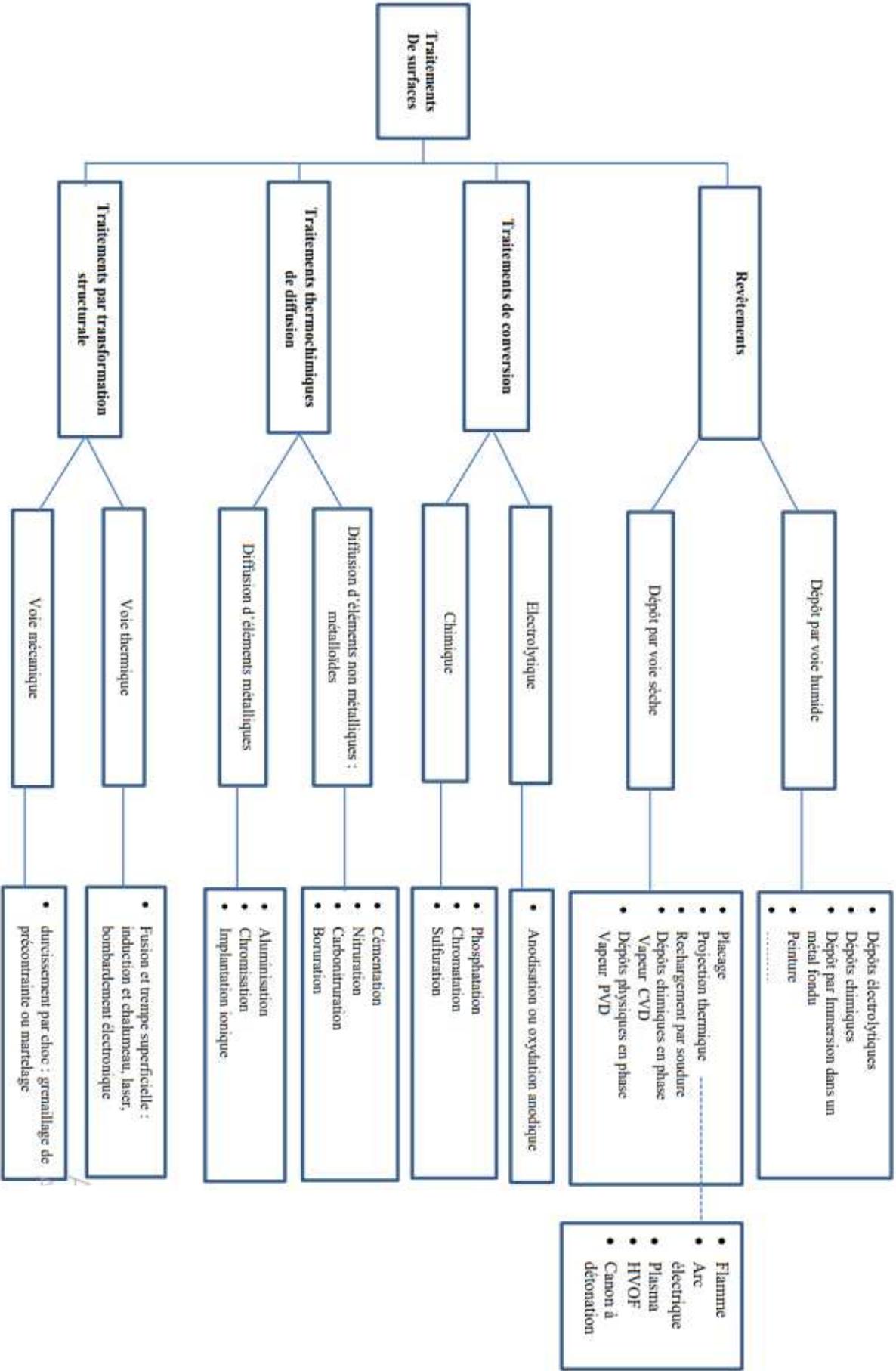


Tableau.I.1. Différentes familles de traitement de

2. La projection thermique

2.1. Principe général

La projection thermique regroupe l'ensemble des procédés par les quels un matériau d'apport est fondu ou porté à l'état plastique en utilisant une source de chaleur, puis il est projeté sur la surface à revêtir sur laquelle il se solidifie, de ce fait la surface de base ne subit aucune fusion et l'adhérence du dépôt est mécanique.

La figure 6 représente le principe général de la projection thermique : la matière à déposer (sous forme de poudre, de fil, de cordon ou de baguette) est fondue totalement ou partiellement par une source de chaleur (flamme, arc électrique, plasma). Puis un gaz vecteur permet la pulvérisation de la matière, et le transport des gouttelettes ainsi formées jusqu'à la surface à revêtir. [16]

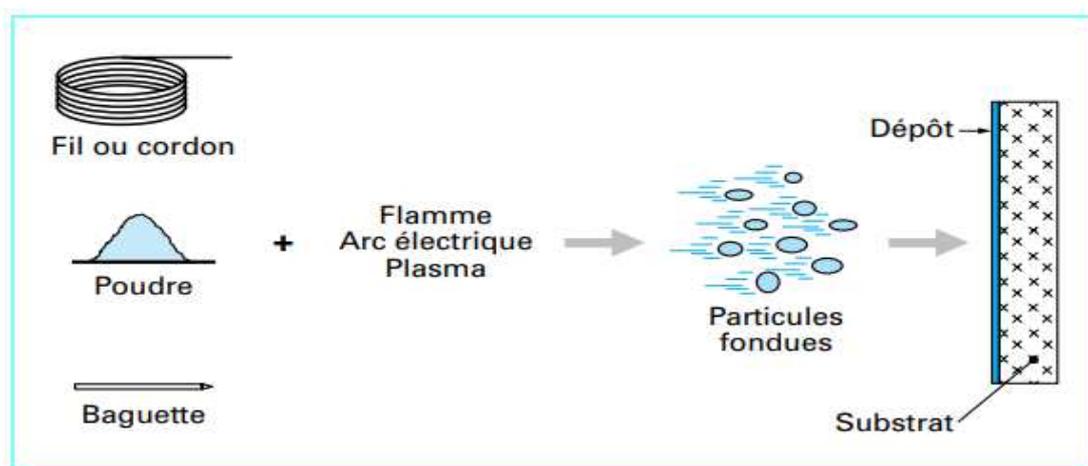


Fig.I.6. Schéma du principe de la projection thermique

2.2. Préparation de surface

Dans le terme préparation, il y a l'idée « d'opération préalable ». Bien que ces opérations soient utilisées le plus souvent, pour la mise en condition des surfaces de façon à les rendre aptes à recevoir une finition, une couche ou un dépôt. La notion de mise en condition de réception ne peut servir à la définition générale des préparations de surfaces, les buts des préparations étant plus diversifiés, parmi les principes opératoires de préparation de surface [16] :

- Dégraissage.
- Décapage (décalaminage, dérouillage, dérochage).
- Ébavurage, polissage, brillantage, satinage, dé métallisation.
- Dégazage.
- Lavage, rinçage, égouttage, séchage.

2.3. Matériaux utilisés pour la projection :

Les matériaux utilisés en projection thermique sont principalement des poudres, des baguettes et des fils. Les fils sont constitués de métaux ou d'alliages et sont principalement

utilisés pour les procédés de pulvérisation enflammée (fil-FS) et de pulvérisation à l'arc (AS). Les méthodes de fabrication des fils font partie de la technologie d'usinage et de formage des métaux et alliages qui sont décrites dans les manuels sur la technologie des métaux (Callister, 1994). Les fils peuvent être constitués de :

- Les métaux, tels que l'Al ou le Zn.
- Des alliages, tels que Ni+5 % en poids d'Al (par exemple, type de fil Sulzer Metco 8400) ou Ni+18 % en poids de Cr + 6 % en poids d'Al (par exemple, type de fil Sulzer Metco 8443).
- Composites qui sont des fils fourrés, illustrés dans (fig1.7), qui contiennent une gaine métallique (Co ou FeCr) et une charge constituée d'un matériau dur tel que WC (Drzeniek et Steffens, 1987) ou Cr₃C₂ (Sikorski et al. 1996) [17].

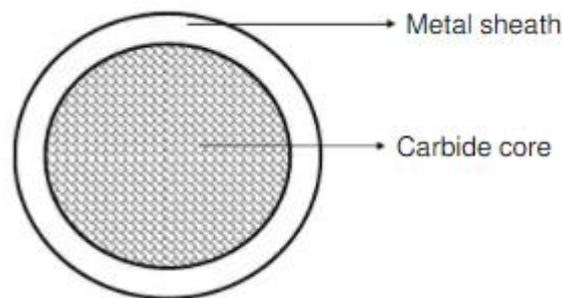


Fig.I.7. Fil fourré contenant une gaine extérieure en métal et une cour en carbure de tungstène

Les propriétés des poudres influencent considérablement la qualité des revêtements, il convient de les caractériser très soigneusement. Ces propriétés peuvent être divisées en propriétés physiques et chimiques.

Les caractéristiques physiques sont les suivantes :

- Granulométrie.
- Morphologie interne et externe.
- Densité apparente et fluidité.
- Propriétés thermiques, qui incluent l'utilisation de l'analyse thermique différentielle (DTA) ainsi que l'analyse thermogravimétrique (TGA).

La propriété chimique la plus importante est le type de la liaison chimique qui détermine de nombreuses propriétés primordiales des matériaux à partir desquels les films et les revêtements sont fabriqués (Holleck et Schier, 1995) : [17]

- Les liaisons ioniques se trouvent dans des matériaux chimiquement stables et inertes, tels que Al₂O₃ et ZrO₂.
- Les liaisons covalentes se trouvent dans les matériaux solides et résistants, tels que le diamant, le SiC et le Si₃N₄.

- Les liaisons métalliques se trouvent dans les matériaux résistants et bien adhérents, tels que de nombreux métaux (par exemple Ti et Ta) ainsi que certains carbures (par exemple WC et TiC) et nitrures (TaN et CrN).

Les propriétés chimiques suivantes déterminent la qualité des revêtements :

- Composition chimique.
- Contenu de la phase.
- Répartition des éléments.

Les matériaux pour la projection thermique comprennent également les rubans de masquage et les scellant de revêtement (résines époxy ou silicone) [17].

2.4. Procédés de projection thermique :

La projection thermique est un procédé dans lequel des particules fondues, semi-fondues ou solides sont déposées sur un substrat. Par conséquent, la technique de pulvérisation est un moyen pratique pour générer un « flux » de ces particules. Des revêtements peuvent être générés, si les particules peuvent se déformer plastiquement à l'impact avec le substrat, ce qui ne peut se produire que si elles sont fondues ou solides et suffisamment rapides. Leur échauffement et/ou accélération sont pratiques s'ils se produisent dans un courant de gaz [17], ainsi parmi les techniques et les procédés de projection :

- Projection à la flamme (FS).
- Pulvérisation Plasma Atmosphérique (APS).
- Projection à l'arc (AS).
- Pulvérisation au pistolet à détonation (D-GUN).
- Pulvérisation d'oxy-carburant à grande vitesse (HVOF).
- Pulvérisation plasma sous vide (VPS).
- Pulvérisation Plasma en Atmosphère Contrôlée (CAPS).
- Méthode de pulvérisation de gaz froid (CGSM)

3. Les techniques de caractérisation

3.1. L'essai de dureté :

L'essai de dureté permet de déterminer la résistance qu'un matériau offre contre la déformation permanente induite par pénétration d'un matériau plus dur. Cependant, la dureté n'est pas une propriété fondamentale d'un matériau. Lorsqu'on tire les conclusions d'un essai de dureté, il faut toujours faire une évaluation quantitative relative aux facteurs ci-dessous [18] :

- Charge exercée sur le pénétrateur.
- Profil de temps de charge spécifique et durée d'application de charge spécifique.
- Géométrie de pénétrateur spécifique.

L'essai de dureté est un élément majeur dans de nombreuses procédures de contrôle qualité et de travaux de recherche et développement, L'application d'un essai de dureté permet d'évaluer les propriétés d'un matériau telles que sa résistance, sa ductilité, sa résistance à l'usure et

contribue ainsi à déterminer si le matériau ou le traitement de ce matériau convient à l'usage souhaité.

3.1.1. Principe de l'essai :

L'essai de dureté type consiste à presser un objet spécifiquement dimensionné (pénétrateur) avec une charge donnée dans la surface du matériau à tester. La dureté est déterminée par la mesure de la profondeur de pénétration du pénétrateur ou en mesurant la taille de l'empreinte qu'il laisse. Les essais de dureté qui mesurent la profondeur de pénétration comprennent : essai Rockwell, essai de pénétration instrumentalisé par bille. Les essais de dureté qui mesurent la taille de l'empreinte laissée par le pénétrateur sont : Vickers, Knoop, et Brinell [18].

3.1.2. Sélection de la meilleure méthode d'essai :

Le type d'essai de dureté à utiliser doit être déterminé par la microstructure, à savoir l'homogénéité du matériau testé ainsi que le type de matériau, la taille de la pièce et de son état. Dans tous les essais de dureté, le matériau soumis à l'empreinte doit être représentatif de l'intégralité de la microstructure (sauf si l'objectif est d'étudier les différents composants de la microstructure). Par conséquent, si la microstructure est très grossière ou hétérogène, l'empreinte requise devra être plus grande contrairement à un matériau homogène. Il y a quatre principaux essais de dureté chacun ayant ses avantages et ses contraintes. Il existe différentes normes pour ces essais qui détaillent les procédures et les applications de l'essai de dureté. Lors du choix de la méthode d'essais de dureté, les considérations suivantes sont importantes [18] :

- Le type de matériau à tester en dureté.
- L'exigence de se conformer à une norme.
- La dureté approximative du matériau.
- L'homogénéité/hétérogénéité du matériau.
- La taille de la pièce.
- La nécessité de procéder à un enrobage.
- Le nombre d'échantillons à tester.
- La précision requise du résultat.

3.1.3. Les quatre méthodes d'essai de dureté les plus fréquentes :

3.1.3.1. L'essai de dureté Rockwell :

La méthode d'essai de dureté Rockwell est rapide développée pour le contrôle de production, elle permet [18] :

- La lecture directe des résultats.
- Principalement utilisé pour les matériaux métalliques
- Généralement utilisée pour les échantillons de grande taille
- La mise en œuvre des essais plus poussés, tels que l'essai Jominy (essai de trempabilité - HRC).

- La dureté Rockwell (HR) est calculée en mesurant, à une charge donnée, la profondeur de l'empreinte laissée par l'enfoncement d'un pénétrateur dans le matériau de l'échantillon.

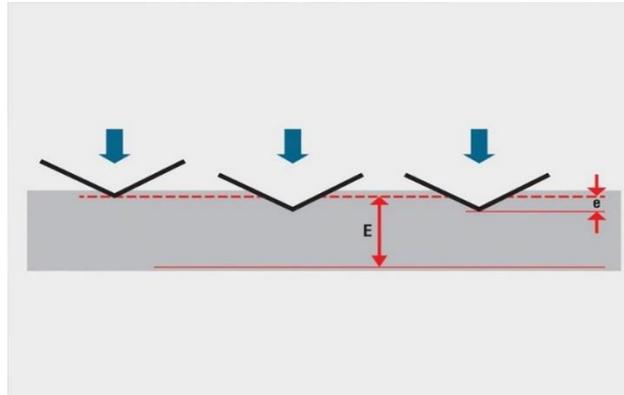


Fig.I.8. L'essai de dureté Rockwell.

3.1.3.2. Essai de dureté Vickers :

L'essai de dureté Vickers convient à tous les matériaux solides y compris métalliques. La dureté Vickers (HV) est calculée en mesurant, à une charge donnée, les longueurs des 2 diagonales d'une empreinte laissée dans le matériau de l'échantillon par l'introduction d'un pénétrateur diamant pyramidal. Les diagonales de l'empreinte sont lues de manière optique afin de déterminer la dureté à partir d'une table ou formule [18].

- Utilisé pour les essais de dureté sur tous les matériaux solides y compris métalliques.
- Adapté à une vaste gamme d'applications.
- Comprend un sous-groupe d'essai de dureté des soudures.

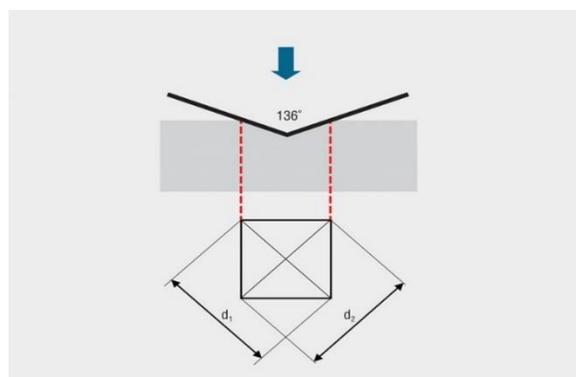


Fig.I.9. Essai de dureté Vickers.

1.1.3.3. L'essai de dureté Knoop :

La méthode Knoop (HK) est une alternative à la méthode Vickers destinée aux essais de microdureté. Elle est principalement utilisée pour éviter les fissures dans les matériaux fragiles ainsi que pour faciliter les essais sur les couches minces. Le pénétrateur est un

diamant pyramidal asymétrique. L'empreinte est déterminée par la mesure optique de la grande diagonale [18].

- Utilisé pour les matériaux durs et fragiles, telles que les céramiques.
- Convient pour les petites surfaces allongées comme les revêtements.

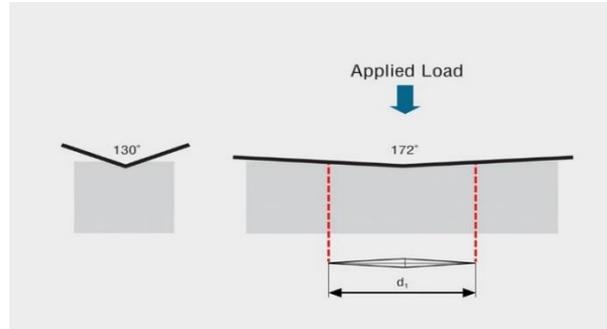


Fig.I.10. L'essai de dureté Knoop.

1.1.3.4. L'essai de dureté Brinell :

L'essai de dureté Brinell est utilisé pour les grands échantillons à structure granulaire grossière ou non homogène. L'essai de dureté Brinell (HBW) laisse une empreinte relativement grande faite avec une bille de carbure de tungstène. La taille de l'empreinte est lue par mesure optique [18].

- Utilisé pour les matériaux à structure granulaire grossière ou non homogène.
- Utilisé pour des grands échantillons.
- Convient pour les pièces forgées ou en fonte dont les motifs structurels sont de taille importante.

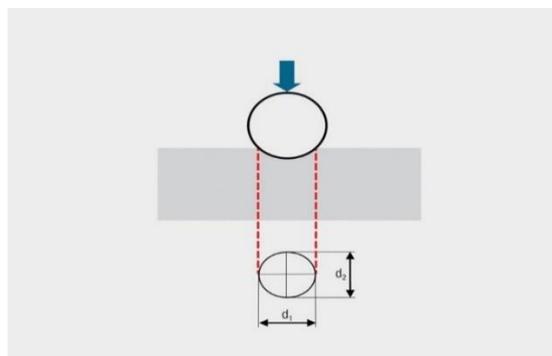


Fig.I.11. L'essai de dureté Brinell.

3.2. Essai de l'usure :

L'usure d'un solide est une perte de matière, un mouvement de matière ou une transformation de matière en surface du solide sous l'effet d'une interaction avec un autre milieu (solide dans notre cas, mais ça peut également être un fluide) [19].

3.2.1. Les différents mécanismes d'usure :

(Cornet et Deville,1998) ont proposé une répartition des mécanismes à l'origine de l'usure dans l'ensemble des milieux industriels. Des exemples de surface utilisée par ces mécanismes sont présentés sur la **figure 13**. L'érosion est provoquée par l'écoulement d'un fluide, généralement chargé de particules, contre la surface. La fatigue superficielle est provoquée par le passage répété d'un contact localisé. Des contraintes de cisaillement élevées se développent sous la surface et conduisent progressivement à l'écaillage de la surface (voir la **figure 12**). Ce type d'usure concerne essentiellement les roulements et les engrenages. Nous nous limiterons ici aux deux principaux mécanismes que sont l'abrasion et l'adhésion. Ils apparaissent dans les contacts où les surfaces qui sont en glissement relatif. Ces deux mécanismes contribuent également au frottement. Enfin, un dernier type d'usure peut être observé. Il s'agit d'une usure thermique liée à une fusion locale d'un des matériaux [19].

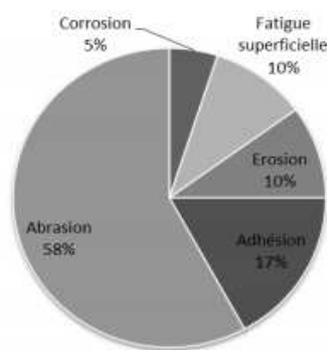


Fig.I.12. Importance relative des mécanismes d'usure dans l'industrie (Cornet et Deville,1998).

3.2.2. Usure adhésive :

Il a été montré que des forces d'adhésion se développent entre les surfaces mises en contact. La rupture de ces liaisons adhésives nécessite d'exercer une contrainte de cisaillement τ_a , à l'origine du frottement. Elle peut s'exprimer :

$$\tau_a = f_a \cdot p_m \quad \tau_a = f_a p_m$$

La pression moyenne contact est représentée par p_m et la contribution adhésive du coefficient de frottement est représentée par f_a . Dans le cas du contact sphère plan, l'application d'une pression conduit à soit à une adhésion (a) ou à une abrasion (b).



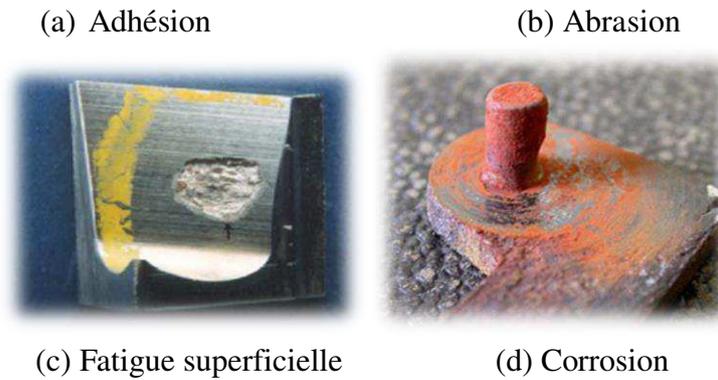


Fig.I.13. Exemples de surfaces usées par différents mécanismes.

La création d'une contrainte de cisaillement sous la surface qui s'exprime par :

$$\tau_0 \approx 0.31p_0 = 0.2p_m$$

Ces deux contraintes sont du même ordre de grandeur. On comprend alors qu'il est parfois plus facile de rompre le matériau (le moins résistant) sous sa surface plutôt que de rompre la liaison adhésive. C'est le mécanisme à l'origine de l'usure adhésive et qui est illustré dans la **figure 14**. L'usure adhésive se caractérise donc par des arrachements irréguliers de matière sur les surfaces (voir **figure 13**). Les particules d'usure arrachées du matériau le plus tendre vont adhérer sur l'antagoniste. Le matériau le plus tendre va donc se retrouver à frotter contre lui-même. D'autre part, la topographie des surfaces et donc les pressions de contact vont changer [19].

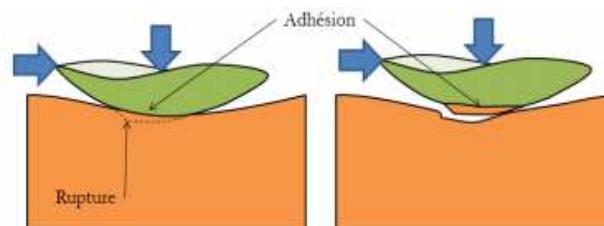


Fig.I.14. Mécanisme de l'usure adhésive.

L'adhésion dépend de l'énergie de surface des matériaux et plus particulièrement de leurs travaux d'adhésion w_{ad} . Lorsque les pressions de contact sont élevées et que les matériaux ont un travail d'adhésion élevée, il est possible d'atteindre un régime sévère d'adhésion où les surfaces sont soudées. Le mécanisme est alors complètement bloqué, on parle de grippage. La **figure 15** présente un exemple de grippage qui s'est produit entre deux solides en acier inoxydable.

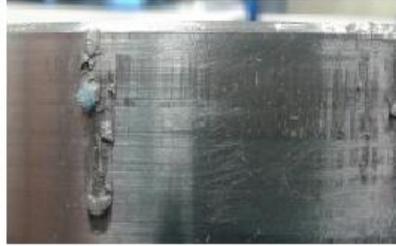


Fig.I.15. Exemple de grippage, manifestation sévère de l'usure adhésive.

Pour limiter l'usure adhésive, il faut augmenter l'index d'adhésion α au-delà de 5 en adaptant les matériaux et leur état de surface [19].

3.2.3. Usure abrasive :

Le mécanisme de l'usure abrasive est décrit sur la **figure 16**. Un solide rigide vient indenter et labourer un matériau qui se déforme plastiquement. Le solide rigide peut être une particule dure qui s'est introduit dans le contact. On parle d'abrasion à trois corps. Le solide rigide peut être un des deux protagonistes du contact. On parle d'abrasion à deux corps.

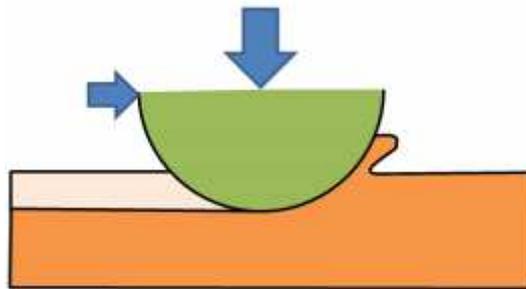


Fig.I.16. Mécanisme de l'usure abrasive.

L'usure abrasive est généralement limitée en augmentant la dureté du matériau le plus tendre. Dans le cas d'abrasion à deux corps, il est souhaitable de réduire l'index de plasticité ψ , afin de rester en régime élastique et limiter le labourage d'une des surfaces. Comme suggéré par l'index de plasticité, il est préférable que le matériau dur soit le plus lisse possible. Notons que l'abrasion est un moyen de production de surfaces (rodage, polissage). La **figure 17** présente les déformations plastiques d'une surface métallique lors du passage d'un poinçon rigide. Dans ce cas, il n'y a pas d'arrachement de matière mais une forte déformation avec notamment des plis de matière en surface [19].

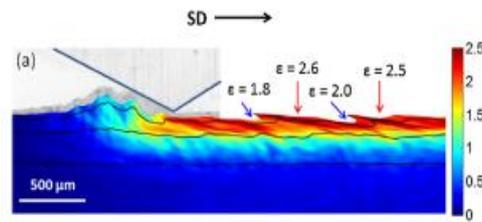


Fig.I.17 . Déformations plastiques d'une surface d'aluminium après le passage d'un poinçon en V. Mesures par PIV

3.2.4. Mesure de l'usure :

L'usure est généralement mesurée au cours d'un test de frottement sur un tribomètre. Des techniques simples de mesure d'usure permettent d'évaluer la quantité de matière enlevée :

- Pesée : pesée de l'échantillon avant et après le test de frottement au moyen d'une balance de précision
- Mesure de cote : Mesure de la variation de longueur d'un échantillon avant et après le test de frottement, dans le cas d'une usure uniformément répartie
- Mesure du volume usé : Mesure de topographie avant et après test pour évaluer le volume enlevé pour créer la piste d'usure.

Les outils de mesure de topographie de surface, permettent d'évaluer les hauteurs d'une surface après usure comme sur les exemples de la **figure 18 [19]**.

Il est ensuite possible de tracer des profils à différents endroits pour mesurer l'aire de la piste d'usure puis le volume de matière enlevée (**figure 19**). Ces profils présentent généralement des bourrelets résultant de la déformation plastique du matériau. Notons qu'on peut aussi observer une augmentation de volume ou de masse en raison des transferts de matière dus à l'adhésion. Il est alors difficile de mesurer effectivement l'usure [19].

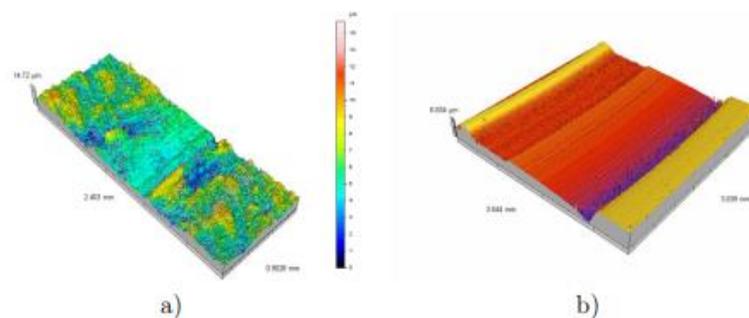


Fig.I.18. Exemples de piste d'usure a) Piste en acier après frottement avec un pion en acier
b) Piste d'une garniture mécanique après frottement.



Fig.I.19. Mesure du volume d'usure.

En mesurant le volume de matière usée à différents instants au cours d'un test tribologique, il est possible d'évaluer le coefficient d'usure K . Le **tableau 02** donne des valeurs indicatives pour des couples de matériaux usuels. Ces valeurs sont à utiliser avec précaution car elles peuvent varier de façon notable suivant les conditions de fonctionnement [19].

Matériaux	K ($mm^3/N.m$)
Métal / Métal	$10^{-3} - 10^{-4}$
Polymère / Métal	$10^{-4} - 10^{-5}$
Composites+lubrifiant solides / Métal	$10^{-5} - 10^{-7}$
Garniture de frein / Métal	$10^{-4} - 10^{-5}$

Tableau.I.02 : Valeurs indicatives de coefficients de coefficient d'usure K de matériaux usuels en frottement à sec.

3. L'essai d'indentation instrumentée :

Le test d'indentation instrumenté (IIT) est une technique de mesurer les propriétés mécaniques des matériaux. Il est un développement des essais de dureté traditionnels tels que Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop. IIT est similaire aux essais de dureté traditionnels en ce qu'un pénétrateur dur, généralement le diamant, est pressé en contact contre le matériau à tester. Cependant, les tests de dureté traditionnels ne donnent qu'une mesure de déformation à une force appliquée, tandis que lors d'un test IIT, la force et la pénétration sont mesurées pendant tout le temps que le pénétrateur est en contact avec le matériel. Tous les avantages de l'IIT en découlent mesure continue de la force et du déplacement. L'IIT est particulièrement bien adapté pour tester de petits volumes de matériau tels que des films minces, des particules ou d'autres petites caractéristiques. Il est le plus couramment utilisé pour mesurer le module de Young (E) et dureté (H). Le module de Young pour un matériau est la relation entre la contrainte et la déformation lorsque la déformation est élastique. Si un ingénieur connaît le module de Young pour son matériau de conception, il peut alors prédire la déformation pour un stress, et vice versa. Dans les métaux, la dureté dépend directement sur la contrainte d'écoulement du matériau à la déformation causée par l'indentation. En d'autres termes, la dureté est un effet indirect mais mesure simple de la contrainte d'écoulement ; au sein d'une classe de métaux, le métal avec la dureté la plus élevée aura également le débit le plus élevé stress.

En plus du module de Young et de la dureté, IIT a également été utilisé pour mesurer le module complexe dans les polymères et les biomatériaux, la limite d'élasticité et le fluage dans les métaux et la ténacité à la rupture dans les verres et les céramiques [20].

SYMBOLE	DIMENSIONS	TERME	PERTINENCE
P	F	Force de contact	Force exercée par le pénétrateur sur l'échantillon et vice versa. La lettre "F" est également utilisée parfois pour représenter cette quantité.
H	L	Déplacement	Pénétration du pénétrateur dans le matériau d'essai, par rapport à la position à laquelle le pénétrateur est entré en contact pour la première fois avec la surface.
S	FL^{-1}	Rigidité de contact	Rigidité élastique du contact ; relation entre F et h lorsque la déformation produite par le mouvement relatif entre le pénétrateur et l'échantillon est entièrement élastique.
h_c	L	Profondeur de contact	Profondeur sur laquelle le matériau entre en contact avec la pointe du pénétrateur ; généralement h_c est inférieur à h en raison de la déformation élastique de la surface à l'extérieur du contact.
\underline{a}	L	Rayon de contact	Distance normale de l'axe du pénétrateur au bord de contact pour les pénétrateurs axisymétriques ; si le pénétrateur est une pyramide, alors un rayon de contact équivalent est calculé comme $a = (A/\pi)^{1/2}$.
A	L^2	Zone de contact	Aire de contact projetée, c'est-à-dire l'aire de contact de surface projetée sur un plan normal à la direction d'indentation.
E_r	FL^{-2}	Module élastique réduit	En effet, il s'agit du module de déformation plane du matériau d'essai, bien que strictement, cela ne soit vrai que dans le cas d'un pénétrateur parfaitement rigide et d'un matériau d'essai isotrope.

E	FL ²	Module d'Young	Module de Young du matériau d'essai ; généralement, E fait le lien entre contrainte et déformation pour un matériau en déformation élastique, $\sigma = E\varepsilon$.
V	—	Coefficient de Poisson	Coefficient de Poisson du matériau d'essai ; cette valeur doit être connue ou estimée pour calculer E. Généralement, est une propriété élastique du matériau qui fournit la relation entre les déformations élastiques dans deux directions. Dans un essai de traction d'une éprouvette cylindrique qui produit une déformation radiale ε_r et une déformation axiale ε_l . $\nu = -\varepsilon_r/\varepsilon_l$.
E _i	FL ²	Module de Young du pénétrateur	Module de Young du matériau constituant le pénétrateur ; pour le diamant, cette valeur est de 1140 GPa.
ν_i	—	Coefficient de Poisson du pénétrateur	Coefficient de Poisson du matériau constituant le pénétrateur ; pour le diamant, cette valeur est de 0,07.
H	FL ²	Dureté	Pression moyenne du contact ; $H = P/A$. Dans les métaux, la dureté mesurée pour le contact plastique est directement <u>lié</u> à la contrainte d'écoulement de la déformation causée par l'échancrure.

(Tableau 03) : Résumé des termes courants

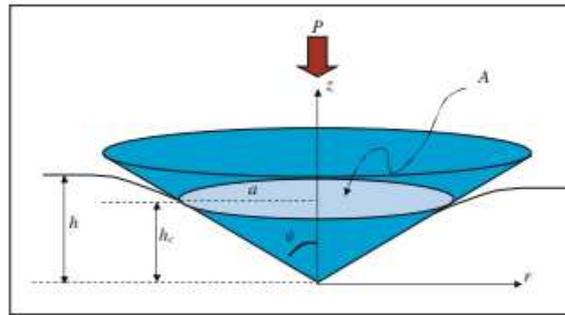


Fig.I.20. Schéma d'un test d'indentation.

3.1. Evaluation des propriétés du matériau :

La deuxième étape de l'analyse est le calcul de la matière propriétés de la courbe charge-déplacement illustrée à la Fig. 3. Ici, les calculs sont présentés dans un ordre intuitif, mais exactement à l'opposé de l'ordre dans lequel les calculs sont réalisés en pratique. C'est-à-dire des calculs de la valeur souhaitée les propriétés, H et E , sont présentées en premier, puis à l'appui les calculs sont présentés au fur et à mesure qu'ils sont requis. Mais quand les données sont analysées en pratique, Eq. 7 est exécuté en premier, et Eqs. 1 et 2 sont exécutés en dernier. [20]

La dureté est calculée comme :

$$H = P/A \dots\dots\dots (1)$$

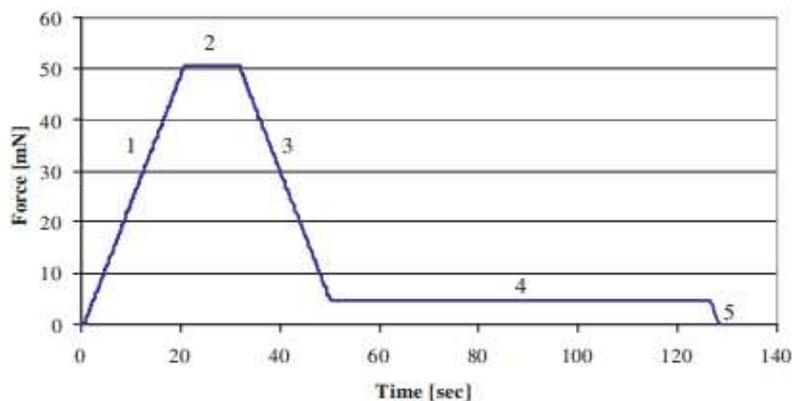


Fig.I.21. Historique force-temps typique pour un essai d'indentation instrumenté ; l'origine de ce tracé est le point où le pénétrateur touche d'abord la surface d'essai.

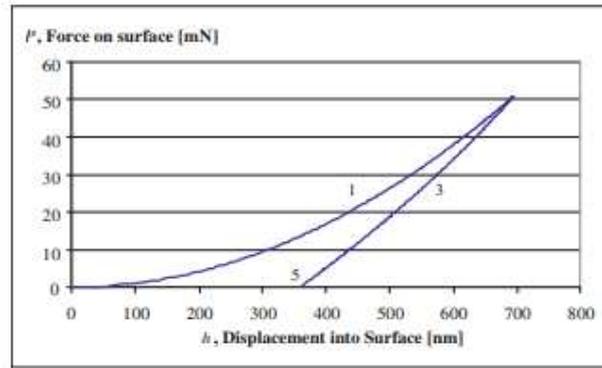


Fig.I.22. Courbe force-déplacement type pour un test d'indentation instrumenté ; ce tracé est la sortie de "Analyse Étape 1" et l'entrée à "Analyse Étape 2" Les nombres sur le tracé correspondent aux segments de test identifié sur la **Figure 21** ; les données des segments 2 et 4 sont tracés, mais ne sont pas visibles en fonction de déplacement.

Le module de Young est calculé à partir du module réduit, Er :

$$E = (1 - \nu^2) \left[\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right]^{-1} \dots\dots\dots(2)$$

Et la relation du module réduit est la suivante :

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} S}{2 \sqrt{A}} \dots\dots\dots (3)$$

Bien que le calcul du module de Young (Eq. 2) nécessite connaissance du coefficient de Poisson de l'échantillon (ν), la sensibilité est faible. L'analyse de sensibilité révèle qu'une incertitude de 40 % dans le coefficient de Poisson se manifeste par une incertitude de 5% dans le module de Young. Si le rapport de l'échantillon d'essai est inconnu (Poisson) , une valeur doit être choisie selon les directives suivantes : 0,2 pour les verres et céramiques, 0,3 pour les métaux et 0,45 pour les polymères.

La zone de contact, qui est utilisée dans les équations. 1 et 3, est calculé en fonction de la profondeur de contact :

$$A = f(hc) \dots\dots\dots (4)$$

La forme exacte de cette fonction, appelée « fonction de surface », elle dépend de la géométrie du pénétrateur et de l'échelle du test. Le pénétrateur le plus courant est un diamant Berkovich. Berkovich est la géométrie alors que le diamant c'est le matériau.

La géométrie de Berkovich est une pyramide à trois côtés qui a environ le même rapport hauteur/largeur qu'une pyramide Vickers (qui est quatre côtés). La **figure 23** montre une impression résiduelle laissée par un Pénétrateur de Berkovich. Un pénétrateur diamant Berkovich est idéal pour la plupart des tests car :

- Ses propriétés mécaniques sont bien connues.
- Il n'est pas facilement endommagé.
- Il est relativement facile à bien fabriquer.
- Il induit une plasticité à de très faibles charges, permettant une mesure significative de la dureté.
- Son angle inclus relativement grand minimise l'influence du frottement.
- La similitude avec le pénétrateur Vickers permet calcul d'un nombre significatif de dureté Vickers (VHN) ; la relation est $VHN (kg/mm^2) = 92,7 H (GPa)$.

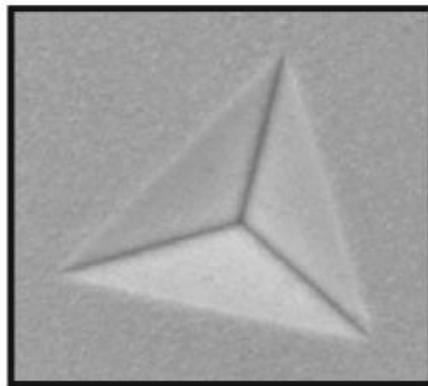


Fig.I. 23. Impression résiduelle en nickel, réalisée par un Pénétrateur diamant Berkovich.

Pour un pénétrateur de Berkovich idéal, la fonction de surface est :

$$A = 24.56h_c^2 \dots\dots\dots (5a)$$

Si la profondeur totale d'indentation est supérieure à 2 microns, alors Éq. 5a peut être utilisé pour calculer A, car la différence entre la géométrie idéale et la géométrie réelle est négligeable à cette échelle. Si la profondeur totale d'indentation est inférieure à 2 microns, alors nous devons tenir compte de l'arrondi au sommet du pénétrateur avec un deuxième terme, faisant fonctionner l'aire

$$A = 24.56h_c^2 + Ch_c \dots\dots\dots (5b)$$

Dans le second terme, C'est une constante qui est déterminée empiriquement en indentant un matériau connu, généralement fusionné silice. Pour la plupart des pénétrateurs Berkovich fabriqués aujourd'hui, C a une valeur de 150 nm ou moins. Le fabricant de l'équipement

d'indentation devrait fournir un processus de déterminer la valeur de C ; ce processus est souvent appelé le “Calibrage de fonction de zone.”

Pour d'autres géométries de pénétrateur, d'autres formes de la zone fonction doit être utilisée. Le **Tableau 04** présente un résumé de ces les fonctions.

Afin d'utiliser l'Éq. 5, nous devons connaître la profondeur de contact.

Pour les pénétrateurs pyramidaux, coniques et sphériques, le contact la profondeur est calculée comme

$$h_c = h - 0.75P/S \dots\dots\dots (6)$$

La rigidité de contact, S, qui est utilisée dans les équations. 3 et 6, est la relation entre la force et le déplacement lorsque le pénétrateur est d'abord retiré de l'échantillon ; c'est quand la réponse matérielle est entièrement élastique. Logistiquement, S est déterminé en ajustant les données force-déplacement acquises pendant le déchargement à une expression de la forme

$$P = B(h - h_f)^m, \dots\dots\dots (7a)$$

Où P et h sont des paires ordonnées de données force-déplacement, et B, hf et m sont des constantes de meilleur ajustement. En règle générale, tous ne les données force-déplacement acquises lors du déchargement sont utilisé dans cet ajustement, mais uniquement les données au-dessus d'un certain niveau de force, souvent 50% de la force maximale. Une fois que B, hf et m ont été déterminé, l'Éq. 7a est différenciée analytiquement avec par rapport au déplacement, puis évalué au maximum déplacement, donnant

$$S = \left. \frac{dP}{dh} \right|_{h=h_{\max}} = Bm(h_{\max} - h_f)^{m-1} \dots\dots\dots (7b)$$

CONSEIL	FONCTION	COMMENTAIRES
Idéal Berkovitch	$A = 24.56h_c^2$	Utilisé quand $h_c > 2$ microns
Réal Berkovitch	$A = 24.56h_c^2 + Ch_c$	Elle est déterminée par indentation d'un matériel connu elle est d'environ 150 nm.
Véritable coin de cube	$A = 2.60h_c^2 + Ch_c$	Elle est déterminée par indentation d'un matériel connu elle est d'environ 150 nm.
Sphère	$A = 2\pi Rh_c$	R est le rayon de la pointe ; valeur connu ou déterminé par indentation d'un matériel connu.
Cône	$A = \pi \tan^2 \psi h_c^2$	Ψ est le demi-inclus angle du cône comme illustré à la figure 20.
Cône à pointe sphérique	$A = \pi \tan^2 \psi h_c^2 + 2\pi Rh_c$	Superposition de la fonction de zone pour une sphère et un cône.
Cylindre à bout plat	$A = \pi \sigma^2$	A est le rayon du poinçon ; A est constant (Indépendant de la profondeur d'indentation).

(Tableau 04) : Fonctions de zone pour divers pénétrateurs géométriques.

Chapitre 02

Matériaux et techniques expérimentales

2.1. Introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter les divers moyens d'élaboration et de caractérisation utilisés dans la réalisation de ce travail. Les techniques et les conditions d'expérimentation seront ainsi exposées.

2.2. Substrat :

Le substrat utilisé lors de cette étude est acier au carbone désigné comme XC48 en AFNOR et C45 dans la désignation DIN. Cet acier est utilisé en mécanique générale pour sa bonne usinabilité ainsi que ses bonnes caractéristiques mécaniques. Il est apte aux traitements thermiques, la composition de cet acier le rend bien adapté au durcissement de surface par traitement thermique afin d'avoir une résistance mécanique et une dureté de surface élevées. Il est largement utilisé dans diverses applications industrielles notamment dans la fabrication de pièces soumises aux chocs et nécessitant une bonne résistance : axes, engrenages, vis sans fin, paliers, pignons, boulonnerie, forge (leviers, arbres...etc.) [21].

Cet acier nous a été fourni par la société MOUSAOUI (Boufarik) sous forme de barre de 10 mm d'épaisseur et 40 mm de largeur. Des éprouvettes sous forme parallélépipédique 40 x 40 x 10 mm (Figure II.1) ont été coupées avec la technique de sciage Figure II.2. Cette technique est utilisée afin de ne pas affecter les caractéristiques mécaniques du matériau lors du découpage. La composition chimique de cet acier est relevée de la fiche technique fournie par l'entreprise.

Tableau II.1. Composition chimique du substrat : acier XC48

Eléments % masse	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Cr + Mo + Ni %
XC48	0.44	0.19	0.67	0.01	0.12	0.02	0.07	0.08	0.006	0.21

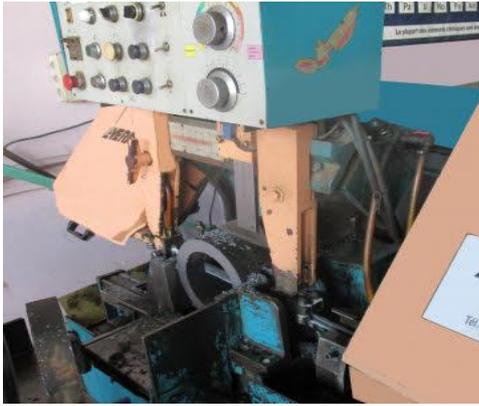


Figure II.2. Machine de sciage

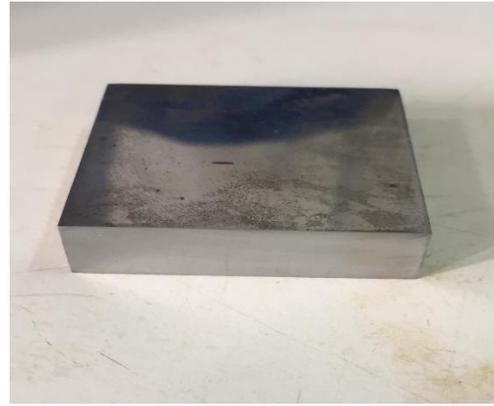


Figure II.1. Échantillon de forme parallélépipédique 40 x 40x 10 mm

L'acier XC48 présente une microstructure composée de deux phases, ferrite et de perlite (acier ferritoperlitique) comme le montre la métallographie de la **Figure II.3**.

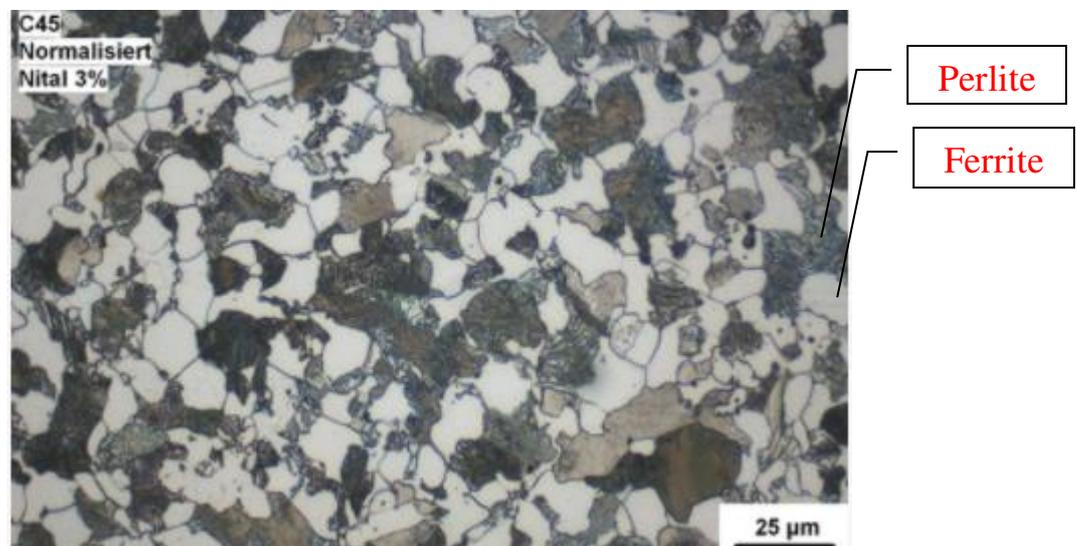


Figure II.3. La microstructure de l'acier XC48 [22].

2.3. Poudres composites :

Les poudres utilisées dans le cadre de ce projet ont été préparées par un 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 termes de résistance à l'usure, à l'érosion et à la corrosion :

- ❖ Poudre d'un alliage Ni-Cr 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 WC17 Co.



Figure II.4. Poudre composite Ni-Cr.

2.4. Préparation de surface :

Le sablage a été utilisé pour 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 (Al_2O_3) contre l'échantillon à l'aide de l'air comprimé sous une grande pression. Le grenailage est réalisé au niveau du laboratoire LTSM Blida.



Figure II.5. Appareil de sablage.

2.5. Procédé d'élaboration des revêtements :

2.5. 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 II.6.**



Figure II.6. Kit Eutalloy.

2.5. 2. Paramètres de projection des poudres :

Les paramètres de projection utilisés lors d'élaboration sont donnés dans le **tableau II.2.**

Paramètre	valeur
Pression d'oxygéné	2.5 bars
Pression d'acétylène	0.6 bar
Distance de projection	80-100 mm
Angle de projection	90°
Distance de la refusions	30-40 mm
Angle de la refusions	90°

Tableau II.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.

2.6. Techniques de caractérisation :

2.6.1. Microscopie optique :

Le microscope utilisé dans notre travail pour caractériser la microstructure, est un microscope optique de marque Carl Zeiss à plateau inversé. Il est équipé de quatre objectifs d'agrandissement de 20X jusqu'à 100X avec un oculaire de 10X (alors si on est en train de voir avec un objectif de 20X accouplé à l'oculaire de 10X alors l'agrandissement de la microstructure est de 200X). La figure montre le Il est équipé d'un appareil photo numérique afin de photographier les microstructures obtenues.



Figure II.7. Microscope optique.

2.6.2. Profilométrie mécanique :

La rugosité est une grandeur permettant de caractériser l'état microgéométrique d'une surface. Nous avons évalué la rugosité de chaque éprouvette à l'aide d'un rugosimètre mécanique.

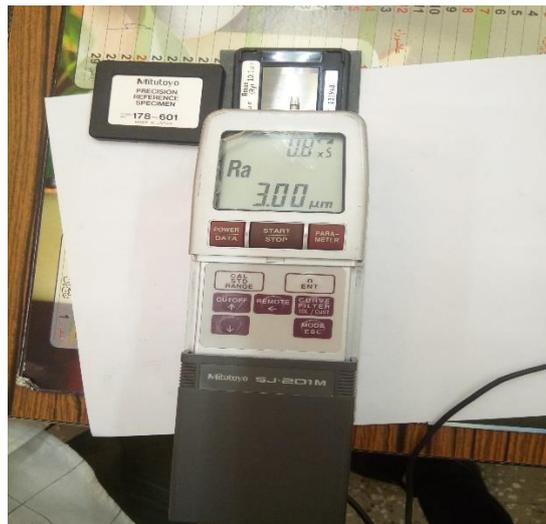


Figure II.8. Profilomètre électronique.

2.6.3. Etude d'indentation :

2.6.3.1. L'instrument d'indentation :

L'indentation instrumentée a été réalisée par un micro indenteur Vickers ZWICK de type ZHU 2.5 KN **figure II.9** 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.

2.6.3.2. Essai d'indentation :

Avant de procéder à l'indentation, les échantillons ont subi un polissage mécanique avec papier en carbure de silicium SiC jusqu'à 2500. Les essais d'indentation ont été réalisés avec une charge de 20 N. Les paramètres opératoires des essais sont donnés dans le Tableau II.3.

Tableau II.3. Paramètre des essais d'indentation.

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 (%)



Figure II.9. Instrument de micro indentation Vickers.

[Disponible au niveau de l'université Ferhat Abbas (Sétif) dans laboratoire de matériaux non métallique]

2.6.4. Etude de micro dureté :

2.6.4.1. Machine d'essais Micro Dureté :

La micro dureté est réalisée sur un micro-duromètre de marque Tukon 2500. Le (ou les) pénétreur(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 II.10. Machine d'essais Micro Dureté. [Disponible au niveau de l'université Ferhat Abbas (Sétif) dans laboratoire de matériaux non métallique]

2.6.4.2. Essai de micro dureté :

Nos échantillons ont été préparés en coupe transversale, 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 2N (200g) et un pas de 50 μm . Les résultats donnés correspondent à des moyennes 2 mesures. Les paramètres opératoires sont précisés dans le **Tableau II.4**.

Tableau II.4. Paramètre des essais de micro dureté.

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 (%)

2.6.5. Etude tribologique :

2.6.5.1. L'instrument tribomètre pion / plan :

Pour la caractérisation tribologique nous avons utilisé un tribomètre pion-plan de type à association alternative NANOVEA T50 qui fournit l'usure et le coefficient de frottement conformément aux normes ISO et ASTM.



Figure II.11. Tribomètre NANOVEA T50 pion /plat.

2.6.5.2. Essai de frottement :

L'essai de frottement est assuré par le glissement relatif du (échantillon) avec la bille (pion) appuyant sur le disque avec une force choisie au préalable et faisant un mouvement alternatif. 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 ligne, nommée piste, et d'une largeur dépendant de l'enfoncement de la bille dans le dépôt. Les paramètres opératoires des essais tribologiques effectués sont indiqués dans le **Tableau II.5**.

Tableau II.5. Paramètres des essais de frottement.

pion	Bille Al ₂ O ₃ (diamètre 5.00 mm)
Charge appliquée	11 (N)
Distance de glissement totale	30 (m)
Vitesse de glissement	30 (mm/s)
La température de milieu	23.5 (°C)
Le taux d'humidité	53.8 (%)
Distance	50 (m)
Nb total de cycles	5001,00 cycles
Atmosphère	O ₂

2.6.6. Etude de dureté :

2.6.6.1. Machine d'essais de dureté :

L'essai de dureté est réalisé sur un duromètre universel à système pivotant traditionnel (pénétrateur/objectif) équipé d'un écran mat et d'une mesure automatique et peut être utilisé pour toutes les procédures de dureté ; Brinell, Vickers, Knoop, HVT et HBT selon les normes DIN, ISO.

Il couvre également toutes les échelles de dureté Rockwell et Rockwell Superficielle. En combinaison avec une platine CNC XY manuelle ou motorisée, le testeur offre la possibilité d'exécuter des programmes de dureté, des modèles de test prédéfinis et/ou d'autres tâches spécifiques définies par l'utilisateur.



Figure II.12. Machine d'essais de dureté.

2.6.6.2. Essai de dureté :

Avant de procéder à l'étude de dureté, les échantillons ont subi une rectification mécanique avec une rectifieuse plane en disque de diamant Pier jusqu'à 500 μ m. Les essais de dureté ont été réalisés avec une charge de 15 Kgf (HR15N).

Chapitre III

Résultats et discussion

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les principaux résultats obtenus dans cette étude. Les résultats présentés, sont par suite discutés et interprétés à chaque étape.

3.2. Rugosité et épaisseur des revêtements :

Les résultats des tests de rugosité et de la mesure d'épaisseur pour les différents revêtements sont regroupés dans le tableau ci-dessous. La rugosité a été mesurée à l'état projeté. Trois paramètres de rugosité ont été évalués, la rugosité moyenne arithmétique Ra, la hauteur maxi du profil Rz et la rugosité moyenne quadratique Rq. La moyenne des valeurs de rugosité a été déterminée à partir de deux mesures. Pour l'épaisseur, la moyenne est calculée à partir de 05 mesures.

Tableau.III.1. Résultats des tests de rugosité et de mesure d'épaisseur.

Etat/ % du WC(Co)		0% WC17C0	15% WC17C0	30% WC17C0	45% WC1C0	60% WC17C0
Rugosité a l'état projeté	Ra moy	3.215	3.53	5.55	17.25	17.99
	Rz moy	19.82	17.759	30.28	82.31	90.125
	Rq moy	4.08	3.375	7.06	21.06	22.225
Etat projeté Epaisseur du Revêtement (µm)	Moyenne	434.8	511.6	605.4	555.6	565
Epaisseur du Revêtement après rectification (µm)	Moyenne	294.6	360	425.2	383.8	260.2

L'évolution de la rugosité des revêtements Ra en fonction du pourcentage de WC (Co) est présentée dans la figure 3.1.

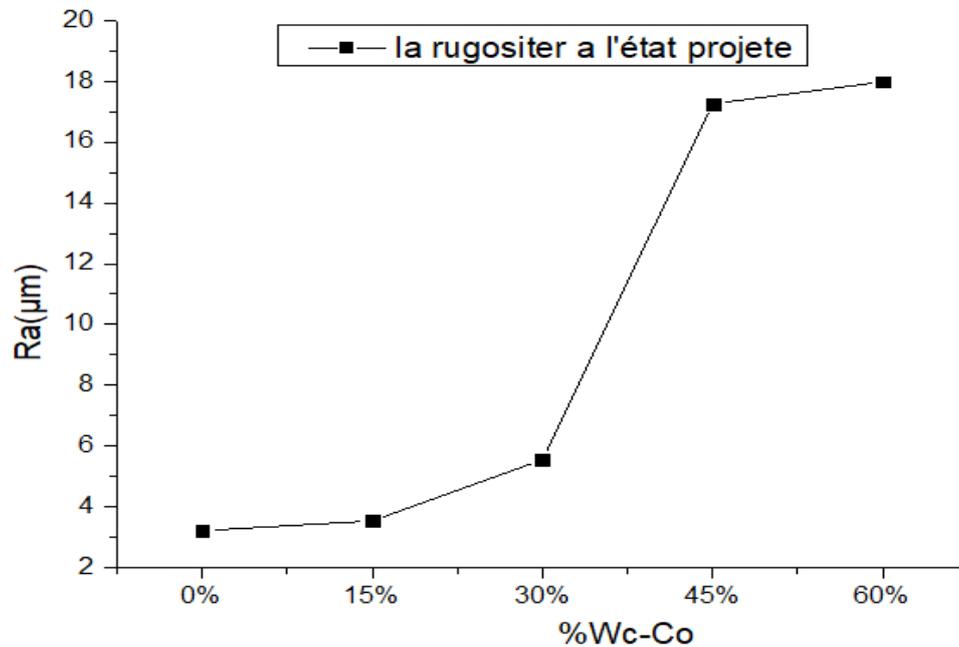


Fig.III.1 Evolutions de la rugosité de surface des revêtements en fonction du pourcentage de WC(Co).

D'après les résultats présentés dans le tableau.III.1 et la courbe III.1 on constate clairement que la rugosité des revêtements augmente avec l'augmentation de la concentration de WC17(Co). Ainsi, le revêtement à 0% de carbure de tungstène offre le meilleur état de surface par rapport aux différents autres revêtements. Aussi, on observe qu'à partir de 30%WC(Co) la rugosité Ra augmente d'une façon importante. Ceci peut être expliqué par le fait que les carbures de tungstène WC restent à l'état solide et que le Co fond dans la matrice de Ni. La présence des WC à cet état de dessous de surface de la matrice après refroidissement augmente la rugosité. On constate aussi que l'épaisseur des revêtements a été réduite considérablement après rectification suite à la présence de cette rugosité.

3.3. Etude métallographique des revêtements :

Après une préparation métallographique de la surface de revêtements permettant de visualiser ces derniers en transversal, nous sommes passés à l'observation au microscope

optique. Les microscopies optiques obtenues pour les différents revêtements sont représentées dans la figure.III.2.

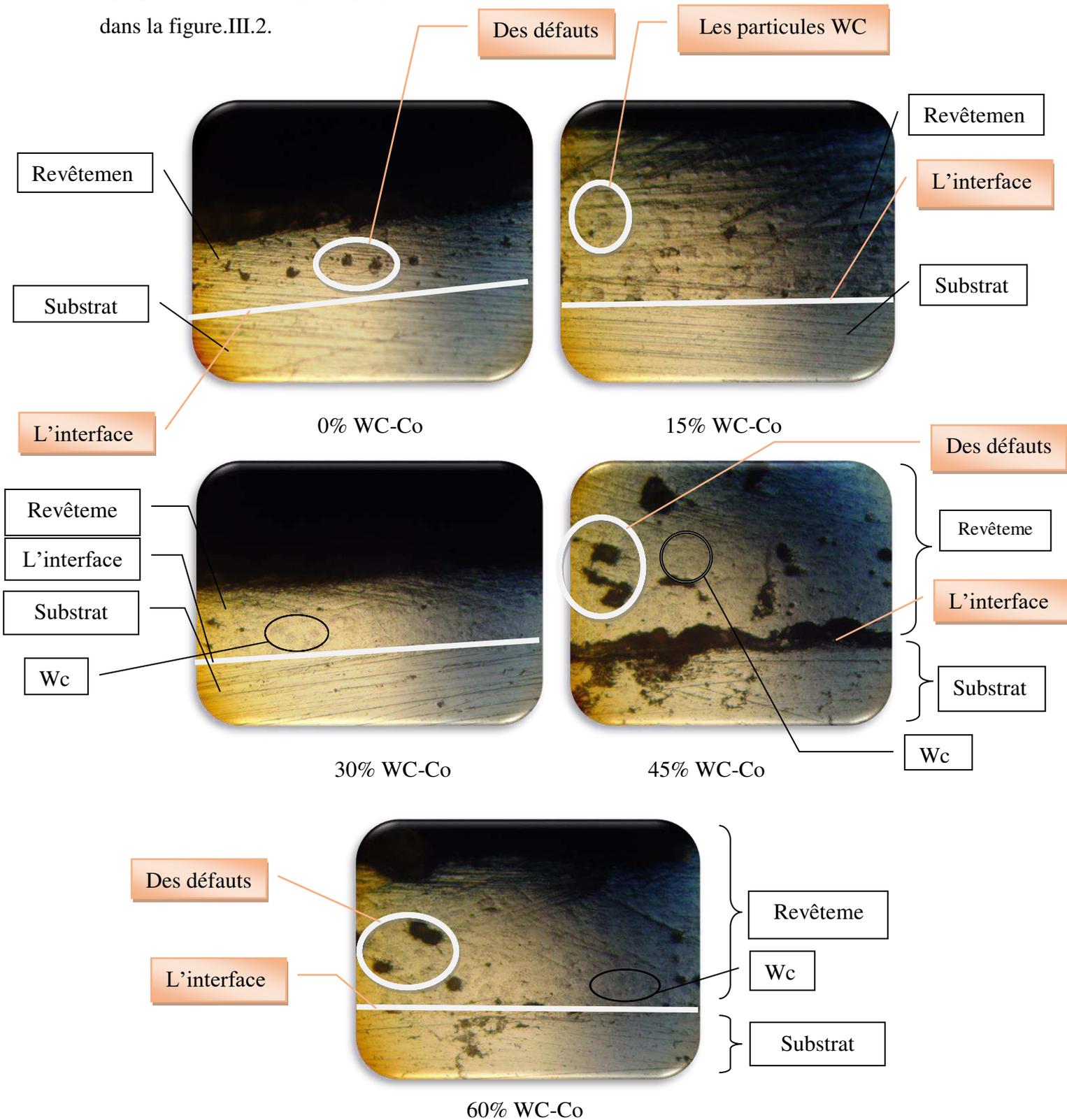


Fig.III.2 : Micrographie optique de différents revêtements.

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

- Sur la surface du revêtement à 0% WC-Co, on remarque la présence de certains défauts ainsi que des porosités. Le revêtement présente une bonne adhésion avec le substrat.
- Avec 15% de WC-Co on observe l'apparition de particules de tungstène non fondu, et une diminution des défauts et même des porosités, aussi, on remarque qu'il y'a un bon accrochage mécanique avec le substrat.
- Une bonne adhésion du revêtement sur le substrat avec un pourcentage de 30% de WC-Co, tel qu'on remarque la disparition de l'interface revêtement-substrat. Aussi, nous n'avons pas constaté la présence des défauts ni des porosités, ni les délaminages à cet endroit, ce qui est un indice de la liaison métallurgique.
- On remarque la présence de défauts dans le revêtement de 45% de WC-Co surtout dans l'interface que nous considérons comme des oxydes liés aux conditions de projection, notamment un préchauffage excessive du substrat avant projection. Les particules non fondues WC augmente avec l'augmentation du pourcentage de carbure tungstène.
- A l'égard du revêtement 45%, le revêtement à 60% (WC-Co) présente aussi des défauts mais loin de l'interface revêtement-substrat.

A fort grossissement (Fig.III.3), on peut constater clairement que le revêtement NiCr (0% WCCo) comporte une phase matrice ainsi que des précipités bien dispersés dans le revêtement. Selon des recherches publiées, la microstructure est composée d'une matrice de γ Ni, de carbures et de borures sous forme de précipités [23].

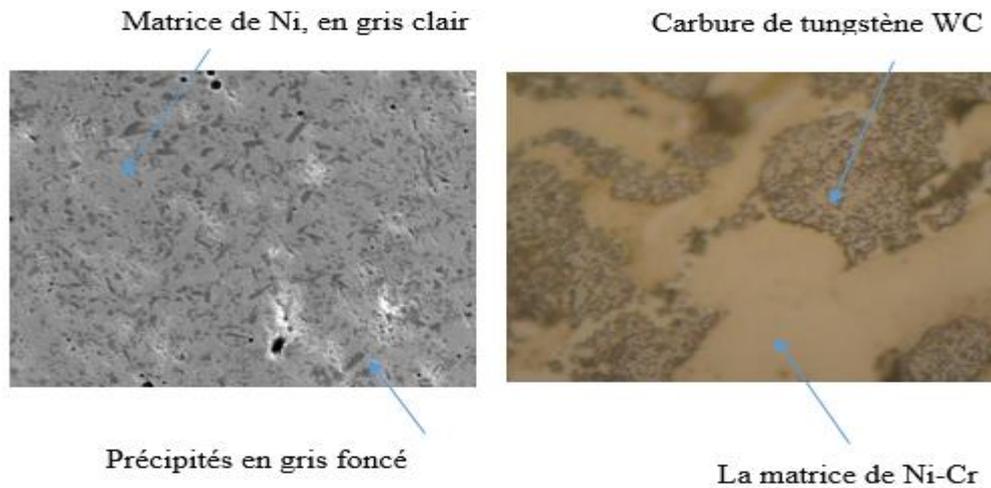


Fig.III.3 : Microstructure des revêtements : a) NiCr b) revêtement composite NiCr-WC(Co) [23]

3.4. Caractérisation mécanique :

3.4.1. Dureté superficielle :

Les mesures de la dureté **Rockwell Superficiel** "HR15N" ont été effectuées sur la surface des revêtements sous une charge de 15 Kgf. Pour avoir une valeur représentative de la dureté des revêtements, trois mesures ont été considérées sur des endroits choisis aléatoirement sur chaque échantillon, la moyenne est ensuite déterminée. La variation de la dureté de surface en fonction du pourcentage de WC(Co) est représentée dans la figure III.4. D'après cette figure on peut constater ce qui suit :

- La dureté augmente avec le pourcentage du WCCo jusqu'à 30%, après il y'a une diminution de la dureté sur les revêtements de (45% et 60% de WC-Co).
- L'augmentation de la dureté au sein des revêtements composites s'explique par la présence plus ou moins importante des particules de WC selon le système du revêtement.
- La baisse de la dureté dans les revêtements à 45% et 60% WC(Co) est expliquée par les défauts et porosités constatés dans ces deux systèmes de revêtements

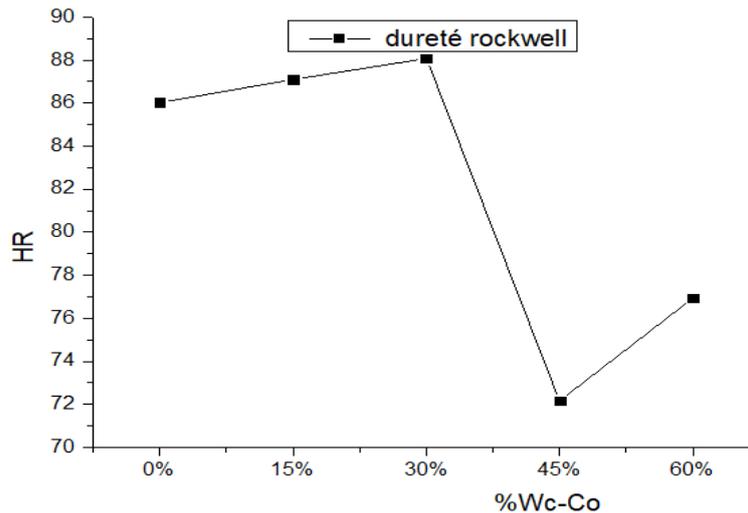


Fig.III.4. La dureté Rockwell superficielle HR15N en fonction de WC-Co

3.4.2. Microdureté Vickers :

Les mesures de microdureté Vickers Hv ont été effectuées sur une coupe transversale sous une charge de 2N (200 g). Trois endroits ont été considérés par la mesure, au niveau du substrat, dans la zone de liaison substrat-revêtement et au sein du revêtement. Les résultats donnés correspondent à des moyennes de trois mesures.

D'après l'évolution de la microdureté Vickers Hv0.2 représentée dans la courbe III.5 on constate :

La microdureté enregistrée en niveau du substrat est faible entre 200-224, valeur représentative de l'acier. Au niveau de la zone de liaison nous avons remarqué une dispersion des valeurs qui dépend de la qualité des revêtements ainsi que de la présence des carbures WC. Ainsi, une valeur élevée est obtenue dans le revêtement 30% qui présente la meilleure qualité de la zone liaison avec une bonne adhésion (Fig.III.2, alors qu'au niveau de revêtement avec 45% WC(Co) présentant une mauvaise qualité de l'interface, une valeur très faible de microdureté est enregistrée, bien évidemment dû à la présence des défauts.

Tableaux.III.2. Evolution de la microdureté sur une coupe transversale de chaque revêtement.

% du WC-Co	Substrat	Zone de liaison	revêtement
0%	207	178	792
15%	200	182	829
30%	214	424	868
45%	209	83	1013
60%	224	340	1074

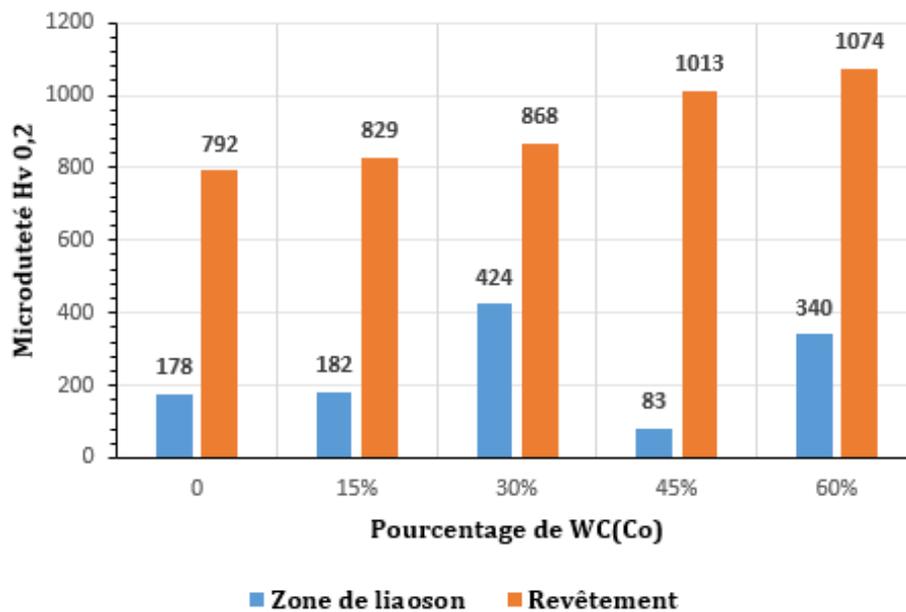


Fig.III.5. Evolution de la microdureté des revêtements en fonction du taux de WC-Co.

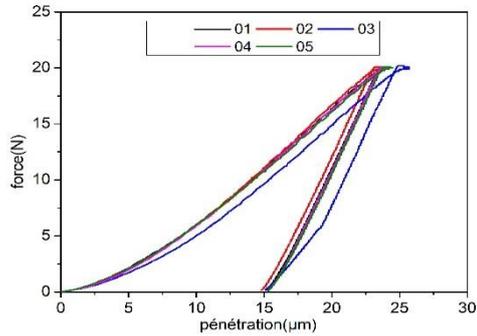
Au sein du revêtement l'évolution de la microdureté est logique. La dureté du revêtement NiCr est due à la présence des précipités de haute dureté (carbures et borures). Dans les revêtements composites, elle augmente avec le pourcentage de carbure de tungstène WC-Co. La dureté est ainsi améliorée presque 4 fois pour 30% et environ 5 fois pour 60% de WC Co.

3.4.3. Indentation instrumentée :

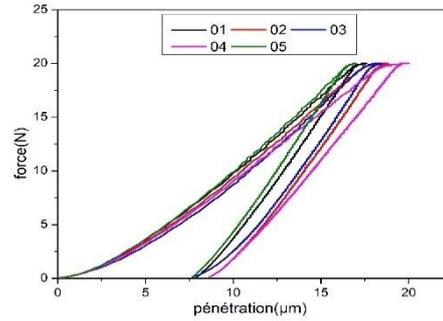
Les essais d'indentation instrumentée ont été réalisés sur la surface de l'acier ordinaire et les revêtements composites avec différents pourcentages de WC17Co, la charge d'indentation

est de 20 N. 05 tests ont été réalisés sur la surface du substrat ainsi que des revêtements composites.

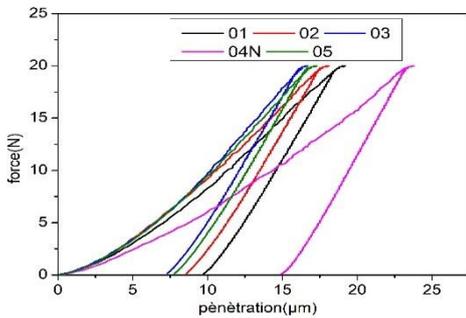
Les courbes charge Vs pénétration sont représenté dans les figures ci-dessous.



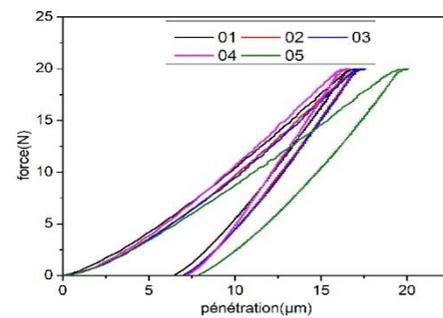
Substrat



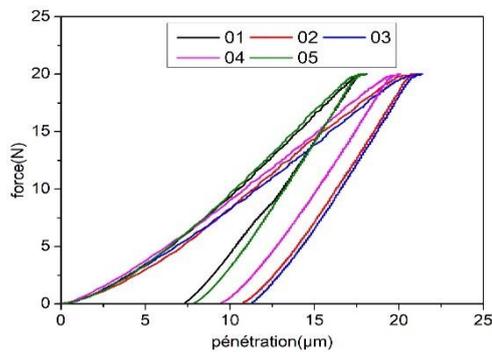
0% WC-Co



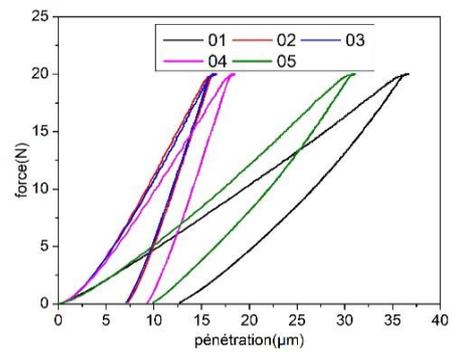
15% WC-Co



30% WC-Co



45% WC-Co



60% WC-Co

Fig.III.6. Courbes charge-décharge déterminés par les tests d'indentation instrumentée pour les différents systèmes de revêtements

Les graphes ci-dessus montrent les différentes courbes charge-décharge obtenues par essais d'indentation sur le substrat en acier et les différents échantillons revêtus. Elles expriment la variation des positions en fonction de la profondeur de pénétration pendant le cycle de charge-décharge qui montre une pénétration progressive de l'indenteur pendant le chargement suivi d'un retrait rapide suite au 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 NiCr (0%) montre le signe d'un comportement élasto-plastique. En analysant la profondeur d'indentation (h_{max} : déplacement du à la déformation élastique plus la déformation élastique) et h_f (après retrait de la charge) on peut constater clairement que le substrat a la plus grande valeur. Cette profondeur diminue en passant de 0% à 30% puis elle augmente un petit peu dans 45 et 60%. Cela indique que l'alliage 30% dispose les meilleures propriétés élastiques (E) et la meilleure dureté H.

7. Essai de frottement :

Les courbes du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles sont représentées dans la figure III.7. D'après ces résultats on remarque clairement que le revêtement sans carbure de tungstène (0%) présente un bon comportement au frottement, avec un COF très faible en comparant avec le substrat et les revêtements composites. Le substrat présente plus de fluctuation que tous les revêtements, cela peut être dû au mécanisme d'usure par abrasion. On constate aussi que le COF augmente avec l'augmentation du pourcentage de carbures provoquant aussi une faible fluctuation de celui et un retard dans l'établissement du régime permanent. La phase de rodage est très courte dans le revêtement NiCr et régime permanent est atteint à environ 200 cycles. Alors que, pour le revêtement 60% le régime n'est atteint qu'après environ 4700 cycles.

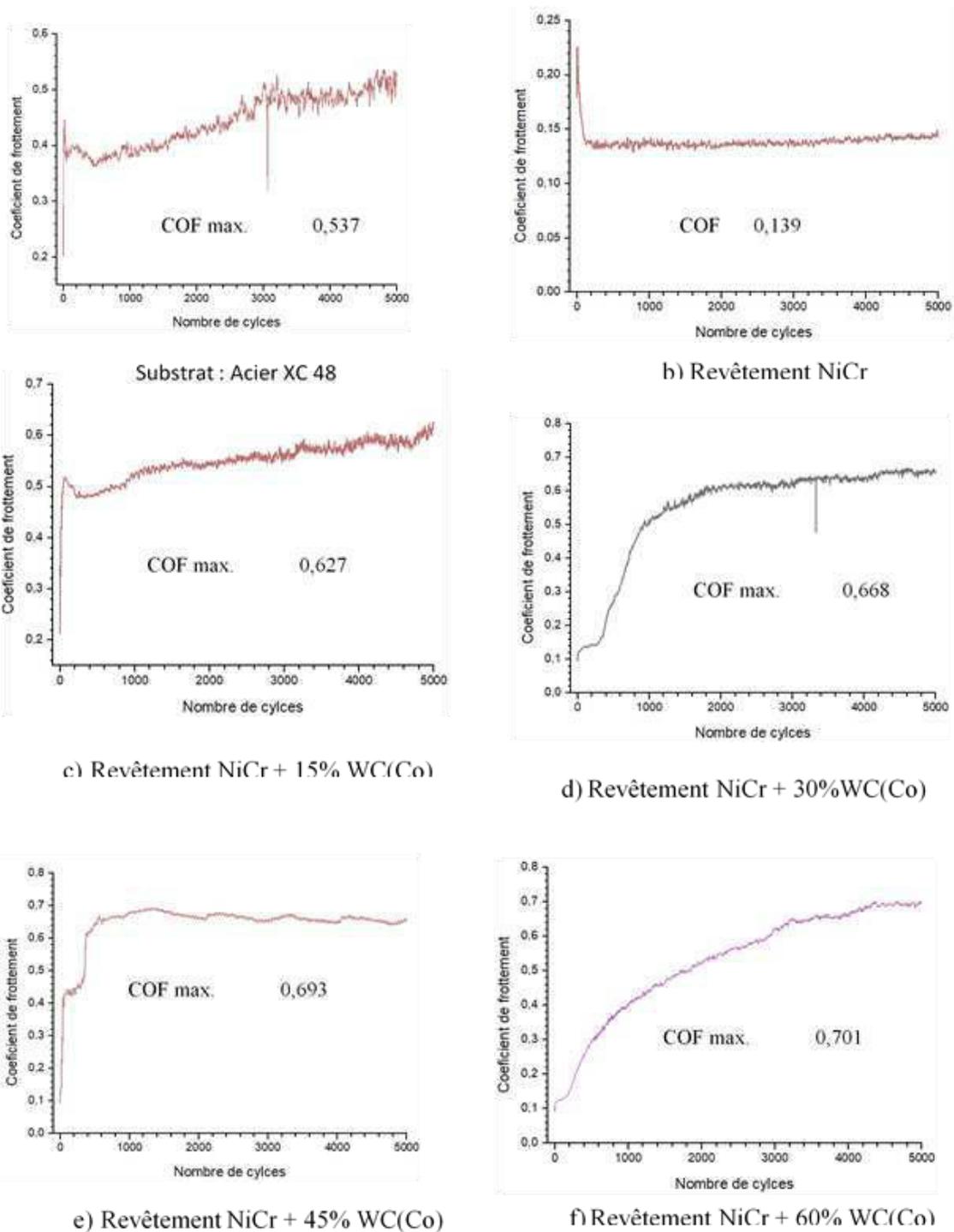


Fig.III.7. Courbes du coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles.

Bien que l'ajout des carbures améliore la résistance à l'usure selon des travaux de recherches antérieurs, le WC fait augmenter le COF d'une façon significative (COF : 0,13 pour

0% Vs 0.7 pour 60%). Donc, dans les applications industrielles qui exigent un faible COF, on recommande d'utiliser le revêtement NiCr sans carbures, bien entendu à condition de remplir les conditions d'usure. Si non il faut remplacer le WC par un autre renfort. Les recherches sont actuellement concentrées sur le TIC.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce travail a eu pour objectif l'élaboration et la caractérisation du comportement tribologique et l'évaluation des mécaniques de revêtements composites à matrice métallique à haute dureté réalisés et refusionnés par projection thermique à la flamme.

La première partie de ce travail a été consacrée à l'élaboration par projection flamme des revêtements composites Ni-Cr-WC17Co avec différentes concentrations de WC17Co (0% - 60%) sur un substrat en acier ordinaire (XC48).

L'analyse micrographique des revêtements montrent que différents les revêtements présentent quelques défauts et porosités particulièrement en surface et à l'interface revêtement – substrat. Toutefois, les revêtements présentent une bonne liaison avec le substrat. En outre, une distribution homogène des carbures est observée dans l'ensemble des revêtements.

Les résultats des tests de dureté, de microdureté et d'indentation instrumentée montrent que la dureté accroit avec l'augmentation du taux du carbures de tungstène jusqu'à 30% (88 HR15N, 868 Hv0.2) puis elle diminue pour les taux de 45% et 60%. La microdureté Hv au bord du revêtement est entre 700 et 1080 (selon le pourcentage du WCCo), elle augmente quand on pénètre dans le revêtement puis décroît quand on accède le substrat à 200, ceci est valable pour tous les échantillons avec les différents systèmes de revêtements.

L'étude de l'indentation instrumentée montre que le substrat présente une certaine plasticité. Cela est en parfaite cohérence avec le comportement d'un acier avec ce % de carbone. Au contraire, les revêtements composites Ni/Cr-WCCo démontrent un signe d'un comportement élasto-plastique. Avec l'augmentation des pourcentages WCCo (> 45%), il y a une certaine fragilité.

L'étude tribologique démontre que la rugosité de surface et le COF augmentent avec le taux de carbures, le revêtement sans carbure de tungstène (0%) présente ainsi la rugosité la plus faible et un très bon comportement au frottement, avec un COF très faible (0.13). Bien

que l'ajout des carbures améliore la résistance à l'usure selon des travaux de recherches antérieurs, le WC fait augmenté le COF d'une façon significative (COF : 0,13 pour 0% Vs 0.7 pour 60%). Donc, dans les applications industrielles qui exigent un faible COF, on recommande d'utiliser le revêtement NiCr sans carbures, bien entendu à condition de remplir les conditions d'usure. Si non il faut remplacer le WC par un autre renfort. Les recherches sont actuellement concentrées sur le TIC.

Références Bibliographiques

- [01] **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
- [02] **Alain PRONER**. (Date de publication : 10 sept. 1999). Projection thermique flamme-Revêtements par projection thermique,.
- [03] **Gérard BÉRANGER, Henri MAZILLE**. (Date de publication : 10 juin 2005). Revêtements et traitements de surface. Approche technologique,
- [04] **A.Constant, G.Henry, J.C.Charbonnier**, édition PYC 1992. Principe de base des traitements thermiques, thermomécaniques, thermochimiques des aciers.
- [05] **H. HERMAN**, Les revêtements par projection plasma, Pour la Science 133, 1988, p. 48-55.
- [06] **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.
- [07] **A. PRONER**, revêtements par projection thermique (éd) Techniques de l'ingénieur, M1645. P.1-20 ,1999.
- [08] **Musil (J)**, Hard and Superhard nanocomposite coatings surface and coatings surface and coatings technolgg.vol 125, p322-330, (2000).
- [09] **boch p**, propriétés et application des céramique, édition hermès science publication, paris,2001.
- [10] **H. HOLLECK ET V. SCHIER**, Multilayer PVD coatings for wear protection, Surface and Coatings Technology 76-77 (1-3), 328-336, 1995.
- [11] **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.
- [12] **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.

[13] **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.

[14] **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.

[15] **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)

[16] : **Alain PRONER**. (Date de publication : 10 sept. 1999). La projection thermique-Revêtements par projection thermique,

[17] : **John Wiley & Sons Ltd.**Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Lille, Villeneuve d'Ascq, France. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings* Second Edition.

[18]: <https://www.struers.com/fr-FR/Knowledge/Hardness-testing#hardnesstestinghowto>.

[19] : **Noël Brunetière**, Introduction à la TRIBOLOGIE, Institut Pprime - Futuroscope 2016,

[20] : **J. Hay**, INTRODUCTION TO INSTRUMENTED INDENTATION TESTING, Novembre/Décembre 2009

[21] : <http://www.metaux-detail.com/pdf/acier/xc48.pdf>.

[22] : <https://www.struers.com/fr-FR/>.

[23] : **Rachidi, R., Elkihel, B., Delaunois, F.** Microstructure and Mechanical Characterization of NiCrBSi Alloy and NiCrBSi-WC Composite Coatings Produced by Flame Spraying *Materials Science & Engineering B* 241 2019: pp. 13 – 21.

<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2019.02.002>