

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université MENTOURI Constantine
Faculté Des Sciences De L'ingénieur
Département De Génie Mécanique

N°.d'ordre: .../.../2010

Série :.../GM/2010



MÉMOIRE

Pour obtenir le grade de
MAGISTER EN MECANIQUE

OPTION: CONSTRUCTION MECANIQUE

MECANIQUES DES SURFACES ET DES MATERIAUX

Par

HAMADI BILLEL

Le 28 /06/2010

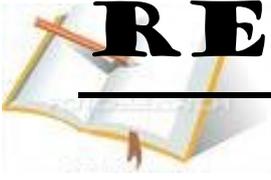
Thème

**ETUDE DES REVETEMENTS DURS
ET APPLICATIONS SUR OUTIL DE COUPE**

JURY:

Président :	Pr. MEZIANI SALIM	Université Mentouri Constantine
Rapporteur :	Dr. ACHOUR ALI (M.C)	Université Mentouri Constantine
Membre :	Pr. CHEKOUR LOUNIS	Université Mentouri Constantine
Membre :	Dr. FOUATHIA OTHMAN (M.C)	Université Mentouri Constantine

Juin 2010



REMERCIEMENT

Je tiens à exprimer nos sincères remerciements à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

*Je tiens tout d'abord à remercier Mr. **Ali Achour**, Docteur au département de génie mécanique, Université Mentouri Constantine, encadreur de mon mémoire de magister, pour la confiance qu'il m'a accordé en me proposant ce mémoire.*

*Je tiens particulièrement à remercier le "Professeur Mr. **Meziani Salim** de l'Université Mentouri Constantine de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Je tiens aussi à remercier les autres membres de jury Monsieur le professeur Mr. **CHEKOUR LOUNIS** et Docteur **FOUATHIA OTHMAN** qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de mon travail et pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de ce mémoire.*

Je n'oublie pas aussi de remercier tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et spécialement.

*Je tiens remercier Mr. **Ismail BEN YASAAD** chef de département de Génie mécanique*

*Je tiens enfin à remercier également tous mes collègues et amis pour leur soutien et **CHORFI SOFIANE**, conseil et aide.*

Hamadi Billel

Résumé

Le mémoire met tout d'abord en évidence l'intérêt vital de la surveillance automatique des outils en usinage. Le premier chapitre présente un rappel sur le phénomène de l'usure et du frottement, le deuxième chapitre expose la théorie de la coupe des métaux des outils de coupe et les revêtements appliqués à ces outils. Le troisième chapitre présente une approche expérimentale dans laquelle nous présentons tout l'appareillage et les instruments que nous avons utilisés. Le quatrième chapitre est consacré à l'expérimentation des outils de coupe en carbure métallique revêtu et non revêtu avec des images topographiques sur microscope à balayage électronique pour les différents régimes de coupe avec discussion et conclusion finale

Mots clé : outils de coupe, revêtement dur, usure.

Abstract

The memory is first demonstrated the vital interests of the automatic monitoring of machining tools. The first chapter provides a background on the phenomenon of wear and friction, the second chapter presents a generality on metal cutting and cutting tools, and study the wear of cutting tools and coatings has these tools. The third chapter presents an experimental approach where we presented all the devices and instruments we have used practically. The fourth chapter talks about the study of wear mechanisms of carbide tools where we choose two types of wafer. The first is coated and uncoated second. Then made the comparative study between these two types of plate or saw the importance of coating on wafers during processing for their duration of life, then takes a few drops on a scanning electron microscope to see different types of wear suffered these tablets during machining.

Key Word: cutting tools, hard coating, wear.

ملخص

وتتجلى أول أطروحة عن المصالح الحيوية للرصد التلقائي للأدوات الآلات. الفصل الأول يقدم معلومات أساسية عن ظاهرة التآكل والاحتكاك ، ويعرض الفصل الثاني لعام على قطع معدنية وأدوات القطع. ودراسة من ارتداء أدوات القطع ومواد التكسية المستخدمة في هذه الأدوات. الفصل الثالث يعرض النهج التجريبي حيث قدمنا كافة الأجهزة والأدوات المستخدمة لدينا تقريبا. المحادثات حول الفصل الرابع دراسة الآليات من ارتداء كربيد أدوات نختار نوعين من أدوات القطع. الأولى هي مغلفة والثانية غير المصقول. ثم جعل الدراسة المقارنة بين هذين النوعين من أدوات القطع و نشاهد أهمية طلاء على رقائق أثناء معالجة لمدة حياتهم ، ثم تأخذ بضع قطرات على مسح مجهرا الكترونيا لمشاهدة وارتداء المختلفة التي تواجه هذه الكريات خلال الآلات.

الكلمة المفتاحية : أدوات القطع ، طلاء الصلب.

Nomenclature générale

Voici, les principales notations utilisées dans la thèse. Leur signification est rappelée lors de leur première utilisation.

Hv : Dureté Vickers.

CDT : Le coefficient de dilation thermique.

K_T : usure en cratère.

RZ : représente la rugosité totale moyenne.

Rq : Rugosité moyenne quadratique.

Vb : Usure en dépouille [mm].

Ra : rugosité arithmétique [μm].

f : Avance [mm / tr].

Vc : vitesse de coupe [m/mn].

ap : profondeur de passe [mm].

X, Y, Z : Coordonnées cartésiennes.

w : l'énergie d'adhérence par unité de surface entre les deux solides en contact.

d : le rayon de contact entre les deux solides.

V : Vitesse de coupe

T : Durée de Vie

n : Exposant de TAYLOR

C : Constante dépendant du couple outil/pièce.

K : dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné.

a : Profondeur de passe.

x, y : Exposants dépendant de la nuance de l'outil.

a : angle de dépouille.

b : angle de taillant.

γ : angle de coupe.

Re : Les rayons de bec.

ϕ : angle de plans de cisaillement.

h : épaisseur de coupe.

h_c : épaisseur du copeau.

F : force résultante.

FN : force normale.

fp : force parallèle.
C_o : cobalt.
C_r : chrome.
C : Carbone.
W : tungsten.
V : vanadium.
Mn : manganese.
Si : silicium.
Ti : titane.
Tic : carbone de titane.
Tin : nitrure de titane.
Fe : fer.
N : azote.
O₂ : oxygéné.
Ca : calcium.
S : soufre.
Al : aluminium.
CBN : Nitrure de Bore Cubique.
DP : Déformation plastique.
DE : Déformation élastique.

Table de matière

Remerciement	i
Résumé	ii
Abstract	iii
ملخص	iv
Nomenclature	v
Tables de matières	vii
Tables de figures	xi

INTRODUCTION 01

Chapitre I : Généralités Sur Le Frottement Et L'usure

I.1 : Introduction	06
I.2 : Les frottements secs	07
I.3 : Principaux modes d'usure	11
I.3.1 : Usure par abrasion, érosion et cavitation	11
I.3.1.1 : Usure par abrasion	11
I.3.1.2 : Usure par érosion	13
I.3.1.3 : Usure par cavitation	14
I.3.2 : Usure par fatigue et délamination	14
I.3.3 : Usure adhésive	15
I.3.4. Autres types d'usure	16
I.3.4.1 : Usure par soudage	16
I.3.4.2 : Usure corrosive et oxydative	16
I.3.4.3 : Usure par fretting	16
I. 4 : Modèles de lois d'usure	17
I.4.1 : Modèle de TAYLOR généralisé	17
I.4.2 : Modèle de COLDING	17
I.4.3 : Modèles de KONING-DEPIEREUX (1969)	17
I.4.4 : Bilan des modèles d'usure	18
I.5 : Conclusion	19

Chapitre II : Usure Et Traitement De Surface Pour Outil De Coupe 20

II.1. Introduction	21
II-2- Généralités Sur La Coupe Des Métaux	22
II-2-1- La définition de la coupe	22
II-3- Les Outils De Coupe	22
II-3-1- Définition des outils	23

II-3-1-1- Les carbures métalliques frittés	23
II-3-1-1-1- Les carbures	23
II-3-1-1-2- Les carbures revêtus	24
II.3.2. Texture de la surface	26
II.3. 2.1. Définitions des critères de rugosité	26
II .4 . Endommagement Des Outils De Coupe	27
II.4.1. Généralité	27
II.4.2. Influence des paramètres de coupe sur l'usure	28
II.4.3. Formes d'usure	29
II.4.4. L'usure en dépouille ou usure frontale	30
II.4.5. La cratérisation de la face d'attaque	30
II.4.6. Déformation plastique	31
II.4.7. Entaille	32
II.4.8. Rupture par cassure en pointe	32
II.4.9. Ebréchures et fissuration d'arête	32
II.4.10. Les mécanismes d'usure des outils	33
II.4.11. Usure par adhésion	33
II.4.12. Usure par abrasion	36
II.4.13. Usure par diffusion	37
II.4.14. Usure par fluage et oxydation	40
II.4.15. Usure avec effets de chocs	40
II.5. Critères d'usure	41
II.5.1. Les critères directs	41
II.5.2. Les critères indirects	41
II.6. Point de vue pratique	41
II.7. Etude des revêtements durs	43
II.7.1. Introduction	43
II.7.2. Classification des matériaux durs	43
II.7.3. les couches minces	46
II.7.4. Formation d'une couche mince	47
II.7.5. Classification des techniques de dépôt	48
II.7.6. Choix d'une technique de dépôt de couches minces	49
II.7.7. Définition d'un plasma	51
II.7.7.1. Technique d'obtention d'un plasma	51
II.7.8. Techniques de dépôts de couches minces	51
II.7.8.1. Evaporation	51
II.7.8.2. Pulvérisation cathodique	53
II.7.8.3. Pulvérisation magnétron	55
II.7.8.4. Système micro-ondes	58
II.7.8.5. Système de dépôt par ablation Laser (Pulsed Laser Deposition-PLD)	60
II.7.8.6. Dépôts chimiques en phase vapeur (C.V.D.- P.A.C.V.D.)	62
II.7.9. Avantages et inconvénients des procédés P.V.D. et C.V.D	63
II.7.10. Intérêt Des revêtements pour outils coupants	64
II.7.11. Propriétés recherchées chez un revêtement	68
II.7.12. Les traitements structurels et superficiels (traitements	68

thermochimiques)	
II.7.12.1. La nitruration	69
II.7.12.1.1. La nitruration par implantation ionique	69
II.7.12.2. Système d'Implantation ionique par immersion plasma	71
II.7.12.2.1. Principe	71
II.7.12.2.2. Avantages de la PIII	71
II.7.12.2.3. Inconvénients de la PIII	72
II.8. Conclusion	73

Chapitre III

Approche Expérimentale

III.1. Introduction	75
III.2. Présentation Du Matériel	75
III.2.1. Machine D'essai	75
III.2.2. Mesure de la rugosité des plaquettes	76
III.2.2.1. Machine de mesure	76
III.2.3. Plaquettes utilisées	77
III.2.4. Matière à usiner	78
III.3. Méthodologie d'essais	78
III.4. Mesure Du Profil De Plaquette	79
III.4.2. Techniques de mesures l'usure	79
III.4.2.1. Mesure avec un microscope optique	79
III.5. Microscope a Balayage Electronique « MEB »	79

Chapitre IV

Analyses Et Interprétation Des Résultats Expérimentaux

IV.1. Montage expérimentale matériaux et technique des mesures	81
IV. 1. 1. Description du montage expérimentale	81
IV. 1.1.1. Spécification	81
IV. 1. 1.2. Méthodes et mesures de la rugosité	81
IV. 1.1.3. Procédure expérimentale	82
IV.1.1.3.1. Outil de coupe	82
IV.2. Evaluation de rugosité pour les deux types de plaquette	82
IV.3. Plaquette revêtue de carbure de Titane	87
IV. 3. 1. Variation de l'usure en fonction de temps	87
IV. 3. 1. 1. commentaires des courbes tracees	87
IV.3.2. Variation de la rugosité en fonction l'usure en dépouille avec plaquette revêtue	88
IV. 3. 3 .Variation de la rugosité en fonction de la vitesse d'usinage	89
IV.3.4. Evolution de la rugosité en fonction de temps	91

IV. 4. Plaquette non revêtue	93
IV. 4.1. Variation de l'usure en fonction de temps	93
IV. 4.2. Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille	95
IV.4.3. Variation de la rugosité en fonction de la vitesse de d'usinage	97
IV. 4 .4.Variation de la rugosité en fonction de temps d'usinage	98
IV.5. images topographique sur microscope a balayage électronique	100
IV.5.1.Commentaires Analyses MEB	102
IV. 6. Conclusion	102
Conclusion générale	103
Référence bibliographique	105

TABLEAU DES FIGURES :

CHAPITRE I :

Fig. I.1 : Frottements secs, vue microscopique de la zone de contact.

Fig. I.2 : Frottement visqueux, vue microscopique.

Fig. I.3 : Surfaces en contact et frottement.

Fig. I.3 (a) : surfaces en contact sans action Perpendiculaire.

Fig. I.3 (b) : surface en contact avec déformation : Déformation de la surface de contact.

Fig. I.3 (c) : surface en contact avec action normale Et tangentielle.

Fig. I.4 : Lois de Coulomb Solide sur un plan horizontal soumis à une force Horizontale Bilan des forces Vue microscopique de l'interface de contact Force de frottement en fonction de la force Horizontale de traction.

Fig. I.5 : Vue microscopique de l'interface de contact lorsque les deux surfaces sont en mouvement l'une Par rapport à l'autre.

Fig. I.6 : Schémas des mécanismes d'usure abrasive : découpe, fracture, fatigue et arrachage.

Fig. I.6.a : coupe, si l'abrasif est suffisamment aiguisé.

Fig. I.6.b : repoussage de la matière en surface.

Fig. I.6.c : fracturation, si le solide est fragile.

Fig. I.6.d : enlèvement de grains, si le matériau est insuffisamment homogène.

Fig. I.7 : Schémas des mécanismes d'usure par érosion : découpe, fatigue, repoussage ou fissuration, fusion, fusion et autres phénomènes et érosion atomique.

Fig. I.7.a : découpe.

Fig. I.7.b : fatigue.

Fig. I.7.c : repoussage ou fissuration.

Fig. I.7.d : fusion.

Fig. I.7.e : fusion et autres phénomènes.

Fig.I.7.f : érosion à l'échelle atomique.

Fig. I.8 : Schéma des défauts provoquant l'usure par délamination.

Fig. I.9 : Schéma de l'usure adhésive. Le matériau adhère à la surface antagoniste et lui arrache de la matière.

Fig.I.10 : Représentation graphique des différents modèles.

Chapitre II :

Fig. II.1 : Comparaison des matériaux de coupe d'après.

Fig.II.2. Plaquette carbure revêtue, multicouches d'après.

Fig. II.3 : paramètre de rugosité

Figure: II.4 : Usure présentée comme une fonction de la température.

Fig.II.5. Formes d'usure des outils de coupe.

Fig.II.6. Rupture par cassure en pointe.

Fig.II.7. (a) fissuration d'arête (b) ébréchure d'arête.

Fig.II.8. Perte de masse en fonction du temps.

Fig.II.9. Contact de deux corps métalliques.

Fig.II.10. Arête rapportée d'après.

Fig.II.11 Phase d'usure par adhésion.

Fig. II.12 : Coupe orthogonale d'acier [31] (a) $V_c=0,5$ m/s, $f=0,2$ mm/tr (les flèches blanches indiquent les dépôts de matière laissés sur la pièce après l'évacuation de l'arête rapportée) - (b) $V_c=2$ m/s, $f=0,2$ mm/tr.

Fig.II.13 : Début de l'usure par abrasion.

Fig.II.14:Durée de coupe $T= 500$ min.

Fig. II.15 : Usure par abrasion (a) sur la face de coupe après usinage d'alliage de titane, et (b) sur la face de dépouille après usinage.

Fig. II.16 : Mécanismes d'usure par diffusion : (a) Représentation schématique des différents stades de l'usure d'un outil carbure, (b) Modèle dynamique de diffusion, et (c) Modèle quasi-statique.

Fig. II.17 : Cratère formé par usure par diffusion sur une plaquette carbure après secondes d'usinage d'un acier 42 Cr Mo 4 avec une vitesse de coupe de 300 m/min.

Fig. II.18 : Face de dépouille.

Fig.II.19 : face de coupe.

Fig. II.20 : Classification des matériaux durs.

Fig. II.21. Gamme d'épaisseurs réalisables suivant les différentes techniques de dépôt.

Fig. II.22. Diagrammes schématiques des techniques d'évaporation, a) évaporation réactive, b) évaporation réactive assistée par une anode, c) évaporation assistée par un canon à ions et d) évaporation assistée par un canon à ions.

Fig.II.23. Diagrammes schématiques de techniques telles que a) la pulvérisation magnétron, b) la pulvérisation magnétron assistée par un laser pulsé, c) le dépôt ionique assisté par un

système multi-arc pour la fabrication de TiCN et d) la pulvérisation assistée par arc pour élaborer TiCN.

Fig. II.24 : A/ Principe de la pulvérisation –B/ Illustration des interactions ion/solide à basse et haute énergie.

Fig. II.25 : Trajectoires électroniques.

Fig. II.26 : Magnétron plan circulaire conventionnel .

Fig. II.27 : Exemples d'arrangements de cathodes magnétron : a) Magnétron déséquilibré, b) dual magnétron pour copulvérisation, c) tri cathodes pour multicouches ou alliages, d) arrangement à 4 cathodes pour multicouches, alliages, couches réactives, e) dual magnétron face-à-face pour multicouches, alliages et dépôt sur des substrats de géométrie complexe.

Fig. II.28 : Schéma de principe du réacteur associant magnétron et systèmes micro-ondes pour l'ionisation de la vapeur pulvérisée.

Fig. II.29 : Schéma de principe du réacteur PLD.

Fig. II.30 : Mise en situation des 4 zones caractérisant le contact du triplet Pièce outil copeau.

Fig. II.31 : Zone de sollicitations du couple outil/matière.

Fig. II.32 : Principe de l'implantation ionique.

CHAPITRE III :

Fig. III.1 : tour parallèle conventionnel

Fig. III .2: PERTHOMETER

Fig. III .3: méthodologie de mesure la rugosité.

Fig.III.4 : types des plaquettes utilises.

Fig.III.5 : structure de plaquette utilises.

Fig. III.6 : porteur de référence CCLNL 25 M 12 IC.

Fig III .7 : chariotage vue de face.

Fig III .8 : chariotage vue en dessus.

Fig. III.9 : chariotage vue a gauche.

Fig. III.10 : chariotage vue complet.

Fig. III.11 : microscope vue de face.

Chapitre IV :

Fig. IV. 1. Evaluations de Rugosité des plaquettes non revêtue sur le rugosimètre mécanique pour différentes régimes de coupe.

Fig. IV.2. Évaluations de la rugosité des plaquettes revêtues sur le rugosimètre mécanique pour différentes régimes de coupe.

Fig.IV. 3. usure frontale V_b en fonction du temps, sur 42CrMo4 outils revetu TIN avec le paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$.

Fig.IV. 4 . usure frontale V_b en fonction du temps, sur 42CrMo4 outils en carbure de tungstene TIN avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p= 0,4 \text{ mm}$.

Fig. IV.5 .Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille avec plaquette revêtue TIN pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec les paramètres de coupe suivante : $a =0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $V_c= 180\text{m/mn}$.

Fig. IV.6 .Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille avec plaquette revêtue TIN pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec les paramètres de coupe suivants: $a =0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $V_c=220\text{m/mn}$.

Fig. IV.7. Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille avec plaquette revêtue TIN pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2\text{mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $V_c= 260\text{m/mn}$.

Fig. IV. 8. Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille avec plaquette revêtue TIN pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, $a =0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $V_c=300\text{m/mn}$.

Fig. IV.9 .Variation de la rugosité (R_a) en fonction de la vitesse de coupe (V_c) pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec plaquette revêtue $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p= 0,2\text{mm}$.

Fig. IV.10. Variation de la rugosité en fonction du temps pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec plaquette revêtu TIN, $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $V_c=180\text{m/mn}$.

Fig. IV.11. Variation de la rugosité en fonction du temps pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec plaquette revêtu TIN, $a =0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $V_c=220\text{m/mn}$.

Fig. IV.12. Variation de la rugosité en fonction du temps pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec plaquette revêtu TIN, $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $V_c=260\text{m/mn}$.

Fig. IV.13. Variation de la rugosité en fonction de temps pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, plaquette revêtu TIN, $a =0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $V_c=300\text{m/mn}$.

Fig. IV.14. Variation de l'usure (V_b) en fonction du temps de coupe (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a= 0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $V_c= 180\text{m/mn}$.

Fig. IV.15 .Variation de l'usure (V_b) en fonction du temps de coupe (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 220$ m/mn.

Fig. IV.16. Variation de l'usure (V_b) en fonction du temps de coupe (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 260$ m/mn.

Fig. IV.17. Variation de l'usure (V_b) en fonction du temps de coupe (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 300$ m/mn.

Fig. IV.18. Variation de la rugosité (R_a) en fonction de l'usure en dépouille (V_b) avec plaquette non revêtue, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 180$ m/mn.

Fig. IV.19. Variation de la rugosité (R_a) en fonction de l'usure en dépouille (V_b) avec plaquette non revêtue, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 220$ m/mn.

Fig. IV.20. Variation de la rugosité (R_a) en fonction de l'usure en d épouille (V_b) avec plaquette non revêtue, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 260$ m/mn.

Fig. IV.21. Variation de la rugosité (R_a) en fonction de l'usure en dépouille (V_b) avec plaquette non revêtue, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 300$ m/mn.

Fig. IV.22. Variation de la rugosité (R_a) en fonction de la vitesse de coupe (V_c) (180 – 300) m/min avec plaquette non revêtue.

Fig. IV.23. Variation de la rugosité (R_a) en fonction du temps (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 80$ m/mn.

Fig. IV.24. Variation de la rugosité (R_a) en fonction du temps (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 100$ m/mn.

Fig. IV.25. Variation de la rugosité (R_a) en fonction du temps (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 120$ m/mn.

Fig. IV.26. Variation de la rugosité (R_a) en fonction du temps (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 140$ m/mn.

Fig. IV.27. Image MEB de plaquette TiN pour le chariotage de l'acier 42CrMo4 avec les paramètres de coupe suivantes : $a = 0,2$ mm/tour; $V = 120$ m/min; $p = 0,2$ mm; $t = 70$ min Illustrant le détachement de revêtement

Fig. IV.28. Image MEB de plaquette TiN pour le chariotage de l'acier 42CrMo 4 avec les paramètres de coupe suivantes : $a = 0,2$ mm/tour ; $V = 140$ m/mn ; $p = 0,2$ mm; $t = 50$ min Montrant une fragilisation de revêtement avec formation de cratère.

TABLEAU DE FIGURES

Fig. IV.29 .Image MEB de plaquette TiN pour le chariotage de l'acier 42CrMo4 avec les paramètres de coupe suivantes : $a = 0.2\text{mm/tour}$; $V = 120\text{m/n}$; $p = 0.2\text{mm}$; $t = 180\text{min}$ détermination de l'usure en dépouille.

Fig. IV. 30. Image MEB de plaquette TiN pour le chariotage de l'acier 42CrMo4 avec les paramètres de coupe suivantes : $a = 0.2\text{mm/tour}$; $V = 140\text{m/mn}$; $p = 0.2\text{mm}$; $t = 60\text{min}$ détermination de l'arrête de coupe avec formation cratère et d'un amas de matière.

Introduction

1. L'usure

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.

La majeure partie de cet travail est consacrée à l'usure des outils de coupe. L'usure ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres comme la vitesse, la température ou le temps. Si certaines formes d'usure sont relativement régulières, d'autres au contraire connaissent des sauts très brutaux, dans des rapports pouvant aller parfois de 1 à 100 000 ou plus, lorsque certaines valeurs critiques sont franchies.

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables tels que l'affûtage des outils, la finition d'une surface par rectification.

2. L'intérêt des revêtements de surfaces

Les outils de coupe sont maintenant presque tous munis de revêtements qui sont devenus l'un des principaux facteurs de leur efficacité. Pour assurer un usinage efficace il ne suffit plus de savoir choisir la meilleure forme d'outil pour la fabrication envisagée, il faut aussi déterminer le revêtement le mieux approprié. Il ne suffit pas que l'outil enlève des surépaisseurs de métal, il faut aussi qu'il laisse derrière lui une surface utilisable et que l'opération soit aussi peu coûteuse que possible. Un bon revêtement doit limiter les échauffements, éviter les soudures à froid, augmenter les vitesses de coupe et les profondeurs de passe, diminuer les efforts de coupe et contribuer à l'obtention d'un bon état de surface. Il doit aussi s'user lui-même très peu.

2.1. La dureté : c'est un facteur essentiel car les plus grandes durées de vie ne peuvent être obtenues qu'avec des surfaces très dures. Toutefois, une très grande dureté ne garantit nullement une grande durée car bien d'autres facteurs entrent en jeu. Il s'agit d'une qualité nécessaire mais pas suffisante. Les dépôts de diamant par CVD

ont une durété qui peut atteindre 20 fois celle des dépôts PVD ; la vitesse de coupe est pratiquement triplée par rapport aux mêmes outils non revêtus et ils constituent le meilleur choix pour l'usinage de beaucoup de métaux non ferreux.

2.2. La résistance à l'usure : il s'agit avant tout de la résistance à l'abrasion, mais elle ne garantit pas les outils contre le bris des arêtes ou la formation d'arêtes rapportées par soudure à froid.

2.3. Le coefficient de frottement : il doit être aussi faible que possible pour limiter les échauffements qui sont toujours nuisibles à la durée de vie des outils. Un faible coefficient de frottement favorise l'écoulement des copeaux sur les plaquettes de coupe et permet d'obtenir de meilleurs états de surfaces.

2.4. La résistance à l'oxydation à chaud : elle permet entre autres d'augmenter les vitesses de coupe.

2.5. la résistance au grippage : elle doit être étudiée en fonction du matériau à travailler, il s'agit avant tout d'éviter la formation des arêtes rapportées qui se produisent souvent lors de l'usinage de l'aluminium, du cuivre ou des aciers inoxydables

3. Les principaux revêtements utilisables

3.1. Nitrure de titane (TiN) :

C'est un traitement standard obtenu par déposition physique en phase vapeur. La dureté de surface atteint 81 HRc, le coefficient de frottement lors de la coupe est d'environ 0,4 et la stabilité thermique est assurée jusqu'à environ 550 °C. Ce traitement est adapté à la coupe de beaucoup de matériaux, en particulier les métaux ferreux, les aciers courants alliés et non alliés, les aciers durs et les aciers rapides.

3.2. Carbonitrure de titane (TiCN)

La dureté est plus importante, jusqu'à 90 HRc et le coefficient de frottement plus faible, environ 0,3. Ce revêtement convient parfaitement pour la coupe de matériaux réputés difficiles comme les aciers moulés, les alliages d'aluminium, les aciers à outils, le cuivre, l'inconel, les alliages de titane et les métaux non ferreux en général.

3.3. Nitrure de titane et d'aluminium (TiAlN)

Ce revêtement à hautes performances procure une dureté de surface pouvant atteindre 80 HRC. Il garde sa dureté à haute température grâce à la formation d'une couche d'alumine mauvaise conductrice de la chaleur qui permet d'évacuer un maximum de calories en les transférant dans les copeaux plutôt que dans l'outil lui-même. Il devient possible d'atteindre des vitesses de coupe très élevée avec très peu de liquide de refroidissement, ou même pas du tout. Le faible coefficient de frottement permet d'usiner des matériaux abrasifs comme l'acier moulé, les alliages d'aluminium, les aciers à outils ou encore les alliages de nickel.

3.4. Nitrure d'aluminium et de titane (AlTiN) :

La proportion d'aluminium est plus grande, la surface est plus dure et le revêtement est mieux protégé de l'oxydation car la couche d'alumine qui se forme est plus épaisse. La coupe à haute température et à haute vitesse devient possible.

3.5. Borure de titane (TiB₂)

Ce revêtement est plus dur que les précédents et sa surface est très lisse, ce qui procure un coefficient de frottement très bas, un très bon écoulement des copeaux et une grande résistance à l'usure. Par son caractère anti-adhésif avec de nombreux métaux, il évite la formation d'arêtes rapportées et on l'apprécie pour l'usinage des alliages aluminium-silicium, du titane, du magnésium et des alliages de cuivre.

3.6. Nitrure de chrome (CrN) :

Il prend un aspect irisé qui lui vaut le surnom de rainbow coating, traitement arc-en-ciel. Malgré une très faible épaisseur, les caractéristiques sont encore meilleures que pour les revêtements précédents ; il résiste très bien à la corrosion, possède une dureté de 90 à 92 HRc, une très bonne résistance à l'abrasion et aux chocs et un coefficient de frottement extrêmement bas qui peut descendre jusqu'à 0,027. Ce revêtement est indiqué pour les alliages d'aluminium très chargés en silicium, les aciers inoxydables, les aciers à haute teneur en nickel, le titane et de nombreux matériaux composites. En outre, ils s'adaptent très bien aux situations difficiles qui amènent à la formation d'arêtes rapportées.

3.7. Diamant

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. **Il ne faut pas les utiliser pour usiner les aciers** car la chaleur dégagée favorise la dissolution du carbone dans les copeaux et détruit rapidement le revêtement.

4. Application des outils

Les outils de coupe sont des instruments ou moyens pour assurer l'usinage de la pièce. Il est fabriqué à partir de différents matériaux durs pour améliorer ces caractéristiques. Il faut mettre en évidence et étudier les matériaux convenables pour produire cet instrument et les couches de revêtement qui assure la coupe en présentant un faible coefficient de frottement, une faible abrasion et une moindre corrosion.

5. Objectif du travail

Notre travail consiste à étudier l'état de surface des outils de coupe et leur usure pour améliorer la qualité des pièces usinées. Notre mémoire est composé de quatre chapitres, une introduction et conclusion générale.

Le premier chapitre présente une généralité sur le frottement et l'usure. Le deuxième chapitre est entièrement consacré aux généralités sur la coupe de métaux, les outils de coupe et l'étude de l'usure des outils de coupe et les revêtements durs appliqués à ces outils. Le troisième chapitre présente une approche expérimentale où nous avons présenté tous les appareils et les instruments que nous avons utilisés. Le quatrième chapitre est consacré à l'étude des phénomènes d'usure des outils en carbures métalliques et reprend les notions fondamentales sur la durée de vie des outils.

Chapitre I

Généralités sur se frottement et l'usure

I.1. Introduction

Le phénomène de frottement intervient dans de nombreuses applications quotidiennes et industrielles : la marche, une roue qui roule, un tire-bouchon, une cale, un roulement à bille, une chaîne de vélo, une courroie, une vis sont autant d'exemples d'applications où l'on retrouve du frottement soit utile soit parasite. Le frottement est utile à la marche mais parasite dans le cas des roulements.

Le phénomène de frottement n'est pas un phénomène unique. En effet, il existe plusieurs sortes de frottements :

- Le frottement sec, mis en évidence par Coulomb apparaît lorsque deux surfaces physiquement distinctes sont en contact et sont enclines à glisser l'une contre l'autre. Ce frottement est dû à l'encastrement des petites irrégularités positives d'une des surfaces dans les irrégularités négatives de l'autre surface.
- Le frottement visqueux apparaît lorsqu'un fluide sépare les surfaces en contact. Le frottement visqueux est généralement moins important que le frottement sec. Il est dû à la viscosité du fluide.

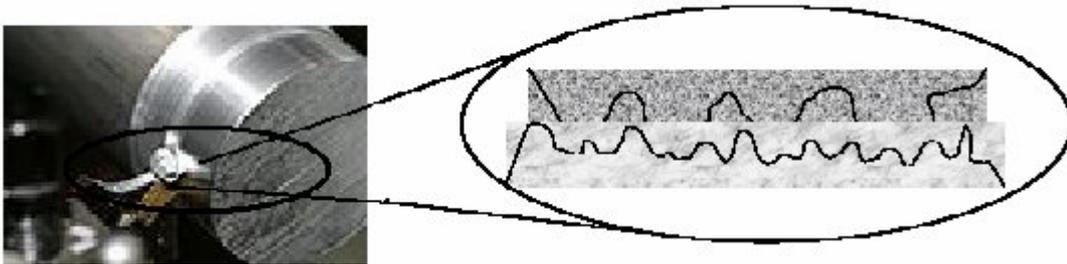


Figure I.1. Frottements secs, vue microscopique de la zone de contact [1].

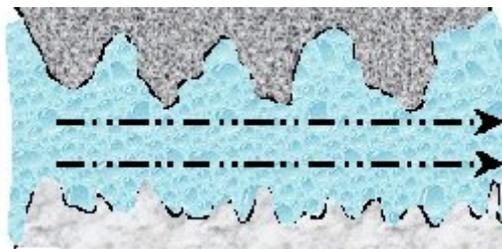


Figure I.2. Frottement visqueux, vue microscopique [1].

- Le frottement interne apparaît au sein du matériau lorsque celui-ci est soumis à un cycle de contraintes. Il ne sera pas évoqué ici, ce phénomène relevant plus de la résistance des matériaux.

Dans le cadre de ce mémoire, nous n'aborderons que les frottements secs. Nous donnerons tout d'abord une introduction sur le phénomène de frottement sec.

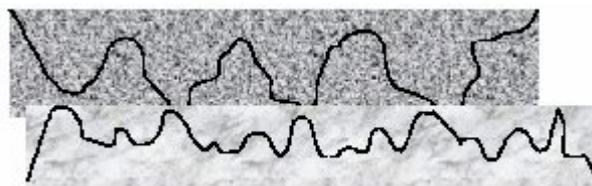
I.2. Les frottements secs

Rappelons que ce frottement apparaît lorsque deux surfaces matériellement distinctes sont en contact et ont tendance à glisser l'une contre l'autre. Ce phénomène en lui-même n'est pas un phénomène unique. En effet, il est la combinaison de plusieurs effets :

- Tout d'abord, la cause la plus intuitive du frottement réside dans le fait que les surfaces de contact ne sont pas parfaites, elles présentent des crêtes et des creux de hauteur plus ou moins variable, de géométrie plus ou moins variable. Ainsi lorsque les surfaces sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, les aspérités de l'une viennent se placer dans les creux de l'autre.
- Sous l'action du poids d'un des corps (dans le cas où les surfaces de contact sont horizontales mais ceci est valable à chaque fois qu'il existe une composante de l'action d'un des corps perpendiculaire aux surfaces de contact), les corps en contact se déforment légèrement et les crêtes de l'un viennent s'engraver plus profondément dans les creux de l'autre.
- Une troisième considération réside dans le fait qu'au niveau des points de contact, les atomes des matériaux d'une des surfaces se trouvent dans le voisinage très proche des atomes de l'autre surface. Il apparaît donc une attraction atomique entre les deux surfaces au niveau des points de contact. C'est pourquoi il est faux de penser que si les deux surfaces sont parfaitement lisses (jusqu'au niveau atomique), le glissement pourra s'opérer parfaitement.

De ces considérations, nous pouvons tirer plusieurs conclusions :

Tout d'abord, les forces de frottements n'apparaissent que lorsqu'un mouvement tangentiel ou une tendance au mouvement tangentiel (par l'intermédiaire d'une force de composante tangentielle non nulle) existe. Par exemple lorsqu'une assiette repose sur une table, la réaction de la table sur l'assiette est uniquement verticale. La force de frottement horizontale n'apparaît qu'au moment où l'on essaie de faire glisser l'assiette sur la table en lui appliquant une force horizontale.



a) surfaces en contact sans action

Perpendiculaire.

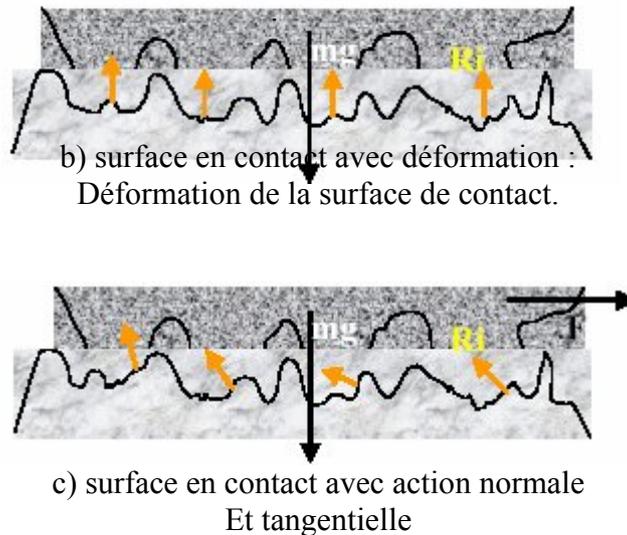


Figure I.3. Surfaces en contact et frottement [1]

Pour diminuer le frottement, il ne faut pas nécessairement diminuer la taille des crêtes et des creux des deux surfaces. En effet si l'on diminue la taille des crêtes et des creux, on augmente les forces atomiques entre les deux surfaces et on peut obtenir l'effet inverse de l'effet recherché.

Pour diminuer les frottements, il vaut mieux diminuer la surface totale de contact des deux matériaux. On peut ainsi dans cette optique :

- utiliser un matériau possédant une surface très lisse avec de toute petites crêtes et creux en combinaison avec un matériau dont la surface est plutôt rugueux avec de grosses crêtes et des creux profonds et larges.
- utiliser des matériaux durs moins déformables de manière à éviter que le frottement augmente sous l'effet combiné de la force normale et la déformation locale du matériau.

Il existe un lien entre la force de frottement et la force normale à la surface.

Il existe un lien entre la force de frottement et le couple de matériaux utilisés.

En effet, de toutes ces considérations, Coulomb a déduit et vérifié les lois qui portent son nom. Ces lois sont expérimentales. Les expériences réalisées par Coulomb ont visé à mesurer la force de frottement en fonction de la force horizontale appliquée à un solide posé sur un plan horizontal et soumis à la pesanteur verticale. Elles ont montré que la force de frottement égalait toujours la force horizontale jusqu'à une valeur maximale de la force de frottement. Ensuite, le solide se met en mouvement et la force de frottement est constante dans une plage

de vitesses pas trop élevée. Enfin, lorsque la vitesse augmente encore, la force de frottement diminue (voir figure ci-après).

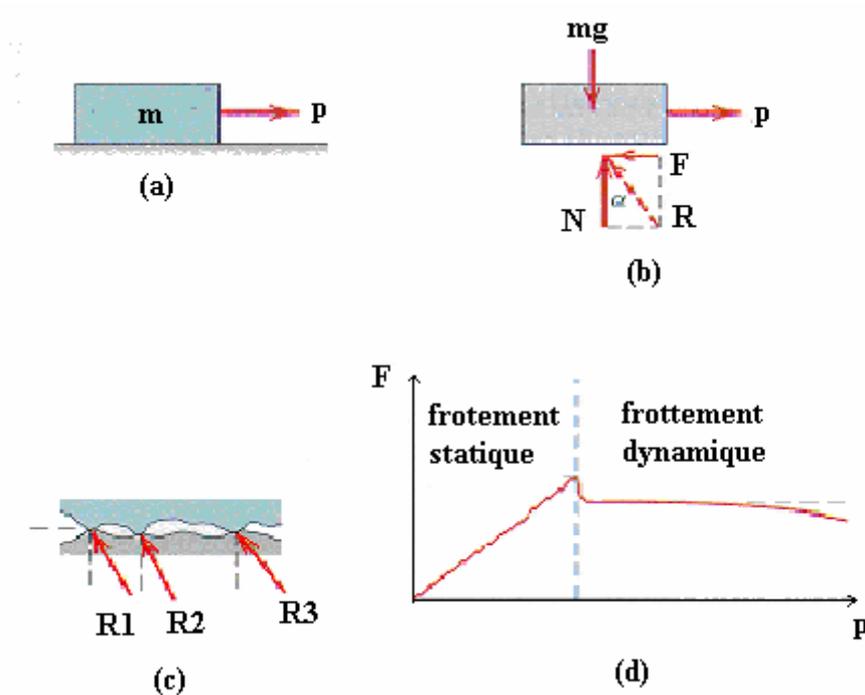


Figure I.4. Lois de Coulomb [2].

- (a) Solide sur un plan horizontal soumis à une force horizontale.
- (b) Bilan des forces.
- (c) Vue microscopique de l'interface de contact.
- (d) Force de frottement en fonction de la force horizontale de traction.

Coulomb a établi que la force de frottement statique maximum était proportionnelle à la force normale (le poids dans ses expériences) selon un coefficient de proportionnalité dépendant du couple de matériaux utilisé et appelé coefficient de frottement statique : $F_s \leq \mu_s N$. Étant donné que la force de frottement ne peut mettre en mouvement le solide, elle ne peut dépasser la force P . Donc la force de frottement va toujours essayer de réaliser l'équilibre dans la mesure de ses possibilités c'est-à-dire en restant toujours inférieure à la force de frottement maximale admise selon la loi de Coulomb. Donc la première loi de Coulomb s'exprime plutôt de la manière suivante : $F_s \leq \mu_s N$.

Une question se pose : pourquoi la force de frottement dynamique est-elle inférieure à la force de frottement statique maximale ? Intuitivement, on peut penser que lorsqu'il y a mouvement, les deux surfaces ne sont en contact que par l'intermédiaire des crêtes de leurs irrégularités (voir figure ci-après).

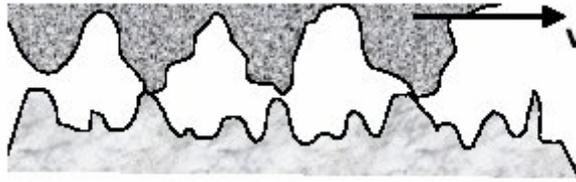


Figure I.5. Vue microscopique de l'interface de contact lorsque les deux surfaces sont en mouvement l'une par rapport à l'autre [2].

De la même manière, la force de frottement va s'opposer au mouvement au maximum de ses possibilités.

Sans toutefois arrêter le solide. C'est pourquoi, cette fois la seconde loi de Coulomb s'exprime sous la forme d'une égalité :

$$F_d = \mu_d \cdot N.$$

Si une distinction est faite ici dans la notation entre les coefficients de frottement statique et dynamique, il arrive souvent qu'aucune distinction dans la notation ne soit faite. Il existe également une approche géométrique au coefficient de frottement statique. Si on considère la réaction de liaison du support sur le solide, on constate que son support forme un angle α par rapport à la direction normale à la surface. Lorsque la force de frottement statique atteint son maximum, l'angle α atteint également son maximum φ_s . Étant donné que la tangente de l'angle α est donné par le rapport $\frac{F}{N}$, la tangente de l'angle maximum nous donne la valeur du coefficient de frottement statique :

$$\tan(\varphi_s) = \mu_s.$$

De la même manière on peut trouver la relation géométrique nous donnant le coefficient de frottement dynamique.

Matériaux	μ_s
Métal sur métal	0.15 – 0.20 [3].
Métal sur bois	0.20 – 0.60 [3].
Bois sur bois	0.25 – 0.50 [3].
Caoutchouc sur béton	0.50 – 0.90 [3].
Acier sur acier (sec)	0.60 [3].
Acier sur acier (graissé)	0.10 [3].
Acier sur téflon	0.04 [3].
Acier sur babbitt (sec)	0.40 [3].
Acier sur Babbitt (graissé)	0.10 [3].
Acier sur laiton (sec)	0.50 [3].

I.3. Principaux modes d'usure

Avant d'étudier plus en détails l'usure des outils de coupe, il convient tout d'abord de rappeler les principaux modes d'usure observés sur les matériaux métalliques ou non métalliques.

On distingue plusieurs modes d'usure : abrasive, par érosion, par cavitation, adhésive, par fatigue et délamination et enfin par d'autres modes d'usure plus particuliers. Elle permettra d'introduire les notions de base utilisées en tribologie ainsi que les grandeurs importantes. Elle fournira également des éléments de réflexion pour la présente étude.

I.3.1. Usure par abrasion, érosion et cavitation

L'usure par abrasion, érosion et cavitation est produite par le contact entre une particule et la surface d'un solide. Ces types d'usure sont dus à l'action d'un matériau antagoniste dans différents états : solide, particulaire, liquide ou gazeux.

I.3.1.1. Usure par abrasion

L'usure abrasive est due au contact entre la surface de l'outil et la surface d'un solide. La rugosité responsable de l'usure peut être un pic de la surface antagoniste, mais également un débris d'une surface ou plus généralement un troisième corps introduit dans le contact. L'endommagement subi par la surface se présente sous la forme de stries parallèles à la direction de glissement. En fonction de la sévérité du contact, plusieurs transformations de la surface abrasée se produisent. Elles dépendent des propriétés mécaniques et de la géométrie des matériaux en contact. Si la surface du solide sollicité est considérée comme parfaitement plane, les endommagements suivants peuvent être observés [4] (Figure I.6) :

- coupe, si l'abrasif est suffisamment aiguisé (Figure I.6.a) ;
- repoussage de la matière en surface (Figure I.6.b) ;
- fracturation, si le solide est fragile (Figure 1.6.c) ;
- enlèvement de grains, si le matériau est insuffisamment homogène (Figure I.6.d).

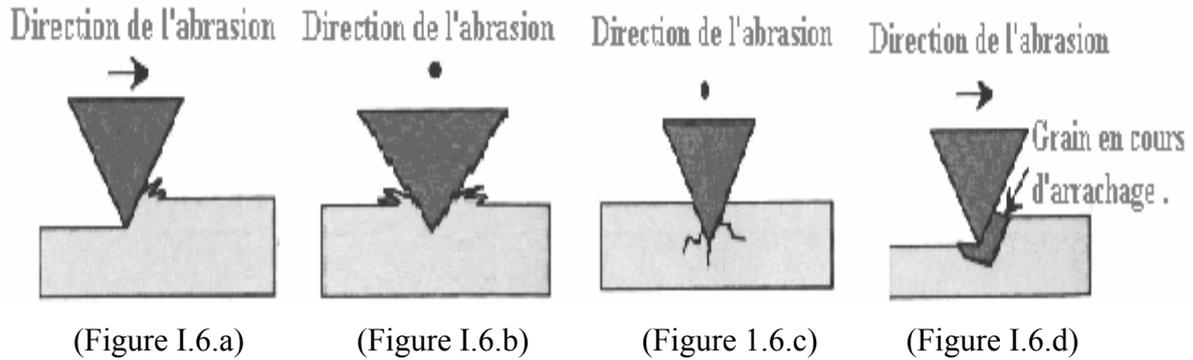


Figure I.6 : Schémas des mécanismes d'usure abrasive : découpe, fracture, fatigue et arrachage [4].

Lors de l'abrasion d'une surface, l'abrasif provoque soit la formation d'un copeau qui enlève directement de la matière, il se produit alors de l'abrasion par découpe, soit la formation d'un bourrelet plastique sur les bords de la rayure et le passage répété d'aspérités enlève celui-ci : c'est l'abrasion par fatigue.

La fatigue de la surface d'un matériau abrasé est analogue à ce qui est observé pour les matériaux soumis à des sollicitations volumiques. Le passage répété de l'abrasif provoque la propagation des fissures dans le matériau à partir de défauts initialement présents dans celui-ci. La fracturation du matériau est due aux contraintes présentes à l'arrière du contact en surface ou en sous-couche. Dans le cas d'une sphère frottant sur un plan [4] en donne son expression analytique. Mouginot, dans sa thèse et ses articles, développe de manière très complète le mécanisme de fissuration dû au contact [4].

L'enlèvement d'un grain dans un matériau est relativement rare, il est principalement trouvé sur les céramiques. Ce mécanisme provoque des enlèvements de matière extrêmement grands quand la cohésion entre les grains est faible et la taille des grains importants.

L'étude de l'écoulement de la matière en fonction des conditions de sollicitations permet de mieux comprendre l'usure abrasive. Elle dépend des propriétés mécaniques du matériau et de la géométrie de l'indenteur utilisé (celui-ci imposant une déformation et une vitesse de déformation). La mesure du facteur de frottement permet aussi d'estimer la dissipation d'énergie dans le système lors du test de rayage, c'est pourquoi, pour modéliser le rayage, sont introduites des grandeurs telles que l'énergie d'abrasion ou la dureté à la rayure.

En pratique, il coexiste toujours au moins deux modes d'action sur une même surface, la part de la coupe restant en général assez faible (10 à 20%) [4].

I.3.1.2. Usure par érosion :

L'usure par érosion est causée par des impacts de particules solides ou liquides contre la surface d'un solide. Ce mécanisme d'usure dépend des propriétés des matériaux en présence, de l'angle d'impact, de la vitesse d'impact et de la taille de la particule.

Comme précédemment plusieurs types d'érosion sont observés [4] (Figure I.7) :

- ✓ découpe (Figure I.7.a) ;
- ✓ fatigue (Figure I.7.b)
- ✓ repoussage ou fissuration (Figure I.7.c) ;
- ✓ fusion (Figure I.7.d) ;
- ✓ fusion et autres phénomènes (Figure I.7.e) ;
- ✓ érosion à l'échelle atomique (Figure I.7.f).

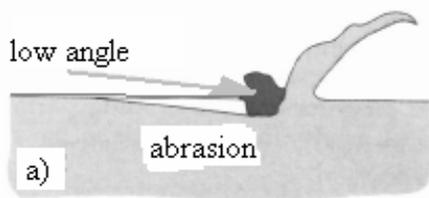
L'érosion à faible angle d'incidence provoque un enlèvement de matière par la formation de copeaux.

Lorsque l'angle augmente, à faible vitesse, des impacts répétés peuvent provoquer une propagation lente de fissures dans le matériau. Si la vitesse est plus importante, des déformations plastiques apparaissent, le bourrelet ainsi formé est ensuite enlevé par l'impact d'autres particules. Dans les mêmes conditions, en fonction des propriétés du matériau érodé, la fissuration peut engendrer l'enlèvement de matière.

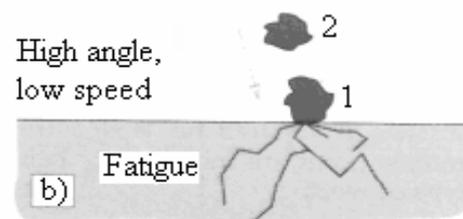
A grande vitesse et grand angle d'incidence, la particule peut fusionner avec le matériau érodé. Dans des cas extrêmes – comme la collision d'une météorite avec une planète – et pour des matériaux particuliers, la particule incidente fusionne même avec le solide érodé et provoque des projections de débris au voisinage de l'impact.

A l'échelle atomique, l'impact entre un atome et un atome d'un cristal peut provoquer l'enlèvement de ce dernier.

L'usure par érosion possède donc beaucoup de similitudes avec l'usure abrasive.



a. Découpe



b. Fatigue

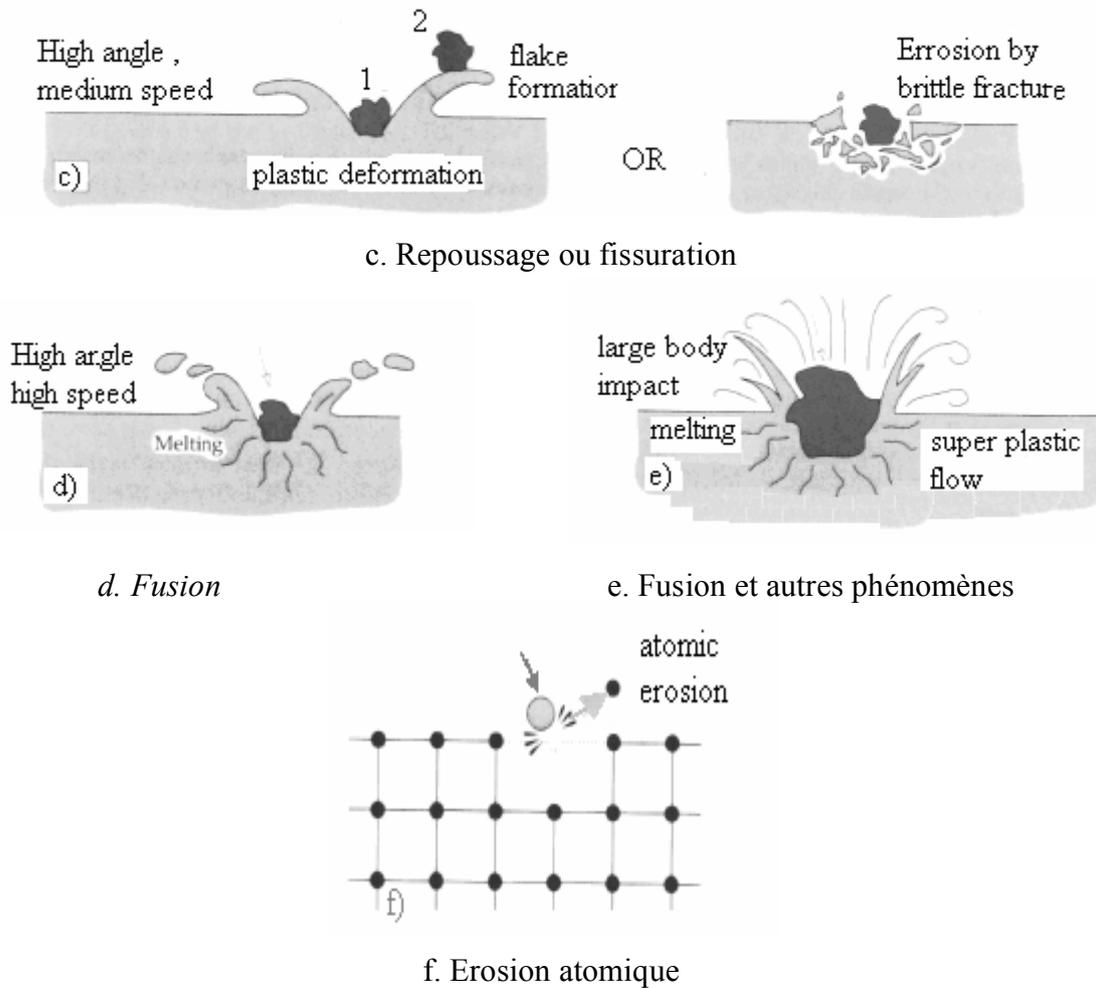


Figure I.7. Schémas des mécanismes d'usure par érosion : (a) découpe, (b) fatigue, (c) repoussage ou fissuration, (d) fusion, (e) fusion et autres phénomènes et (f) érosion atomique [4].

I.3.1.3. Usure par cavitation

La cavitation apparaît lorsque le liquide atteint, au voisinage d'une surface, sa pression de vapeur saturante. Il se crée alors une cavité ne pouvant rester stable dans le milieu. Elle implose donc et produit une onde de choc créant sur la surface des contraintes très élevées qui se traduisent souvent par l'apparition de faciès en forme de cratère.

I.3.2. Usure par fatigue et délamination

Le passage répété d'un solide sur des surfaces lisses ou rugueuses provoque la propagation de fissures par fatigue et, in fine, un arrachement de matière. Les fissures s'initient au niveau de défauts dans le matériau. Pour les métaux, [5] explique que les défauts initiateurs ne se situent pas en surface ou en extrême surface du matériau, car ils sont éliminés par l'action des efforts sur la surface. De plus, une couche d'oxyde aux propriétés mécaniques plus élevées protège la

surface. Ainsi les fissures se propagent dans un premier temps en sous – couche pour remonter ultérieurement à la surface et provoquer l'enlèvement d'un débris d'usure et de l'usure par délamination (Figure I.8).

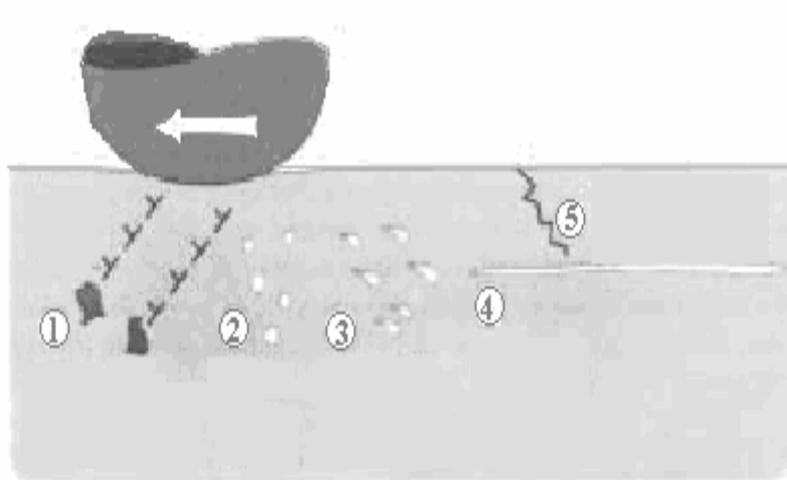


Figure I.8. Schéma des défauts provoquant l'usure par délamination (d'après [5]).

I.3.3. Usure adhésive

L'usure adhésive se caractérise par un fort taux d'usure et un coefficient de frottement instable. Les particules d'usure sont petites et souvent transférées sur l'autre solide en contact. Cette usure est due aux forces d'attraction existant entre les atomes des surfaces des solides. Lorsque les surfaces en contact sont séparées par un mouvement tangential ou normal, si les forces d'adhérence sont supérieures à la résistance du matériau, un arrachement de matière se produit (Figure I.9).

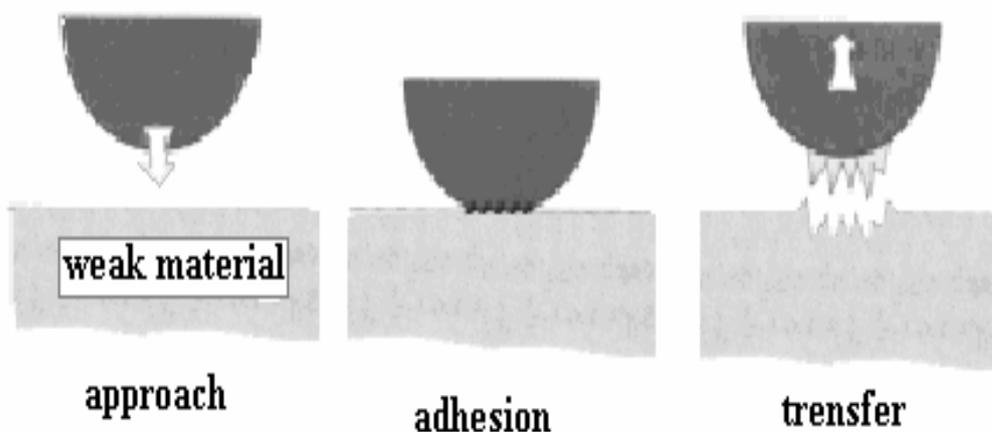


Figure I.9. Schéma de l'usure adhésive. Le matériau adhère à la surface antagoniste et lui arrache de la matière [5].

Il est possible d'estimer l'ordre de grandeur du diamètre moyen [6] des débris d'usure ainsi formés. Si deux matériaux, 1 et 2, adhèrent l'un à l'autre, (Figure 9) l'énergie à l'interface (Surface 12) est :

$$w_{12} = \frac{3.14d^2}{4} \cdot w_{12}$$

Où :

- d est le rayon de contact entre les deux solides ;
- w_{12} est l'énergie d'adhérence par unité de surface entre les deux solides en contact.

I.3.4. Autres types d'usure

I.3.4.1. Usure par soudage

Lorsque que deux solides sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, il se produit un échauffement dans le contact qui peut provoquer des soudures locales entre les matériaux en présence et engendrer de l'usure. Ce mécanisme est l'expression la plus sévère de l'usure adhésive.

I.3.4.2. Usure corrosive et oxydative

L'usure corrosive et oxydative sont dues à l'effet de réactions chimiques entre la surface usée et son milieu environnant.

I.3.4.3. Usure par fretting

Le fretting est un mouvement oscillatoire de faible amplitude qui peut se produire entre deux surfaces en contact [6]. Celui-ci engendre différentes formes de dégradation pouvant conduire à la perte de fonctionnalité. Le contact est souvent en glissement partiel, c'est-à-dire que les deux solides n'ont pas de mouvement relatif dans la partie centrale du contact, mais ils glissent sur un anneau en périphérie du contact [6]. Les cycles de sollicitation provoquent la fissuration des matériaux et la formation de débris qui peuvent accélérer l'usure lorsqu'ils restent confinés dans le contact.

I. 4. Modèles de lois d'usure

I.4.1. Modèle de TAYLOR généralisé

Taylor fut le premier à proposer en 1907, un modèle mathématique reliant la durée effective de coupe T d'un outil aux paramètres de coupe [6].

$$T = C \cdot V^n$$

V : Vitesse de coupe

T : Durée de Vie

n : Exposant de TAYLOR

C : Constante dépendant du couple outil/pièce.

Ce modèle est représenté par une droite dans un graphe à coordonnées logarithmiques :

$$\text{Log } T = n \cdot \log V + \log C$$

Gilbert (1950) a proposé la généralisation du modèle de Taylor. La constante C est remplacé par une expression qui tient compte de la géométrie de l'outil et du copeau.

$$T = K \cdot a^\alpha \cdot f^y \cdot v^r$$

K : dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné,

a : Profondeur de passe,

f : Avance,

x, y Exposants dépendant de la nuance de l'outil.

I.4.2. Modèle de COLDING

Ce modèle (1958-1960) [7] est construit à partir des polynômes de la forme:

$$K + a \cdot X + C \cdot Y - Z + K \cdot X \cdot Z = 0$$

$$\text{ou } K + aX + bX^2 + cY + dY^2 + cZ^2 - Z + f \cdot X \cdot Y + g \cdot Y \cdot Z + h \cdot X \cdot Z = 0$$

Avec $X = \log F$, $Y = \log V$ et $Z = \log T$.

La complexité de ce modèle et la difficulté d'obtenir toutes les constantes a, b, c, d, e, f, g, h, pour chaque cas le rendent très peu exploitable. Il rend pourtant compte des diverses particularités du phénomène de coupe, notamment de l'existence de valeur optimale de l'avance que les modèles plus simples ne laissent pas apparaître.

I.4.3. Modèles de KONING-DEPIEREUX (1969)

$$T = \exp(-\alpha \cdot V^\nu - \gamma \cdot a^u - \sigma \cdot f^\lambda) [7]$$

Ce modèle conduit à une représentation correcte de la loi d'usure et son type exponentiel est en accord avec les courbes expérimentales qui déterminent l'usure des outils.

I.4.4. Bilan des modèles d'usure :

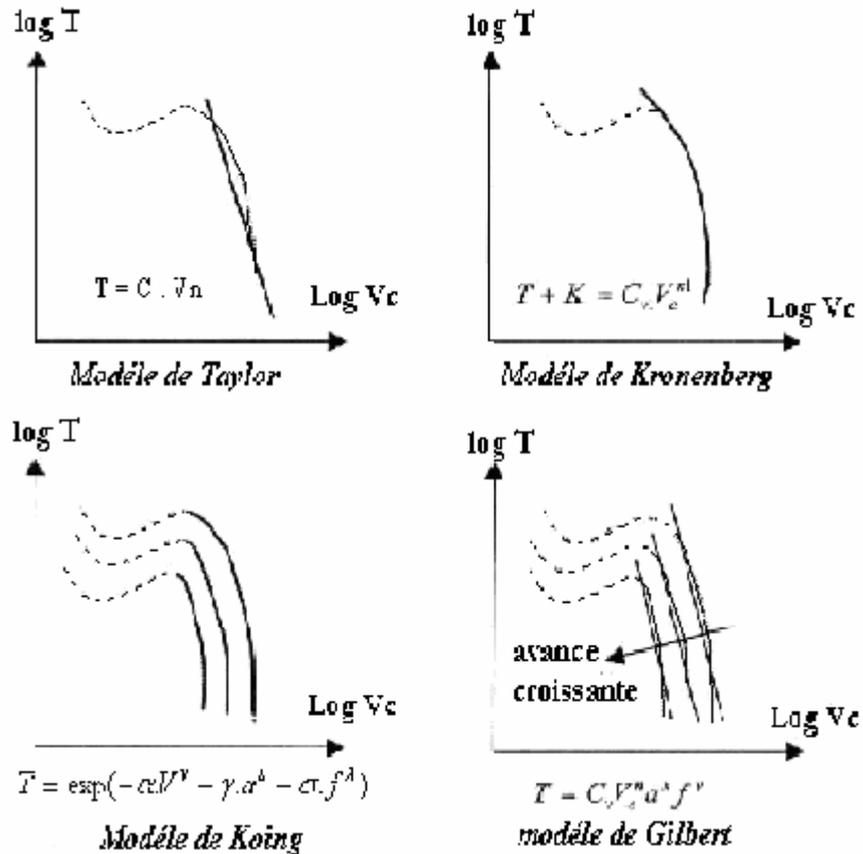


Fig.I.10. Représentation graphique des différents modèles.

Compte tenu des dispersions liées aux essais d'usure, le modèle simple de Taylor est suffisamment représentatif [7], il est couramment utilisé aujourd'hui pour tous les matériaux d'outils.

I.5. Conclusion

Les outils de coupe s'usent parce que les surfaces d'usure (face de coupe et de dépouille) de l'outil doivent supporter des charges normales élevées et parce que le copeau et la pièce appliquent ces chargements lors de mouvements relatifs sévères par rapport aux surfaces d'usure. Les actions de coupe et de frottement sur ces surfaces de contact augmentent la température du matériau d'outil, ce qui accélère l'usure physique et chimique de ce dernier. Pour enlever de la matière à la pièce, ces mouvements et ces forces sont nécessaires, donc l'usure de l'outil est un problème majeur qui se pose aux industries de la fabrication mécanique et en particulier lors de l'usinage des matériaux durs. Malheureusement il y a de nombreuses variables à considérer, il n'est donc pas surprenant que l'expertise de l'usure des outils et les décisions de changement d'outil soient des problèmes difficiles.

S'agissant d'un procédé de finition permettant d'obtenir des qualités proches de la rectification, le suivi de l'usure est primordial pour le respect des tolérances dimensionnelles, des états de surface, des tolérances géométriques. Par conséquent l'étude approfondie et continue de l'usure, notamment lors de l'usinage des aciers de hautes duretés, comme l'acier 42Cr Mo 4, avec des matériaux à outils de hautes performances est une tâche d'une grande importance économique et technologique en productique mécanique.

Chapitre II

Usure et traitement de surface pour outil de coupe

II.1. Introduction

La coupe de métaux, procédé d'usinage dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication. malgré l'apparition de nouvelles techniques au cours des dernières années, elle reste à l'heure actuelle l'un des procédés les plus largement utilisés. Pour se convaincre de son importance Économique, il suffit de considérer le volume de la dépense faite aux U.S.A. pour l'usinage des métaux. Il représente 5% du produit national brut, ce qui est énorme pour une seule technique[7][8].

Le choix des meilleures conditions d'usinage vis-à-vis de l'usure, que ce soit avec des vitesses conventionnelles ou à grande vitesse, consiste à trouver les conditions de coupe en tournage, en établissant un compromis entre la vitesse de coupe et la durée de vie des outils

La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure. Le coût de l'usinage, qui intéresse en définitive l'entreprise, est une conséquence de la tenue des outils à l'usure. Les méthodes pour la recherche des conditions opératoires d'un couple outil matière mettent en évidence la nécessité d'établir la capacité d'usinabilité avant tout autre mesure de ces caractéristiques.

La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure. L'importance de cette usure a une influence directe sur :

- ❖ la qualité et la précision dimensionnelle de la surface obtenue,
- ❖ la tenue de l'outil dans le temps,
- ❖ la puissance nécessaire à la coupe

La définition de la durée de vie T d'un outil selon la norme ISO 3685 : « C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique » [8].

Il faudra donc maîtriser cette durée de vie ainsi que son évolution par rapport aux paramètres d'usinage. Dans la pratique, on pourra ramener cette durée de vie à des éléments plus concrets sur le poste de travail comme :

- ❖ un volume de copeau produit entre deux changements d'arêtes,
- ❖ un nombre de pièces usinées entre deux changements d'arêtes,
- ❖ une longueur d'usinage entre deux changements d'arêtes.

L'analyse du mécanisme de la coupe montre l'importance des phénomènes de déformation plastique et de fissuration au sein du matériau usiné, mais aussi celle des phénomènes interfaciaux qui déterminent les actions réciproques de l'outil et du copeau.

Dans l'usinage des métaux, on constate que la forme géométrique et l'état physique de l'outil est modifié par l'action combinée des forces de coupe et par la température atteinte par le tranchant. Ces modifications qui augmentent progressivement avec la durée d'usinage, sont couramment regroupées sous le terme usure de l'outil [8].

II.2. Généralités Sur La Coupe Des Métaux

II.2.1. La définition de la coupe

Afin de mieux situer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux intervient dans un ensemble de procédés d'élaboration de pièces, par enlèvement de matière en quantités pouvant représenter une proportion notable du matériau brut. Cet enlèvement est alors réalisé par l'action d'un outil possédant un ou plusieurs tranchants de section convexe animé d'un mouvement relatif à la pièce appropriée. Une machine outil fournit à la fois la puissance mécanique nécessaire et réalise le contrôle du mouvement relatif. Cet ensemble constitue un système qui doit être considéré de plusieurs points de vue cinématique, dynamique.

En résumé, l'usinage par enlèvement de copeaux désigne l'ensemble des techniques commande,...etc. Dans ce premier chapitre nous considérons d'abord le phénomène central de la coupe.

Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leurs forme, adaptée à une Opération d'usinage, et leur matière. La partie active, le plus souvent amovible (alors appelée plaquette) est maintenue sur le corps d'outil par un moyen de fixation approprié.

Qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de matière à l'aide d'un outil tranchant.

II.3. Les Outils De Coupe

Le tournage des aciers durcis par trempe (tournage dur) nécessite l'utilisation de matériaux Coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à l'usure Et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de Cette technologie.

Les conditions optimales d'usinage pour un couple outil-matière donné ne sont pas faciles à déterminer. Elles doivent être établies par une série de tests rigoureux dans la suite et dans un premier temps, les matériaux des outils sont présentés pour une exploitation pour le tournage des matériaux durs.

II.3.1. Définition des outils

II.3.1.1. Les carbures métalliques frittés

II.3.1.1.1. Le carbure

Ils sont constitués essentiellement de carbure de tungstène (phase α), et de carbure de titane, de tantale ou de niobium (phase β), et d'un liant généralement le cobalt (phase β).

Le rôle de l'addition de carbure de titane, tantale ou niobium est d'augmenter les propriétés à haute température (vitesse de coupe élevée) en réduisant le frottement. C'est aussi de diminuer l'usure de la face de coupe en réduisant la diffusion du carbure de tungstène entre l'outil et le copeau. Mais l'accroissement de la proportion de carbure de titane entraîne une augmentation du coefficient de dilatation ce qui peut conduire à des variations dimensionnelles néfastes dans le cas d'usinage de précision.

Le carbure de tungstène, élément dur, donne une résistance à l'usure qu'il conserva à température élevée correspondant à des vitesses de coupe élevées. Le cobalt constituant le liant entre les grains de carbures frittés, donne la ténacité au corps fritté.

Les principales évolutions des outils de coupe à base de carbures ont porté sur [9]:

- Les nuances à micro grains,
- L'évolution des géométries,
- La généralisation des plaquettes indexables,

Certains carbures élaborés avec des grains ultrafins sont appelés "micro grains".

Ils sont caractérisés par une structure granulométrique très fine du carbure de tungstène comprise entre 0.2 et 1 μ m liée par une quantité de cobalt allant de 8 à 20%. Les nuances à micro grains permettent d'atteindre un compromis dureté/ténacité. Ils permettent ainsi d'utiliser des angles de coupe positifs. La faible dimension des grains permet une grande finesse d'arête pour obtenir des états de surface soignés. Ils sont utilisés à la fois pour des opérations de coupe sévères et pour l'usinage de matériaux difficiles à usiner.

Depuis le début de leur exploitation industrielle, la mise au point de géométries d'outils adaptées à chaque usinage spécifique, le passage de la coupe négative à la coupe

En outre, les outils sont également caractérisés par leur géométrie. Une partie de notre Travail a consisté à analyser les résultats fournis par tel ou tel type de géométrie.

positive diminuant les efforts de coupe et les usures des outils, la création de divers brise-copeaux augmentant le fractionnement de celui-ci et la durée de vie d'outil, ont permis de Faire progresser nettement les conditions d'usinage des aciers. La commercialisation de Plaquettes indexables affûtées de grande précision a conduit à de meilleurs états de surface et à une généralisation de l'utilisation des carbures métalliques frittés.

II.3.1.1.2. Le carbure revêtu

Les propriétés des nuances de carbure s non revêtues constituent un compromis entre Résistance à l'usure et ténacité. Ces qualités varient en sens inverse suivant le dosage des Constituants. Les carbures revêtus ont été mis au point dans le but d'associer une résistance à L'usure élevée à la surface des plaquettes et une forte ténacité du substrat.

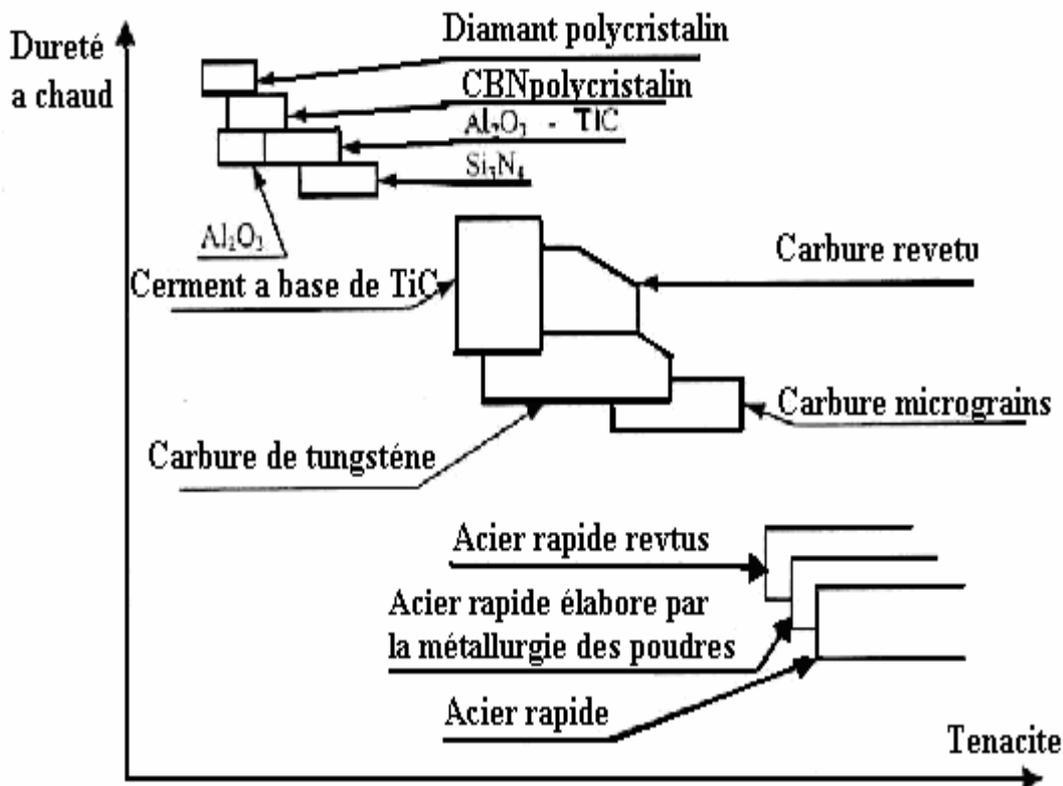


Fig. II.1. Comparaison des matériaux de coupe d'après [10].

Les matériaux déposés en revêtement sont très nombreux. Les plus courants sont :

Le Titane (Ti), le Nitrure de Titane (TiN) et l'Oxyde d'Aluminium (Al₂O₃) que l'on retrouve en monocouche ou combinés (Ti/TiN, TiC (carbure de titane), Al₂O₃/TiN) (Fig.II.2).

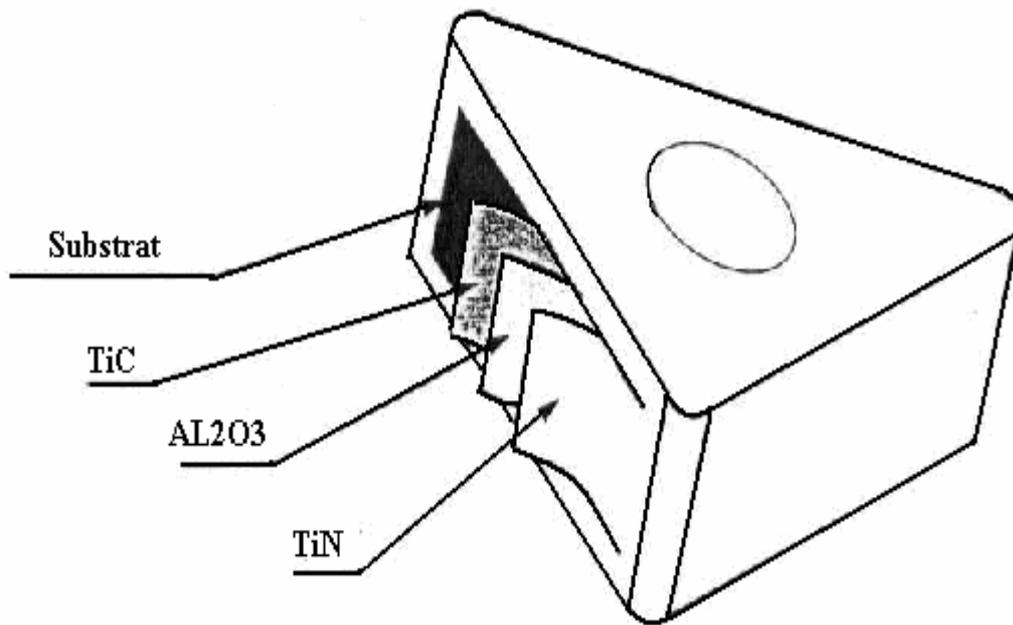


Fig.II.2. Plaquette carbure revêtue, multicouches d'après [10].

On peut retenir globalement que : le nitrure de titane (TiN) est réputé mieux résister à l'abrasion. Pour cette raison, il est souvent utilisé en couche externe. De plus, il tolère des dépôts plus épais sans nuire à sa tenue en service. Le TiN est inerte vis-à-vis des aciers et le coefficient de frottement du métal sur le revêtement TiN est plus faible, ce que minimise le risque de formation d'arête rapportée [10].

- le carbure de titane (TiC) adhère mieux aux substrats, constituant ainsi une excellente base d'application de couches de revêtement supplémentaires. Par contre, il est fragile et pour cela est déposé en couche n'excédant pas 5 μ m,

- l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) est déposé en couche intermédiaire comme barrière de Diffusion à la chaleur. Il conserve sa dureté à hautes températures, offrant une excellente résistance à l'usure, ainsi qu'une excellente protection contre la diffusion et l'oxydation à des vitesses et des températures de coupe très élevées. Un inconvénient majeur dans le cas des revêtements multicouches des plaquettes de finition est la perte de l'acuité d'arête. Pour cette raison, les métallurgistes ont mis au point des revêtements en couches minces de 1 à 2 μ m.

Les gains obtenus dans la coupe des métaux à l'aide de ces revêtements sont importants. Ces gains dépendent essentiellement du couple outil/matière. La caractérisation de l'usure des outils.

Cependant, pour caractériser l'influence du revêtement, nous précisons.

Dès maintenant que trois modes de détérioration peuvent intervenir [10] :

- Abrasion : Plus le revêtement est dur et moins ce mode d'endommagement peut intervenir. Les revêtements TiC et Al₂O₃ sont performants du point de vue abrasion,
- Diffusion (outil/copeau) : Ce mode d'endommagement est dans ce cas nettement Plus important pour TiC, soluble dans l'austénite à partir de 1100 - 1150°C que pour TiN et Al₂O₃ tous deux insolubles dans les aciers même liquides,
- Fissuration et écaillage : La détérioration s'effectue par fissuration du revêtement Soumis à de fortes contraintes d'origine thermique entraînant des micro écaillages (Sur l'arête ou sur les flancs) puis une usure contrôlée par diffusion et abrasion ainsi, une couche extérieure de TiN semble aujourd'hui conduire aux meilleurs résultats lors Du tournage des aciers inoxydables. L'usure par effets physico-chimiques est très réduite.

II.3.2. Texture de la surface

II.3.2.1. Définitions des critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (fig. II.3) [11]:

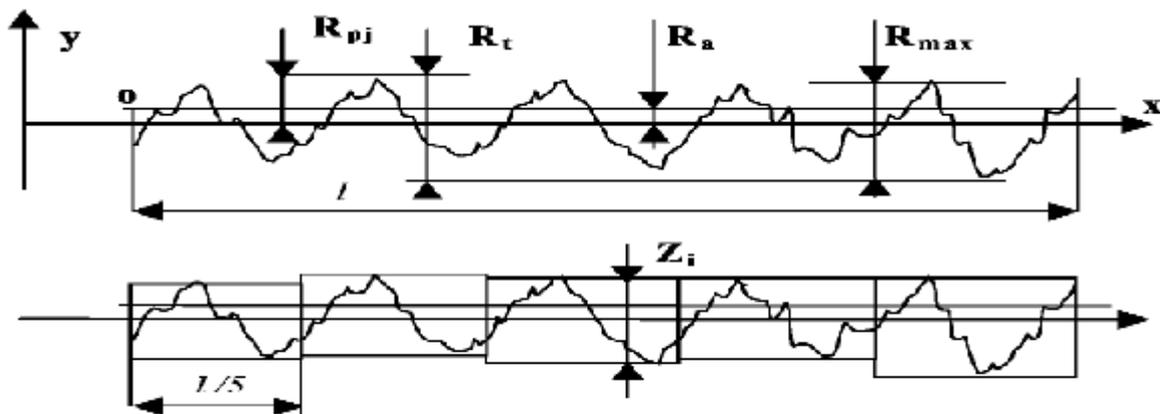


Fig. II.3. Paramètre de rugosité [11].

Soit OX la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^l y \, dx = 0 \dots\dots\dots (II.1)$$

Où l est la longueur de palpement.

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne, Soit.

Rugosité moyenne arithmétique Ra représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à ox :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \dots\dots\dots (II.2)$$

Rugosité moyenne quadratique Rq. Ce critère (non normalisé en France) représente l'écart moyen quadratique par rapport à ox :

$$Rq = \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (II.3)$$

Rugosité max. Rmax, elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité

Rugosité totale Rt représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur de palpée l.

Rugosité Rz, représente la rugosité totale moyenne.

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_1^5 Z_l \dots\dots\dots (II.4)$$

II .4 . Endommagement des outils de coupe

II.4.1. Généralité

La connaissance des mécanismes d'endommagement est un aspect très important de la coupe des métaux car l'usure des outils participe pour une grande part dans le coût des opérations d'usinage. Le changement de la géométrie des outils, corollaire de l'usure, modifie les conditions de coupe et par conséquent détériore la qualité de l'usinage. L'usure peut avoir des origines mécaniques (abrasion, attrition) ou bien peut être chimiquement activée (usure par diffusion) et chaque mécanisme d'endommagement agit sur l'outil à des niveaux différents selon les conditions spécifiques de l'usinage. La prédominance d'un des mécanismes ou l'effet combiné de plusieurs d'entre eux dépend à la fois du type d'opération d'usinage, des

conditions de coupe et des propriétés physico-chimiques des matériaux mis en jeu. Les phénomènes tribologiques aux interfaces contrôlent alors la nature et la sévérité des usures. Par exemple, quand la température à l'interface outil-copeau atteint des valeurs élevées, l'adhésion et l'abrasion font généralement place aux phénomènes.

L'usure de l'outil découle des sollicitations sévères que subit le tranchant à l'interface outil - copeau. Celles-ci sont d'abord de nature mécanique. Il s'agit de contraintes permanentes ou cycliques et d'actions de frottement en surface. Ceci exige pour l'outil des qualités de dureté et de ténacité remarquables.

Les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et, corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, se traduisent par des modifications d'aspect visibles l'œil nu ou à l'aide d'un microscope. Ces manifestations macroscopiques permettent d'apprécier objectivement l'évolution de l'usure en fonction de divers paramètres géométriques mesurables.

Cette usure se manifeste sous plusieurs formes, dont les principales sont : l'usure en dépouille, l'usure en cratère et la fissuration de l'arête coupante suivie par la chute partielle ou totale de l'arête même. [11]

II.4.2. Influence des paramètres de coupe sur l'usure

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification) :

- Vitesse de coupe : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure,
- Avance : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil,
- Profondeur de passe : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure.
- Matériau usiné : son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition),

- Lubrification : son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil.

Le second groupe est formé par les paramètres physiques et mécaniques de l'outil (géométrie et composition du matériau de l'outil, dureté, efforts et propriétés thermiques). Des chercheurs comme [11] et [12] ont observé que les différents mécanismes de l'usure interviennent pour différentes plages de vitesse. L'usure par abrasion est la plus forte à basse vitesse, mais lorsque la vitesse augmente, l'usure adhésive devient de plus en plus dominante et l'effet d'abrasion diminue ou disparaît. La température est une fonction de la vitesse, l'excès de chaleur catalyse le phénomène d'usure. Diminuer la chaleur dans le système d'usinage est une méthode naturelle pour contrôler la vitesse et le niveau d'usure.

Comme les propriétés thermiques sont supposées constantes, la seule manière de changer les conditions thermiques est d'agir par des moyens extérieurs au système.

II.4.3. Formes d'usure

L'étude détaillée du phénomène d'usure [12] révèle différentes formes : l'usure par effets mécaniques et l'usure par effets physico-chimiques.

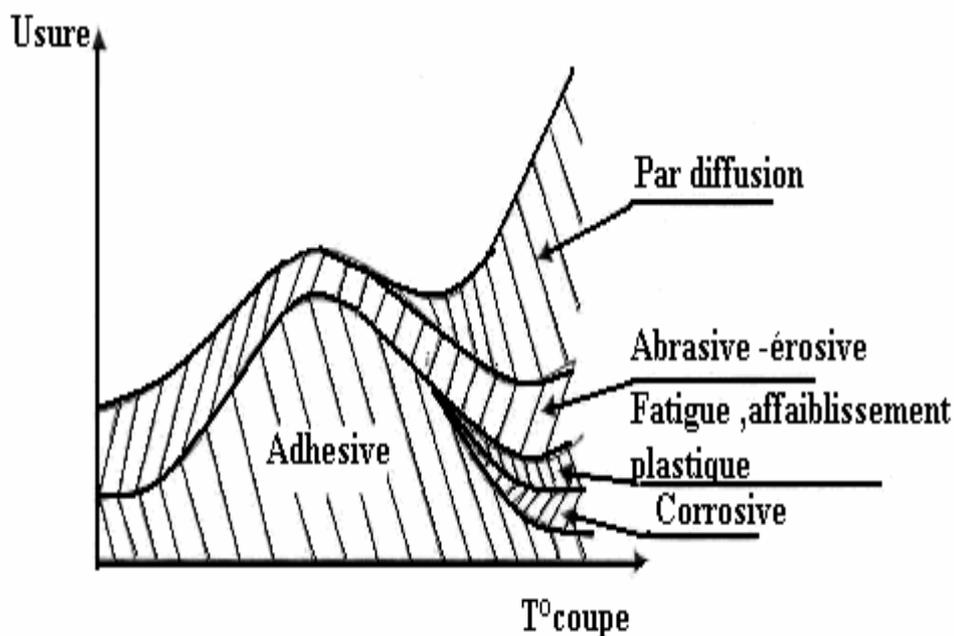


Fig. II.4. Usure présentée comme une fonction de la température [12].

Le frottement copeau outil donne lieu à des phénomènes de grippage et d'arrachement, ce qui correspond à l'usure adhésive. A partir d'une certaine vitesse, donc d'une certaine température correspondant à l'apparition d'une couche de glissement facile et d'une arête rapportée, l'usure adhésive devient moins importante et se traduit par un changement de pente sur la courbe. Si l'on augmente la vitesse de coupe, le mécanisme d'usure par diffusion entre alors en jeu. Avec l'intensification des effets thermiques, il peut apparaître une usure par effet d'oxydation, l'amélioration relative apportée par l'apparition de la couche de glissement facile se trouve alors neutralisée. Si l'on augmente encore la vitesse, l'usure par diffusion croît de façon très importante.

L'observation de la partie active de l'outil fait apparaître des formes d'usure caractéristiques qui correspondent aux conditions dans lesquelles l'outil travaille.

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent essentiellement de la nature de l'outil, du matériau usiné, des conditions de coupe et du type d'usinage. De manière habituelle, pour des outils usuels, les formes suivantes sont décrites.

II.4.4. L'usure en dépouille ou usure frontale

Elle est due au frottement de la pièce sur la face en dépouille de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête, et elle est caractérisée par la largeur moyenne de cette bande VB (fig.II.5).

Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer, puisqu'elle détermine la précision dimensionnelle et l'état de surface de la pièce usinée [13].

II.4.5. La cratérisation de la face d'attaque

Elle est caractérisée par une cuvette formée sur la face d'attaque de l'outil par frottement du copeau. Au cours de l'usure, les dimensions et la profondeur KT de même que la position du cratère évoluent et influent en particulier sur le rayon d'enroulement du copeau ; le flanc arrière du cratère pouvant jouer le rôle d'une brise copeau na turel [13].

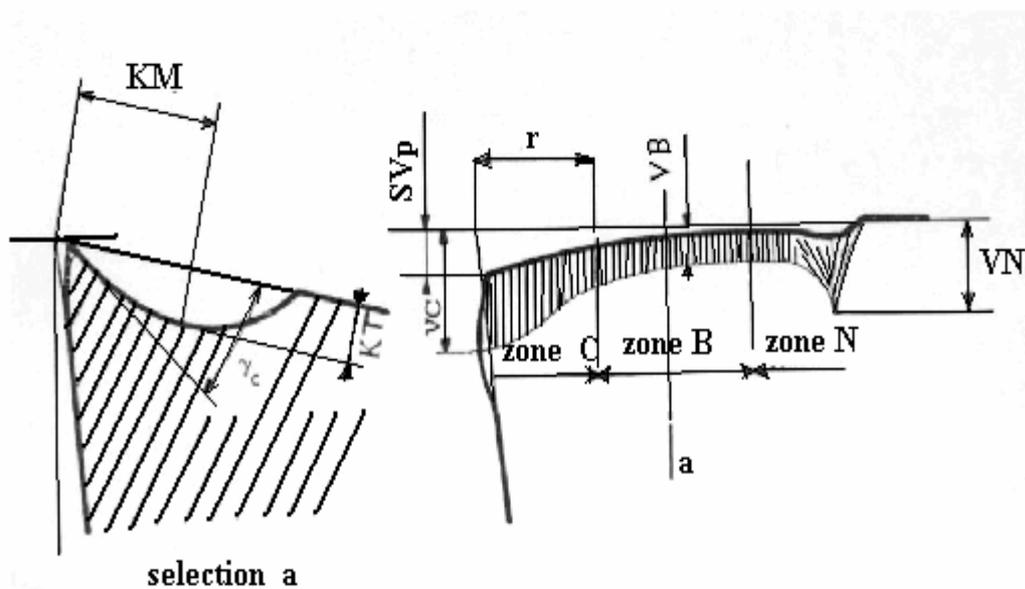


Fig.II.5. Formes d'usure des outils de coupe [13].

Cette forme d'usure est due à l'existence de températures élevées au contact copeau- outil provoquant une diffusion importante. Elle se manifeste en particulier avec des outils carbures et céramiques. La forme du cratère peut être définie par sa profondeur maximale KT , le rapport de cratérisation KT/KM et par l'angle de cratérisation

II.4.6. Déformation plastique

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions régnant dans la zone de coupe. On rencontre en particulier ce type d'usure dans l'utilisation des outils de carbures lors d'usinage des matériaux à hautes résistances mécaniques ou à faible usinabilité.

Cette déformation se traduit par un affaissement plastique de la pointe de l'outil caractérisé par la valeur de la flèche SV_p , et par un renflement sur les faces en contre dépouille (Fig.II.5). Il s'en suit une modification importante de la géométrie de la pointe de l'outil qui nuit à la précision et à l'état de la surface usinée.

L'affaissement plastique entraîne une usure frontale vers la pointe de l'outil (zone C, fig.II.5) de valeur VC généralement supérieure à la valeur VB dans la zone centrale B, et, une déformation importante du cratère. Celui-ci présente alors une profondeur maximale au niveau de l'arête secondaire de l'outil [13].

II.4.7. Entaille

Pour certains outils, et dans certaines conditions de coupe, il se produit une entaille sur l'arête tranchante, à la hauteur du diamètre périphérique d de la pièce. Ce phénomène est dû au mode d'évacuation de l'arête rapportée. Au niveau de cette entaille, les conditions de coupe devenant mauvaises, le refoulement de matière sur la périphérie de la pièce provoque une auto accélération du phénomène. L'entaille peut alors atteindre une valeur V_N (fig. II.5) importante par rapport à la valeur V_B de la largeur de bande d'usure frontale, et affaiblir considérablement le bec de l'outil [13].

II.4.8. Rupture par cassure en pointe

Cette rupture est couramment observée dans le cas des outils en acier rapide (Fig.II.4).

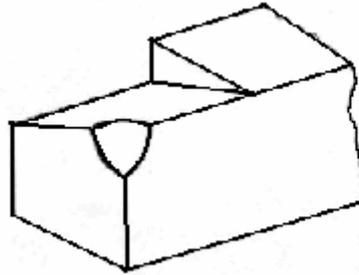


Fig.II.6. Rupture par cassure en pointe [13].

II.4.9. Ebréchures et fissuration d'arête

Dans le cas des usinages avec chocs, mécaniques ou thermiques, ou avec des variations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures et d'ébréchures sur l'arête de coupe qui diminuent considérablement la vie de l'outil. Cette forme d'usure se manifeste dans le cas de l'usinage des alliages réfractaires (Fig.II.7).

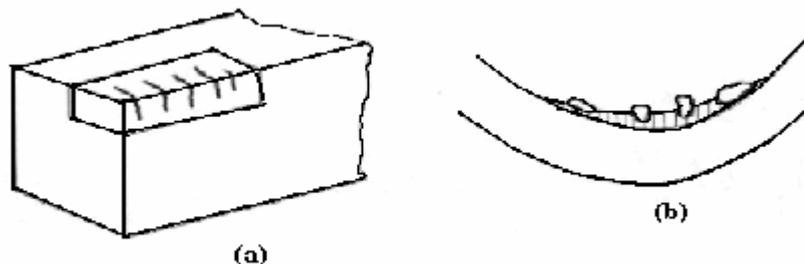


Fig.II.7. (a) fissuration d'arête (b) ébréchure d'arête [13].

II.4.10. Les mécanismes d'usure des outils

Certains auteurs [14] ont pris en compte les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et, corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, qui se traduisent par certaines modifications d'aspect de celui-ci, visibles à l'oeil nu ou à l'aide d'une loupe de forte puissance. Ces manifestations macroscopiques permettent d'apprécier objectivement l'évolution de l'usure en fonction de divers paramètres géométriques mesurables.

L'évolution de l'usure peut se faire par la mesure de la perte de masse en fonction de temps. D'après la figure II.8, on observe l'existence d'un régime transitoire suivi d'un régime stabilisé.

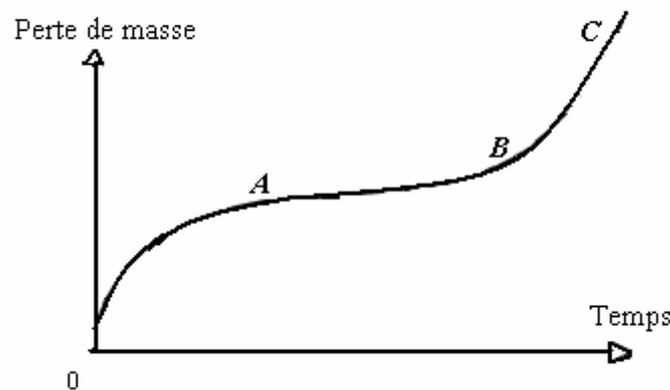


Fig.II.8. Perte de masse en fonction du temps [14].

Le régime transitoire OA est caractérisé par une croissance rapide de la perte de masse (appelé rodage) et le régime stationnaire AB par une croissance plus lente et plus régulière pratiquement linéaire. La période BC correspond à la destruction rapide de l'outil.

Lorsqu'un problème d'usinabilité est constaté, il est nécessaire de bien observer l'endommagement de l'outil. Ces différentes formes d'endommagement font intervenir, à des degrés plus ou moins importants, les mécanismes suivants :

II.4.11. Usure par adhésion

Sous l'effet de la pression, de véritables soudures se créent entre l'outil et le copeau par écrasement/entrelacement des aspérités ou par des phénomènes d'adsorption et de solubilité s'il existe une affinité chimique entre les atomes qui constituent les deux surfaces

Les surfaces de l'outil et du copeau ont une micro géométrie qui comporte des aspérités. Compte tenu des efforts de coupe imposés, des jonctions métalliques, véritables microsoudures se forment.

DP : Déformation plastique.

DE : Déformation élastique

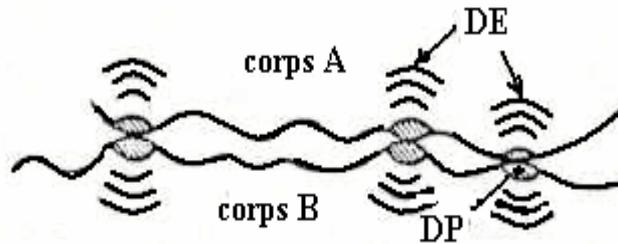


Fig.II.9. Contact de deux corps métalliques [14].

Celles-ci sont rompues en continu puisqu'il y a mouvement relatif du copeau et de l'outil :

- ✓ Si les jonctions sont plus résistantes que le métal voisin du copeau, les ruptures se produisent dans la masse du copeau et des fragments du copeau viennent adhérer sur l'outil, ce qui constitue une arête rapportée,
- ✓ Si les jonctions sont à la fois plus résistantes que le métal voisin du copeau et que la surface du matériau d'outil, les ruptures se produisent en majorité dans la masse du copeau et pour quelques unes à la surface de l'outil.

Lorsque les jonctions formées se rompent, des fragments de matière provenant du copeau restent accrochés sur la face de coupe de l'outil. Dans certaines conditions, notamment à faible vitesse de coupe, les éléments du copeau qui ont tendance à coller s'accumulent de manière importante pour former un dépôt macroscopique (Figure II.10 (a)) que l'on appelle arête rapportée. Comme l'arête rapportée a tendance à grossir, elle devient instable et finit par se briser. Une partie de la matière est emportée par le copeau, le reste peut passer sous l'arête de coupe et coller à la surface de la pièce. Le processus de formation et de destruction de l'arête rapportée peut se répéter plusieurs fois au cours d'un usinage causant une variation périodique de l'avance et de l'angle de coupe. Il en résulte une modification importante des dimensions souhaitées du produit fini et une détérioration de son état de surface.

L'usure par adhésion dépend de la pression appliquée au contact outil-copeau et par conséquent des caractéristiques de dureté et d'érouissabilité du matériau usiné, de l'épaisseur du copeau et de la rigidité de la liaison outil-pièce. L'usure par adhésion dépend aussi de la vitesse de coupe. Un accroissement de vitesse de coupe provoque une moindre résistance à l'écrasement du copeau mais aussi une moindre résistance au cisaillement des jonctions établies.

On observe d'après Opitz, König, Vleregge [15] que l'usure croit avec la vitesse de coupe V_c , passe par un maximum puis décroît. L'usure par adhésion mécanique est caractéristique des usinages à vitesse de coupe modeste ($V_c < 50$ m/min).

Le mécanisme d'arêtes rapportées est d'une grande importance pratique. Lorsque les éléments du copeau ont tendance à venir coller sur l'outil, l'amas constitué peut avoir une géométrie de type pédoncule (Fig.II.8) il en résulte une modification des cotes de la pièce usinée et l'état de surface.

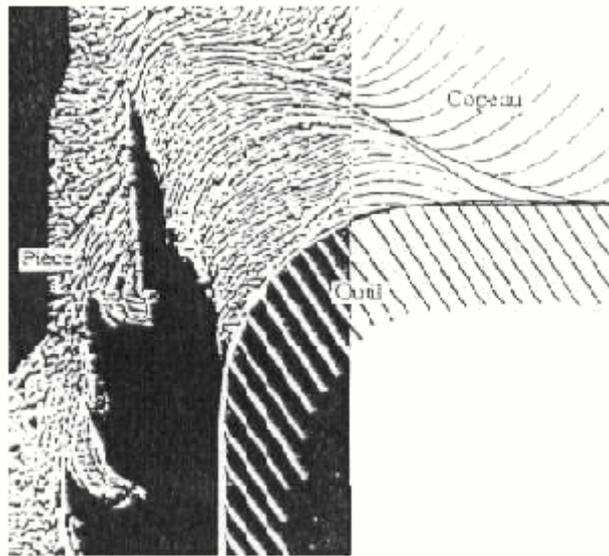


Fig.II.10. Arête rapportée d'après [15].

L'arête rapportée est partiellement évacuée périodiquement, ce qui provoque des variations d'avance effectives.

L'évacuation des fragments de copeaux adhérents ou de l'arête rapportée peut s'accompagner d'arrachement d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt, ce phénomène d'usure est appelé attrition. Il est encore plus néfaste vers la fin de l'usinage au moment où l'outil se désengage de la pièce et l'arête rapportée expulsée.

Le mécanisme de formation d'arête rapportée est encore mal connu, mais il est généralement associé au phénomène d'érouissage de la matière qui semble être prédominant dans la formation du copeau aux faibles vitesses de coupe. L'utilisation de vitesses de coupe suffisamment élevées permet souvent de limiter l'apparition de l'arête rapportée (Figure : II.12 (b)).

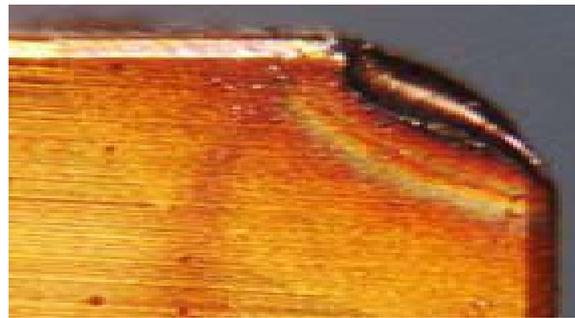


Fig.II.11 Phase d'usure par adhésion [16].

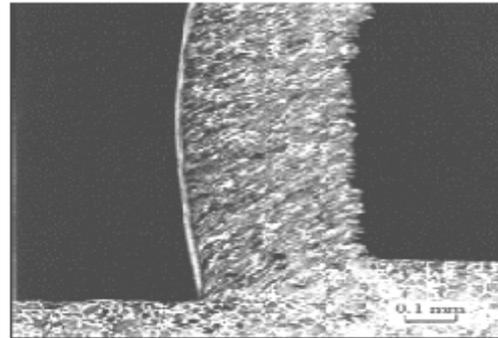
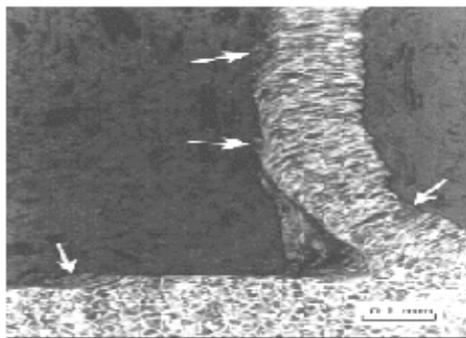


Fig. II.12. Coupe orthogonale d'acier (a) $V_c=0,5$ m/s, $f=0,2$ mm/tr (les flèches blanches indiquent les dépôts de matière laissés sur la pièce après l'évacuation de l'arête rapportée) - (b) $V_c=2$ m/s, $f=0,2$ mm/tr [16].

II.4.12. Usure par abrasion

L'usure abrasive des outils de coupe résulte de l'arrachement sur leur surface de micro copeaux produits par des particules souvent anguleuses et de grandes duretés qui peuvent être contenues dans le matériau usiné (inclusions). Les particules sont toujours renouvelées. Les produits d'abrasion sont éliminés en continu avec les copeaux [16].

La vitesse d'usure abrasive croît avec la quantité de particules abrasives qui entrent en contact avec l'outil par unité de temps. Elle croît donc avec la vitesse de coupe.

L'usure par abrasion se caractérise par la formation de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou dans la direction du copeau qui glisse le long de la face de coupe. L'usure par abrasion apparaît donc à la fois sur la face de coupe (Figure :

II.15 (a)) et sur la face de dépouille des outils (Figure : II.15 (b)). Ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure. Elles peuvent être présentes dans la pièce sous la forme d'inclusions et de précipités ou provenir de l'outil lui-même par d'autres mécanismes d'usure telle que l'adhésion. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage. L'usure par abrasion est l'usure dominante quand le contact à l'interface outil-copeau est essentiellement du glissement.

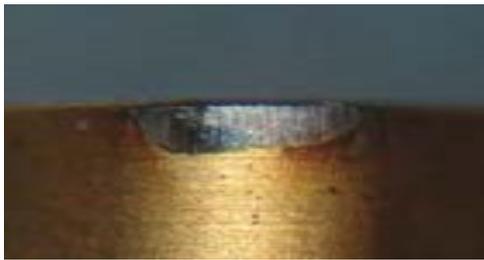


Fig.II.13. Début de l'usure par abrasion [16]

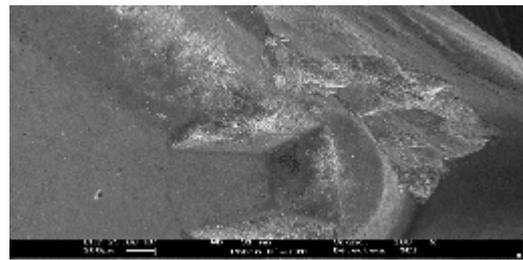


Fig. II.14. Durée de coupe T= 500min [16].

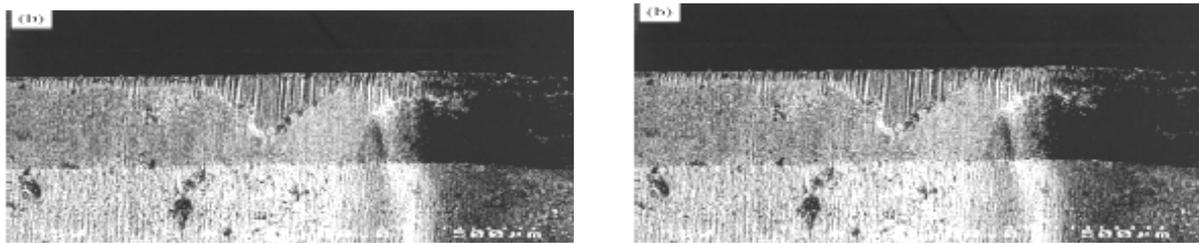


Fig. II.15. Usure par abrasion (a) sur la face de coupe après usinage d'alliage de titane, et (b) sur la face de dépouille après usinage de [16].

II.4.13. Usure par diffusion

Aux grandes vitesses de coupe, le gradient de températures à l'interface copeau/outil est particulièrement important. Une couche de glissement facile, se constitue avec fluage du matériau du copeau. La vitesse de diffusion éventuelle d'un élément d'alliage de l'outil dans le copeau est très grande en raison des températures atteintes, d'autant plus que cet élément est absent du matériau usiné.

Comme il y a renouvellement continu du copeau, la "demande" en élément diffusant reste constante au cours de l'opération.

Les phénomènes de diffusion prédominent. Sous l'effet de la température et de la pression, les atomes diffusent de l'outil vers le copeau ou vice-versa.

Dans le cas des aciers, l'usure par diffusion a été expérimentalement mise en évidence par l'existence de gradients de concentration des différents éléments de l'outil dans les copeaux et

par l'observation de la formation rapide d'un cratère sur la face de coupe de l'outil [12,16]. Explique la dégradation des outils WC-Co pendant l'usinage d'un acier Armco par diffusion mutuelle du cobalt et du carbone de l'outil et du fer de la pièce usinée (Figure II.16 (a)). Le cobalt migrant vers le copeau change le potentiel chimique du carbone dans l'austénite et vient se localiser à l'interface pour former un nouveau carbure dispersé ($Fe_xCo_yW_z$) C aux dépens des carbures initiaux WC. La couche intermétallique formée, de petites fissures sont amorcées sous la forte pression exercée à la surface de l'outil.

L'écoulement continu du copeau sur la surface de l'outil s'accompagne alors d'une décohésion des grains de carbures les plus superficiels. La couche d'alliage métallique ($Fe_xCo_yW_z$) C et des grains en WC de l'outil est ainsi évacuée avec le copeau créant un cratère sur la face de coupe de l'outil.

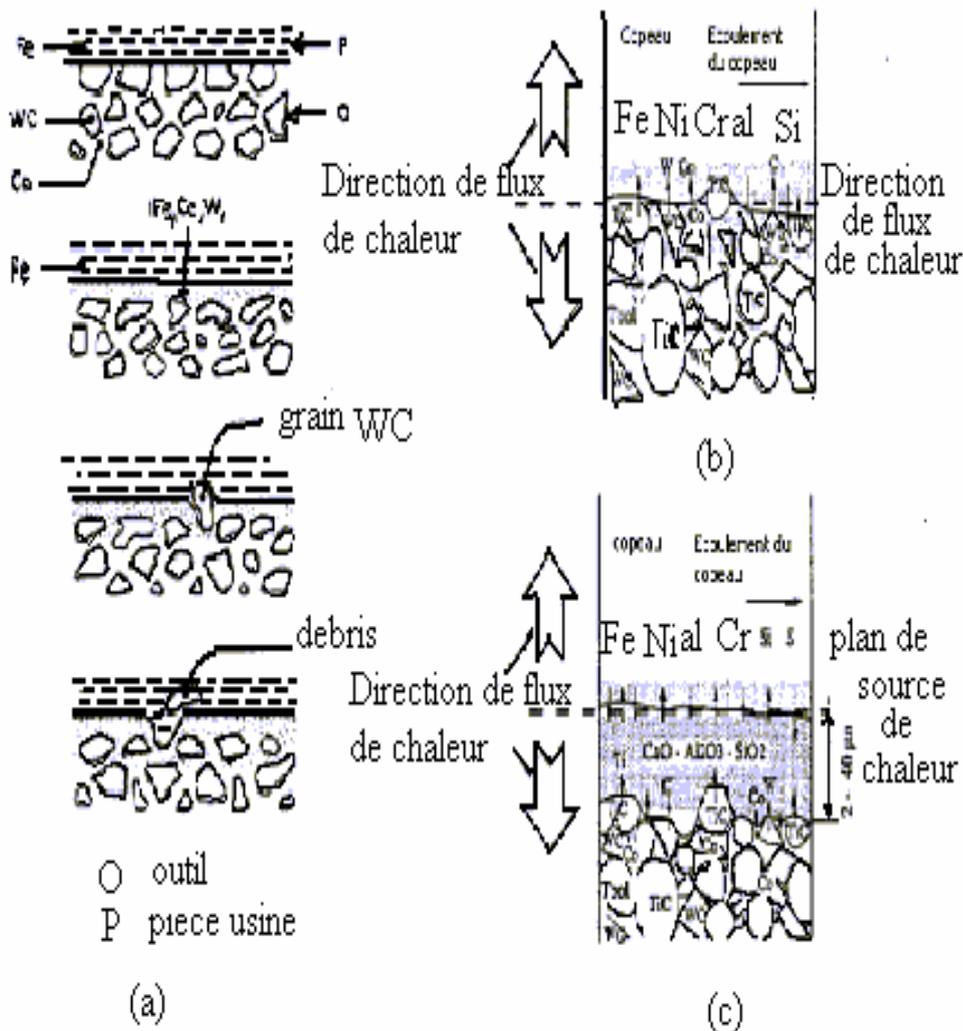


Fig. II.16. Mécanismes d'usure par diffusion : (a) Représentation schématique des différents stades de l'usure d'un outil carbure, (b) Modèle dynamique de diffusion, et (c) Modèle quasi-statique. [17].

Il existe une relation directe entre la forme du cratère et la distribution de la température à l'interface outil-copeau. L'observation d'un cratère formé par diffusion montre que celui-ci n'apparaît qu'à une certaine distance de la pointe de l'outil, là où la température atteint ses plus hautes valeurs (figure : II.17). Les avis divergent cependant quant à l'influence de celle-ci sur la forme du cratère. Par exemple, selon Gekonde, la profondeur maximale du cratère coïncide avec la température de transformation de phase de l'acier usiné, tandis que pour Molinari, elle est localisée là où le maximum de la température est atteint.

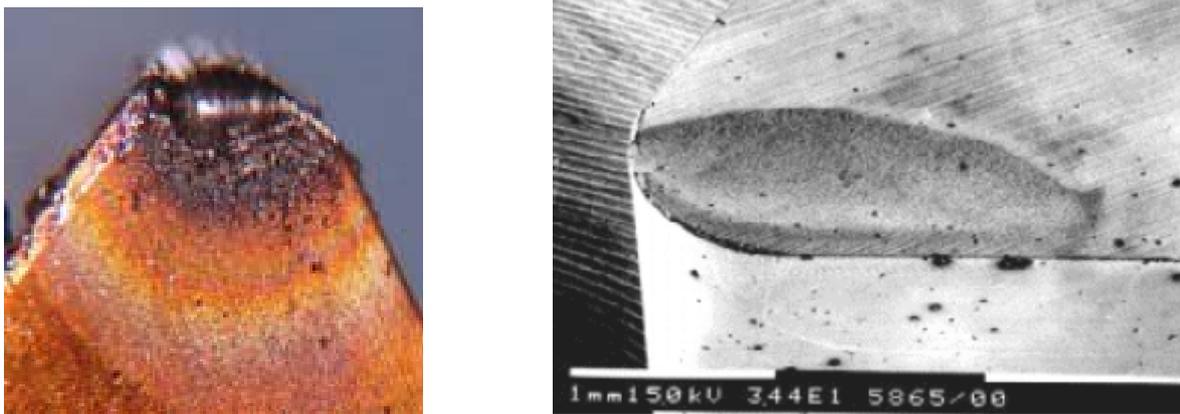


Fig. II.17. Cratère formé par usure par diffusion sur une plaquette carbure après [17] secondes d'usinage d'un acier 42 Cr Mo 4 avec une vitesse de coupe de 300 m/min.



Fig. II.18. Face de dépouille [17].



Fig.II.19. Face de coupe [17].

Les modes d'usure décrits précédemment (Figures : II.16 (a) et II.16 (b)) sont contrôlés par des mécanismes de diffusion dynamique car il y a renouvellement permanent de la matière du copeau en contact avec la surface de coupe, l'alimentation en éléments diffusants restant donc constante durant l'opération. Il arrive qu'une couche adhésive se forme sur la face de coupe, le copeau et l'outil ne sont alors plus directement en contact. Dans ce cas, les mécanismes de diffusion passent d'un processus dynamique à un processus statique. C'est le cas par exemple

des aciers inoxydables traités au calcium usinés à l'aide d'outils WC-Co Tic. La présence d'inclusions conduit à la formation d'une couche stable d'une épaisseur variant de 2 à 40 μm de couleur dorée essentiellement composée de $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ et de quelques éléments de l'outil provenant du mécanisme de diffusion quasi-statique illustré par la figure II.16 (c) . La formation de couche de transfert peut être recherchée dans certains cas puisqu'elle peut constituer une barrière de diffusion et ainsi limiter la formation du cratère.

II.4.14. Usure par fluage et oxydation

Pour des vitesses de coupe qui dépassent les vitesses normales d'emploi de l'outil, sa géométrie peut encore être endommagée par fluage ou oxydation.

Pour le fluage, l'outil est soumis sur sa face d'attaque à des contraintes normales de compression maximales sur l'arête de coupe. Elle peut s'écraser compte tenu de la distribution des températures. On peut obtenir un cisaillement caractéristique avec un bourrelet à l'arrière (Fig.II.5).

L'outil peut s'oxyder à l'air ambiant, en raison des températures atteintes, en particulier dans les zones bien aérées au voisinage de la zone de coupe proprement dite.

Ces deux mécanismes croissent avec la vitesse de coupe (Fig.II.1). Ils n'interviennent que dans des conditions de travail anormales en usinage conventionnel mais leur présence en UGV et en TD doit être étudiée [18].

II.4.15. Usure avec effets de chocs

L'écaillage des faces de l'outil peut résulter d'une certaine fragilité ou de fatigue mécanique et thermique.

Pour une rupture fragile, un tel endommagement apparaît dans les premiers instants de coupe. La fatigue mécanique entraîne la rupture sous l'effet de variation de sollicitations dues au mode d'usinage (coupe discontinue), à la géométrie des pièces (faux rond, rainure, ...), ou encore à la structure du métal usiné (calamine, tôle oxycoupée ...).

Les chocs thermiques supportés par les outils sont très sévères soit pendant les arrêts de coupe soit par le refroidissement dû à un arrosage discontinu. . La température décroît très vite en surface et plus lentement dans le cœur. La surface de l'outil est mise en traction et des fissures thermiques peuvent apparaître.

Les outils céramiques sont très sensibles à ces phénomènes d'endommagement [18].

II.5. Critères d'usure

Les critères usuellement utilisés pour des outils en carbures et, notamment, ceux recommandés par la norme en vigueur concernant l'usure des outils de coupe la norme, NFE 66 505, se rangent en deux catégories décrites ci-dessous [18].

II.5.1. Les critères directs

Ils sont basés sur l'évolution de l'usure (fig. II.5), tels que [18]:

- Critère d'usure frontale, caractérisé par une largeur limite VB limite de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil,
- Critère de cratérisation, défini par la valeur limite de la profondeur du cratère KT limite, ou par la valeur limite du rapport de cratérisation KT/KM, ou par une valeur limite de l'angle de cratérisation.
- Critère de "mort d'outil", utilisé principalement pour les outils en acier rapide,
- Critère d'usure volumétrique ou massique caractérisé par la perte en poids de l'outil, mesurée par pesée ou à l'aide de traceurs radioactifs,
- Critère basé sur les variations de cotes des surfaces usinées, actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers.

II.5.2. Les critères indirects :

Ils sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil. Par exemple :

- Les efforts et le travail spécifique de coupe,
- La rugosité de la surface usinée,
- La température à la pointe de l'outil.

II.6. Point de vue pratique :

D'un point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer puisque elle détermine l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle. Dans le cas des outils en acier rapide, les mesures de l'usure frontale présentent une dispersion importante due principalement à l'hétérogénéité des aciers à outils et de la matière usinée et à la présence d'une zone morte au voisinage du bec, qui se traduit par l'apparition d'une arête qui protège la face en dépouille dans certains cas.

Par contre, l'expérience montre que l'évolution de l'usure des outils à plaquette carbure, qui permettent des vitesses de coupe plus élevées, peut être définie de façon satisfaisante par la seule mesure de l'usure frontale, dans une large plage des paramètres de coupe.

Pour des paramètres de coupe élevés (provoquant une élévation de température entre outil et copeau) l'usure par diffusion s'accélère ce qui favorise une évolution rapide de la cratérisation.

La durée de vie d'un outil en carbure ou en céramique correspond à la durée au bout de laquelle on atteint une usure maximale admissible selon le mode d'usinage.

Les critères directs les plus utilisés sont ceux de l'usure en dépouille limite VB max et l'usure en cratère limite KT max. On peut aussi rencontrer des critères indirects qui seront considérés dans cette étude et qui sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil. Nous retiendrons également les efforts et la rugosité de la surface usinée pour notre étude sur le tournage d'un acier dur avec des plaquettes CBN.

Pour des usinages courants en mécanique générale ou en outillage, les limites acceptables pour l'usure en dépouille et l'usure en cratère selon la norme NF E 66 505 sont les suivantes [18]:

- Une largeur moyenne de la bande d'usure frontale de 0,3 mm si elle est uniforme, ou une largeur maximale $VB = 0.5$ mm, (fig.III.5),
- Une profondeur maximale du cratère égale à: $KT = (0.1 + 0.3 f)$ mm.

II.7. Etude des revêtements durs

II.7.1. Introduction

Dans cette partie notre travail est dédié aux techniques d'amélioration de la tenue à l'usure des outils de coupe.

Les techniques pour l'amélioration des caractéristiques des outils coupants sont nombreuses, on se limitera à l'étude de certaines méthodes qui se résument par les techniques de revêtements en matériaux durs et aussi par des traitements structuraux et superficiels des outils destinés à enlever la matière.

En premier lieu une étude sur les matériaux durs a été faite, suivie d'une étude sur les techniques et moyens d'élaboration des revêtements durs.

II.7.2. Classification des matériaux durs

Les matériaux possédant une dureté élevée et susceptibles d'être utilisés comme revêtements ont été classés par [19] en fonction de la nature de leur liaison chimique, comme le montre la figure : II.20.

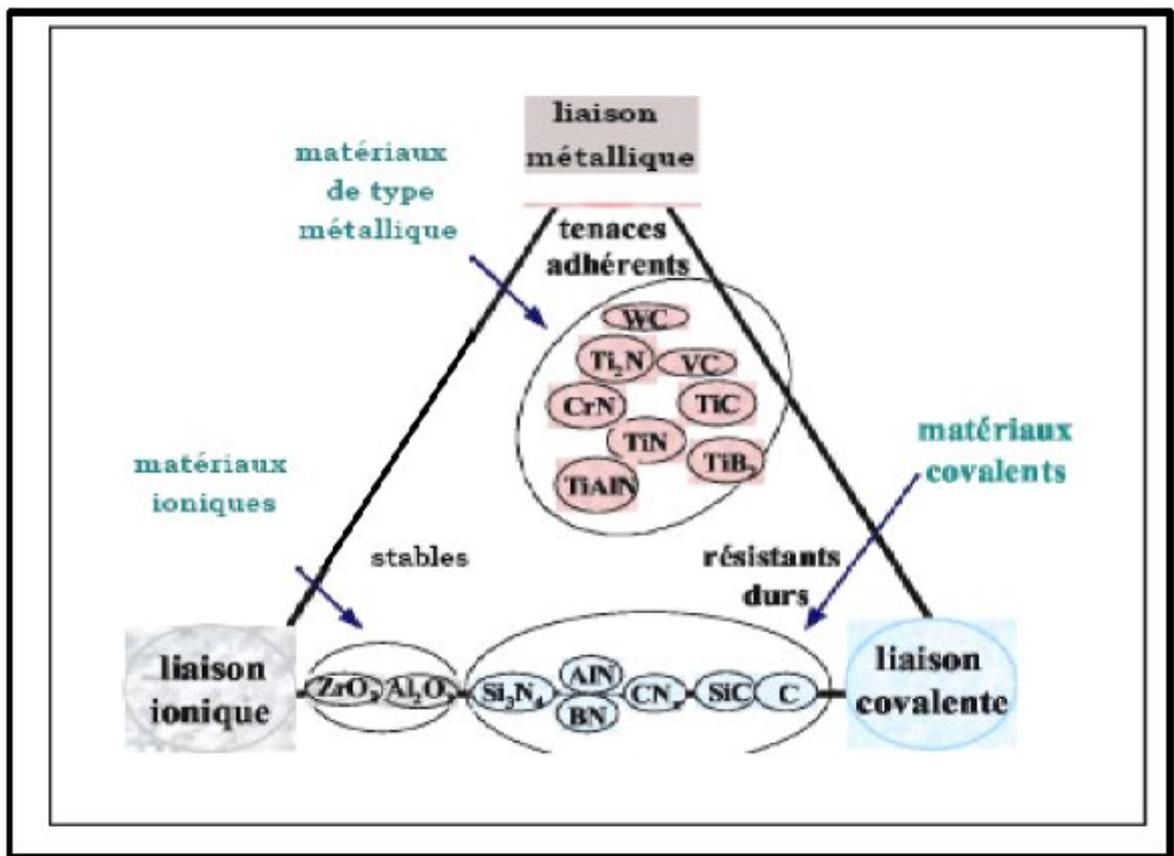


Fig. II.20. Classification des matériaux durs [19].

- ✓ Matériaux à caractère métallique: borures, carbures et nitrures de métaux de transition,
- ✓ Matériaux à caractère covalent: borures, carbures et nitrures de silicium, d'aluminium, de bore, ainsi que le diamant,
- ✓ Matériaux à caractère ionique: oxydes d'aluminium, de zirconium, de titane et de béryllium.

Les propriétés d'un matériau varient en fonction de la position de celui-ci dans la figure : II.18. Ainsi, les matériaux à caractère métallique présentent en général une bonne ténacité et une bonne adhérence, car en général, les interfaces cohérentes ou semi cohérentes (présentant une faible énergie d'interface) sont développées avec les substrats métalliques, les matériaux à caractère covalent montrent une dureté très élevée et enfin, les matériaux à caractère ionique présentent une bonne stabilité chimique.

Cette classification sert à comprendre le comportement de ces matériaux comme revêtements durs pour une application particulière. L'application de ce type de films pour la protection des surfaces a connu un grand essor depuis une vingtaine d'années.

Les propriétés de divers matériaux durs sont données dans le tableau : II.1, tout en sachant que ces propriétés sont dépendantes de la technique d'élaboration. Il existe un grand nombre de composés possédant une dureté élevée. Cependant, pour réussir la conception d'un revêtement, il est nécessaire de faire une bonne sélection des matériaux ainsi qu'une bonne sélection de la technique d'élaboration, en prenant en compte des critères thermodynamiques, mécaniques et physiques.

Tableau : II.1. Propriétés mécaniques et physiques des matériaux durs [19].

Type de matériaux	Matériau	densité	Point de fusion (° C)	Dureté Vickers (Hv)	Module de Young (GPa)	Résistivité électrique (pn cm)	Coefficient de dilation thermique (CDT°10 K-1)
Métalliques	TiB2	4.50	3225	3000	560	7.0	7.8
	TiC	4.93	3067	2800	470	50	8.0-8.5
	TiN	5.40	2960	2300	250	25	9.4
	ZrB2	6.11	3245	2300	540	6	5.9

Covalents	ZrC	6.63	3445	2560	400	42	7.0-7.4	
	ZrN	7.32	2982	1600	510	21	7.2	
	VB2	5.05	2747	2150	510	13	7.6	
	VC	5.41	2658	2900	430	53	7.3	
	Vn	6.11	2177	1560	460	85	9.20	
	CrB2	5.58	2188	2250	540	18	10.5	
	CrN	6.11	1050	1100	400	640	23	
	WC	15.72	2776	2350	720	17		
								3.8-3.9
		B4C	2.52	2450	4000	441	5.105	4.5 (5.6)
Ioniques	BN	3.48	2730	5000	660	1018	xxx	
	C (diamant)	3.52	3800	8000	910	1025	1.0	
	SiC	3.22	2500	2600	400	8000	4.5	
	Si3N4	3.19	1900	1720	210	1018	2.5	
	AlN	3.26	2250	1230	350	1015	5.7	
		Al2O3	3.98	2047	2100	400	1029	8.4
		TiO2	4.25	1867	1100	205	xxx	9.0
		ZrO2	5.76	2677	1200	190	1016	11 (7.6)
		HfO2	10.2	2900	780	xxx	xxx	6.5
		MgO	3.77	2877	750	320	1012	13
Substrats	W	19.3	3410	Xxx	407	30	4.45	
	WC-6Co	xxx	xxx	1500	640	xxx	5.40	
	Acier rapide	xxx	xxx	800-1000	250	xxx	12-15	
	HSS							

Les caractéristiques qu'on peut tirer de ce tableau sont les suivantes :

- ✓ Tous ces matériaux possèdent une dureté et un point de fusion élevés,
- ✓ Comme la fragilité est liée à la dureté, les matériaux à liaison ionique exhibent une faible résistance à la fissuration,
- ✓ Le module d'Young des matériaux à liaison ionique est le plus faible,

- ✓ Le coefficient de dilation thermique (CDT) augmente, en général, des matériaux à liaison covalente vers les matériaux à liaison métallique, en passant par les matériaux à liaison ionique.

Quant aux substrats, il existe une température limite de dépôt pour éviter une transformation potentielle (recristallisation, transformation de phases ou vieillissement). Ainsi, la température de dépôt limite pour les aciers rapides doit être inférieure à 700°C, alors que pour le tungstène et le carbure cémentés il n'y a pas de limite, en raison de leur point de fusion élevé.

II.7.3. les couches minces

Les besoins de l'industrie de coupe, demandeuse d'outils dotés d'une excellente résistance à l'usure, ont conduit, depuis plusieurs décennies, au développement de couches minces de nitrures de métaux de transition déposées par procédés physiques en phase vapeur (PVD).

Compte tenu des conditions extrêmes auxquelles ils sont soumis, ces dépôts doivent présenter plusieurs caractéristiques particulières. Dureté et propriétés tribologiques optimisées sont les premières à considérer, compte tenu de l'application potentielle de ces couches dans le domaine de l'usinage. En outre, ils doivent présenter une bonne tenue à l'oxydation à chaud en raison de l'élévation de température concomitante au frottement. Enfin, ils doivent constituer un moyen efficace pour lutter contre la corrosion du substrat, afin de limiter par exemple l'agression d'un éventuel lubrifiant ou la contamination lors d'un stockage en atmosphère industrielle.

Les revêtements monocouches TiN et CrN ont ainsi largement été étudiés au cours de ces dix dernières années et ont trouvé de nombreuses applications industrielles, notamment dans le domaine du tournage pour leurs propriétés mécaniques exceptionnelles. Cependant, dans un souci constant de rentabilité et d'amélioration de la durabilité des outils employés, une nouvelle génération de revêtements, constituée de deux types de dépôts dits nanostructures a été développée : d'une part les « super réseaux », multicouches formées par plusieurs strates de matériaux, tels que TiN, CrN, NbN ou AlN, dont l'épaisseur individuelle n'excède pas quelques dizaines de nanomètres et d'autre part les nanocomposites, constitués par la dispersion de grains de quelques nanomètres, dans une matrice amorphe de nature différente, typiquement des nanocristaux de TiN dans une matrice amorphe de BN. Ces nouveaux dépôts sont censés allier une haute dureté à une ténacité accrue et permettent donc d'envisager des

applications toujours plus sévères, comme l'usinage de nouveaux matériaux ou la mise en forme à haute cadence [19].

II.7.4. Formation d'une couche mince

Il y a trois étapes dans la formation d'un dépôt en couche mince à partir d'une phase vapeur [19].

- **Etape n°1** : synthèse ou création de la (ou les) espèce(s) à déposer : afin de mettre un matériau en phase vapeur on peut utiliser des techniques comme l'évaporation, la pulvérisation ou la dissociation des espèces dans un plasma.
- **Etape n°2** : transport de ces espèces de la source vers le substrat : il peut se dérouler sans collision entre atomes et molécules si on est en régime de flux moléculaire (libre parcours moyen important). En revanche, si la pression partielle du matériau et/ou des gaz environnants est assez élevée, il y aura de nombreuses collisions dans la phase vapeur pendant le transport vers le substrat.
- **Etape n°3** : dépôt sur le substrat et croissance de la couche : cette étape prend en compte le dépôt de la couche avec les processus de nucléation et de croissance. Lorsque des atomes frappent une surface, ils perdent leur énergie au profit de cette dernière et se condensent pour former des îlots de nucléation stables. Pendant la condensation, les adatoms ont un degré de mobilité sur la surface qui dépend de leur énergie cinétique et de la force (ainsi que du type d'interaction) entre l'adatom et la surface. Les îlots vont se développer et se rejoindre pour former une couche continue (c'est la coalescence). Les liaisons entre des atomes et des matériaux dissemblables (ceux de la couche et du substrat) peuvent être de différentes natures.

Une fois la coalescence effectuée, on a formation d'une interface. Le type de zone interfaciale dépend de la morphologie de surface du substrat, de la contamination du substrat, de l'interaction chimique atomes/surface, de l'énergie des atomes déposés et du comportement de nucléation des atomes déposés.

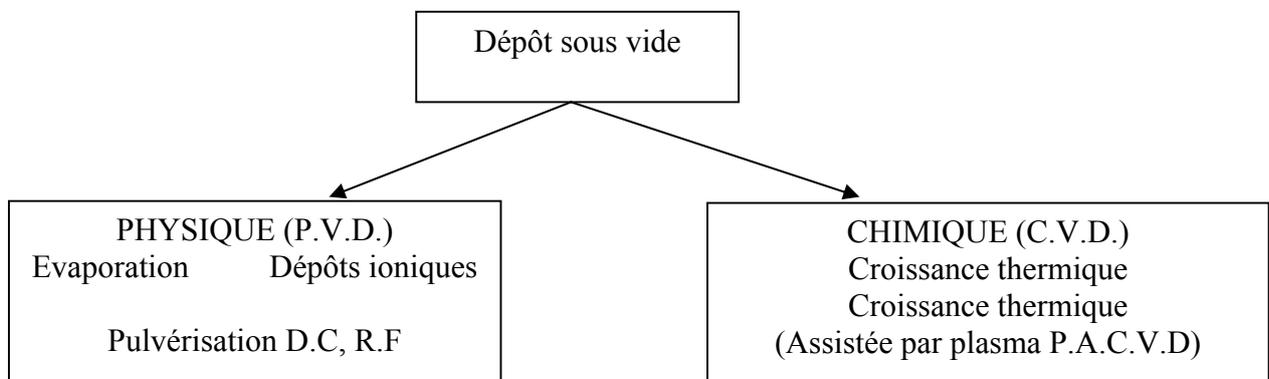
Cette interface peut être :

- **mécanique** : accrochage mécanique du matériau de la couche sur une surface rugueuse, l'état de surface du substrat influence la croissance de la couche. Une rugosité importante peut en effet améliorer l'adhérence de la couche,
- **abrupte** : passage abrupt du matériau de la couche au matériau du substrat en une distance de l'ordre de la distance interatomique (de 2 à 5 Å),
- **composée** : couche de composition constante, épaisse de plusieurs paramètres de maille et créée par une interaction chimique des matériaux de couche et de substrat,
- **diffusée** : changement graduel de composition, de contrainte intrinsèque et de paramètres de maille au travers de l'interface,
- **de pseudo-diffusion** : interface diffusée entre deux matériaux normalement insolubles qui le deviennent sous l'effet d'un bombardement ou d'une implantation ionique.

Quand les îlots se sont rejoints et que la zone interfaciale prend corps, la couche commence à épaisser, c'est la **croissance**. La façon dont la couche se forme et croît détermine les propriétés de la couche mince finale.

II.7.5. Classification des techniques de dépôt

Les techniques de dépôt peuvent être décrites en fonction des trois étapes citées précédemment. On peut donc classer les techniques de dépôts de la manière suivante [19] :



II.7.6. Choix d'une technique de dépôt de couches minces

Le tableau II.2 résume les principales caractéristiques prises en compte pour le choix d'une technique de dépôts.

Dans un premier temps, il faut vérifier quelle technique pourra synthétiser le matériau que l'on veut déposer. Le chauffage du substrat est également un critère important dans le choix de la technique de dépôt. Par ailleurs, connaissant l'état de surface du substrat à revêtir, on ne choisira pas une technique pouvant perturber l'interface de croissance si ce substrat est très rugueux [21]. L'évaporation induisant des perturbations à l'interface de croissance est à proscrire lorsque des substrats rugueux sont à revêtir.

Tableau II.2. Caractéristiques principales des méthodes de dépôt sous vide [21].

Caractéristiques	Evaporation	Ion Plating	Pulvérisation	C.V.D.
Production de l'espèce à déposer	Energie thermique	Energie thermique	Transfert de moment	Réaction chimique
Vitesse de dépôt	Jusqu'à 75 $\mu\text{m}/\text{mn}$	Jusqu'à 25 $\mu\text{m}/\text{mn}$	Faible (sauf pour métaux purs)	Moyenne (200 à 2500 $\text{\AA}/\text{mn}$)
Espèce déposée sous forme de	Atomes et ions	Atomes et ions	Atomes et ions	Atomes
Dépôt sur : -Des substrats de formes complexes -dans des trous borgnes de petit diamètre	Peu recommandée Résultats médiocres	Bons résultats mais épaisseur non uniforme Résultats médiocres	Assez bons résultats mais épaisseur non uniforme Résultats médiocres	Bons résultats Résultats moyens et limités
Dépôt de métaux, alliages, composés réfractaires	Oui	oui	oui	oui
Energie des atomes de l'espèce déposée	Faible 0,1 à 0,5 eV	Peut être élevée 1 à 1000 eV (et plus)	Peut être élevée 1 à 100 eV	Peut être élevée en PACVD
Bombardement du substrat puis de la couche par	non (sauf assistance par	oui	oui	Possible en PACVD

des ions de gaz inerte	un canon à ions externe)			
Perturbations introduites à l'interface de croissance	Non	oui	oui	oui
Chauffage du substrat par moyens externes	oui	oui ou non	oui ou non	oui en CVD oui ou non en PACVD

Le choix d'une technique de dépôt n'est donc pas aisé et doit être bien étudié. Outre les paramètres précités, on doit également tenir compte de certains paramètres que sont :

- ✓ La vitesse de dépôt désirée,
- ✓ Les limites imposées par le substrat (température...),
- ✓ L'adhérence du dépôt sur le substrat,
- ✓ La géométrie des substrats (de forme complexe ou non),
- ✓ La pureté du matériau choisi,
- ✓ La préservation de l'environnement,
- ✓ La facilité d'approvisionnement du matériau à déposer.

Les épaisseurs des revêtements sont souvent en fonction de la méthode de dépôt utilisée comme le montre la figure : II.21.

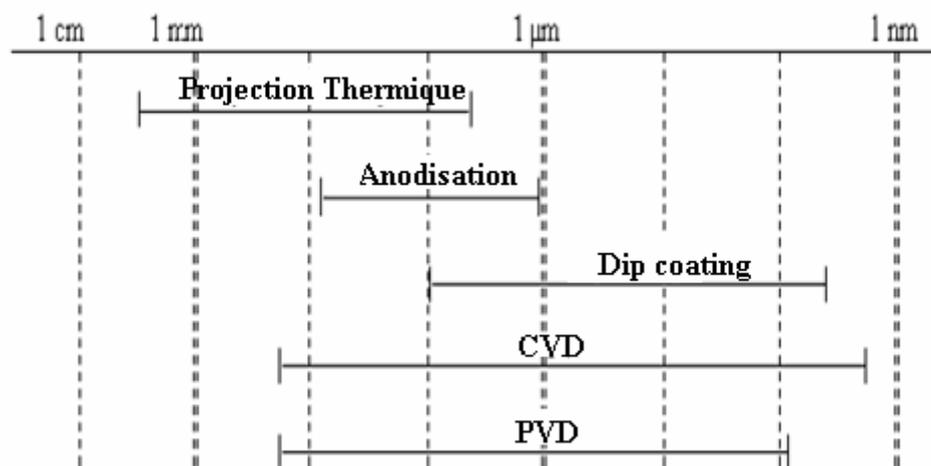


Fig. II.21. Gamme d'épaisseurs réalisables suivant les différentes techniques de dépôt [19].

Comme nous l'avons vu précédemment, de nombreuses techniques de dépôts utilisent des plasmas soit pour créer des espèces énergétiques (ions), soit pour dissocier des molécules.

II.7.7. Définition d'un plasma

Si l'on fournit une énergie suffisante à un gaz moléculaire, celui-ci va progressivement se dissocier en un gaz atomique à cause des collisions entre particules dont l'énergie cinétique est supérieure à l'énergie de liaison de la molécule.

A des températures suffisamment élevées, une fraction croissante des atomes aura assez d'énergie cinétique pour dépasser, par collisions, l'énergie de liaison des électrons des couches supérieures et obtenir ainsi un gaz ionisé ou plasma.

Cette transition n'est pas une phase de transition dans le sens thermodynamique car elle se fait graduellement avec l'augmentation de la température du plasma [19].

II.7.7.1. Technique d'obtention d'un plasma

En pulvérisation magnétron, le plasma est obtenu par une décharge électrique dans un gaz. Un champ électrique est appliqué entre deux électrodes : une cathode (généralement à un potentiel négatif) et une anode (généralement à la masse). Ce champ accélère les électrons libres à des énergies suffisamment élevées pour ioniser les atomes par collisions. Le champ appliqué transfère plus efficacement de l'énergie aux électrons (légers) qu'aux ions (relativement lourds). La température des électrons est de ce fait plus élevée que celle des ions car le transfert d'énergie thermique des électrons aux particules plus lourdes est lent.

Toutefois, pour que le gaz soumis au champ électrique s'ionise, il est nécessaire qu'un certain nombre de conditions (pression, tension de polarisation, distance interélectrodes,...) soit rempli : ce sont les conditions de [19].

II.7.8. Techniques de dépôts de couches minces

II.7.8.1. Evaporation

L'évaporation est une technique d'obtention des films sous vide qui consiste à évaporer ou sublimer un matériau. L'énergie nécessaire à l'évaporation est le plus souvent fournie par bombardement électronique. Le dépôt se fait par condensation de la phase vapeur sur un substrat.

L'évaporation permet l'obtention de films à une vitesse de dépôt élevée. En revanche, les inconvénients que présente cette technique sont l'élaboration de films souvent sous

stoechiométriques (ceci est dû à une dissociation partielle des espèces), une faible adhésion des couches et la nécessité d'une densité de puissance assez importante pour produire la phase gazeuse des matériaux ayant un point de fusion très élevé. Le développement de l'évaporation réactive assistée par plasma (Activated Reactive Evaporation) a permis de pallier à ces inconvénients. Dans cette technique la phase vapeur est produite grâce à un faisceau d'électrons et la réactivité est augmentée par la présence d'un plasma réactif. Diverses modifications de cette technique donnent lieu à d'autres procédés PVD, tels que le dépôt par plasma à très basse pression (Low-Pressure Plasma Deposition, LPPD), l'évaporation réactive assistée par un bias (Biased Activated Reactive Evaporation, BARE), etc. La figure : II.22 montre un diagramme schématique de chaque technique de dépôt.

Les matériaux les plus souvent produits par ces techniques sont les oxydes, carbures et nitrures d'aluminium, de titane et de zirconium avec une excellente pureté.

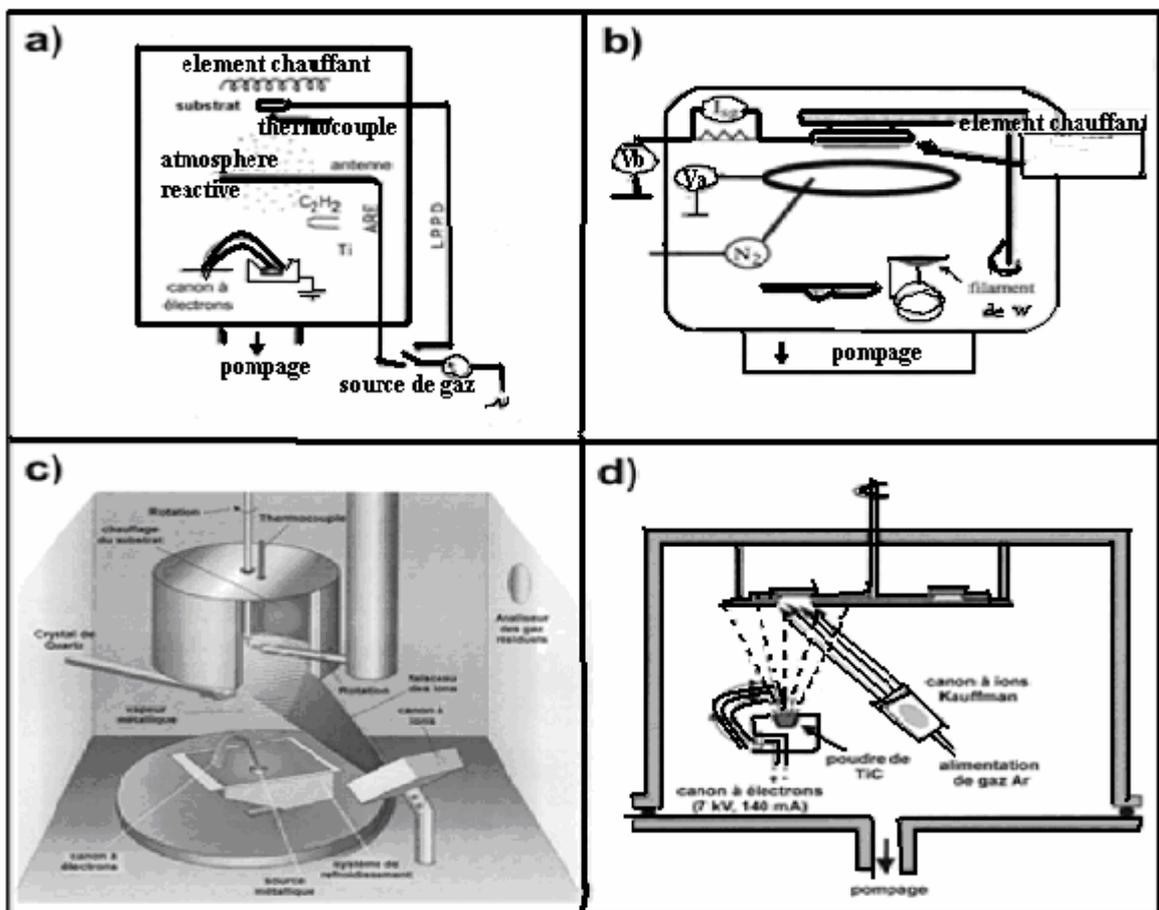


Fig. II.22. Diagrammes schématiques des techniques d'évaporation a) évaporation réactive (Low Pressure Plasma Deposition/L.P.P.D.), b) évaporation réactive assistée par une anode, c) évaporation assistée par un canon à ions et d) évaporation assistée par un canon à ions [19].

II.7.8.2. Pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique est une technique qui consiste à bombarder une cible avec des ions de manière à ce que les espèces éjectées de la cible viennent se déposer sur un substrat.

Le bombardement a lieu sur la cible qui est placée sur la cathode attirant les ions positifs générés dans un plasma de gaz à basse pression. Pour les films de TiC et de TiN, le plasma est souvent produit avec un gaz neutre (Ar) et/ou un gaz réactif (azote, méthane, propène, etc.).

De la même façon que pour l'évaporation, diverses modifications apportées à la pulvérisation cathodique donnent lieu à divers procédés d'élaboration (figure : II.23). Ainsi, les techniques de dépôt physique en phase vapeur sont devenues très nombreuses.

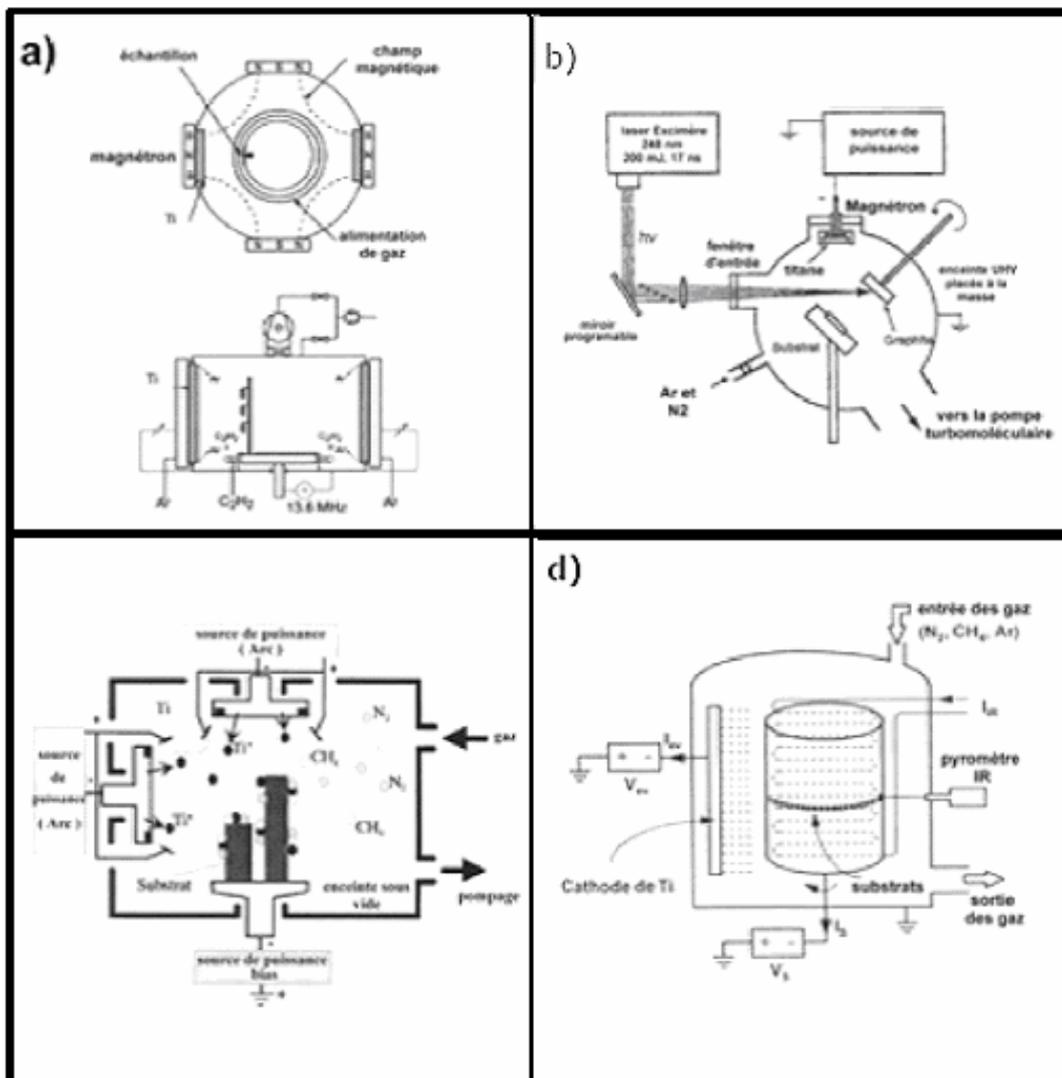


Fig. II.23. Diagrammes schématiques de techniques telles que a) la pulvérisation magnétron, b) la pulvérisation magnétron assistée par un laser pulsé, c) le dépôt ionique assisté par un système multi-arc pour la fabrication de TiCN et d) la pulvérisation assistée par arc pour élaborer TiCN [20].

La caractéristique la plus intéressante du procédé de dépôt par pulvérisation est son universalité. Comme le matériau à déposer passe en phase vapeur à la suite d'un processus mécanique (transfert d'énergie de l'ion incident vers l'atome de surface au moment de la collision), on peut déposer pratiquement tous les matériaux inorganiques.

La vitesse de dépôt dépend de nombreux facteurs comme la masse atomique du matériau cible ou celle des ions incidents, ou bien encore de l'énergie de ces mêmes ions. Pour un métal avec une puissance d'environ 5 W/cm^2 et une pression dans l'enceinte autour de $1,3 \text{ Pa}$, on peut espérer obtenir une vitesse de dépôt de 2 nm/s . La température du substrat dépend essentiellement de la vitesse de dépôt donc de la densité du plasma. Le substrat peut atteindre des températures de l'ordre de 300 à 500°C . Toutefois, pour certains types de dépôts, on peut être amené à chauffer le substrat.

Les paramètres de dépôt de couches minces par pulvérisation sont :

- ✓ Les pressions résiduelles et de travail de l'enceinte,
- ✓ La composition des gaz résiduels,
- ✓ La puissance appliquée sur la cible,
- ✓ La tension de polarisation des porte-substrats,
- ✓ La densité de courant,
- ✓ La géométrie de l'ensemble,
- ✓ La présence ou non de champs magnétiques.

Les ions peuvent provenir soit d'un plasma, soit directement d'une source d'ions (figure : II.24).

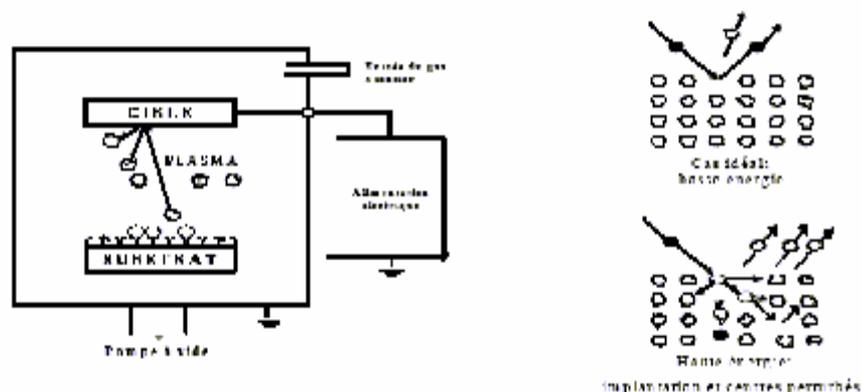


Fig. II.24 : A/ Principe de la pulvérisation –B/ Illustration des interactions ion/solide à basse et haute énergie [20].

La pulvérisation cathodique magnétron présente de très nombreux avantages décrits dans la littérature parmi lesquels on peut retenir :

- La reproductibilité des dépôts, Ce qui explique le très grand succès de cette technique dans le milieu industriel,
 - ✓ L'obtention de couches très uniformes par leur aspect et leur adhérence, car cette technique évite les problèmes tels que les gouttelettes et les projections,
 - ✓ Des rapports atomiques dans les couches voisins de ceux de la cible.

Parmi les applications types de la pulvérisation aux dépôts de couches minces, on peut citer :

- Les métallisations pour la production de semi-conducteurs,
- Les couches transparentes conductrices pour les écrans électroluminescents,
- Les résistances à couches minces,
- Les couches optiques à longue durée de vie telles que les miroirs pour gyroscopes à lasers,
- Les couches dures pour les outils,

Les dépôts en continu sur des rouleaux de films plastiques pour des applications architecturales (contrôles thermiques, maisons solaires, ...).

II.7.8.3. Pulvérisation magnétron

La cathode magnétron est un perfectionnement de la cathode utilisée en pulvérisation diode classique, qui permet de s'affranchir du filament chaud de W. Ce perfectionnement résulte de la combinaison d'un champ magnétique intense, perpendiculaire au champ électrique créé par la cathode, c'est-à-dire parallèle à la cible [20].

L'effet magnétron consiste en une décharge diode D.C. ou R.F. entretenue par des électrons secondaires éjectés de la cathode sous l'effet du bombardement ionique. Dans ce cas, les électrons qui ne rencontrent pas de molécules de gaz, s'éloignent perpendiculairement à la cathode et sont captés par l'anode (Figure : II.25).

Si l'on superpose au champ électrique E un champ magnétique B, perpendiculaire à celui-ci, donc parallèle à la cathode et très près de celle-ci (Figure : II.25), les trajectoires électroniques s'enroulent autour des lignes de champ magnétiques, augmentant considérablement les chances d'ioniser une molécule de gaz au voisinage de la cathode.

Le pouvoir d'ionisation des électrons émis par la cathode est augmenté du fait de l'allongement de leur trajectoire.

Il s'ensuit une ionisation plus importante des gaz contenus dans l'enceinte.

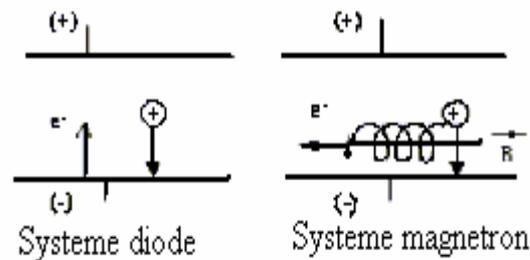


Figure : II.25 : Trajectoires électroniques [20]

Il en résulte :

- ✓ L'augmentation de la vitesse de dépôt,
- ✓ L'abaissement de la pression de maintien du plasma.

Bien entendu, ce dispositif n'ajoute rien à l'énergie des ions arrivant sur la cible, il ne fait qu'augmenter leur nombre pour une tension de polarisation de la cible donnée.

Les pressions de travail se situent entre $6,7 \cdot 10^{-1}$ et $6,7 \cdot 10^{-2}$ Pa.

Les deux types de cathodes magnétron conventionnels couramment utilisés sont : les magnétrons plans (circulaires (Figure : II.26) et rectangulaires) et les magnétrons cylindriques (cathodes barreaux et magnétrons cylindriques creux).

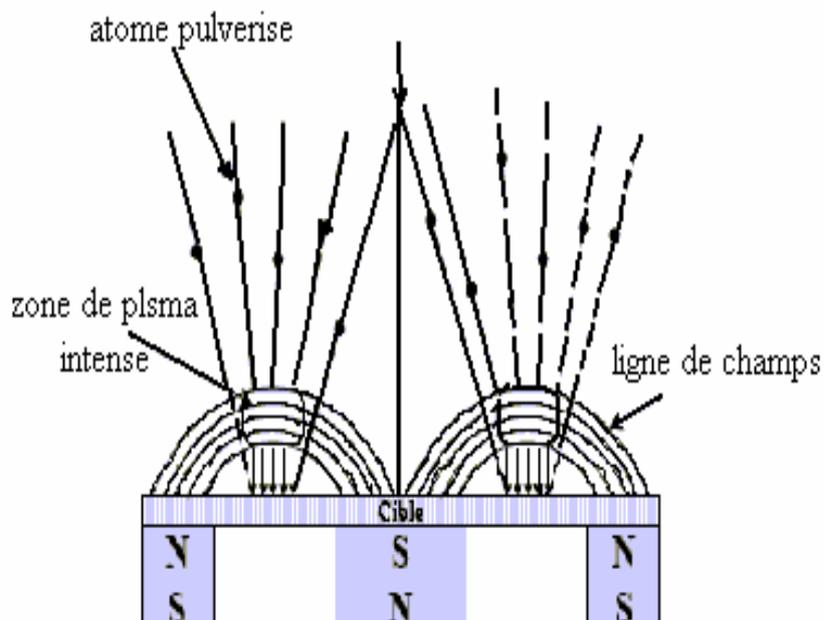


Fig. II.26 .Magnétron plan circulaire conventionnel [20].

La pulvérisation magnétron peut être effectuée en utilisant une seule cathode ou bien plusieurs cathodes installées en vis-à-vis (Figure : II.26). Ainsi, un système magnétron constitué de deux cathodes (par exemple une cible de titane et une cible de chrome) permet de réaliser aisément des multicouches de composés biphasés (TiN/CrN) et est appelé « dual magnétron » (Figure : II.27.b, II.27.e). Actuellement, ces techniques de pulvérisation à plusieurs cathodes permettent également la synthèse de « superlattices » ou superréseaux nécessitant d'une part la présence de plusieurs cathodes mais aussi une période de couches très faible (inférieure à 10 nm). L'emploi de composés triphasés (comme TiAlN) que l'on retrouve dans les multicouches est également facilité grâce à ces techniques.

Les nouvelles tendances en procédés magnétron consistent en l'emploi de magnétrons déséquilibrés (Figure : II.27) et à cathode rotative.

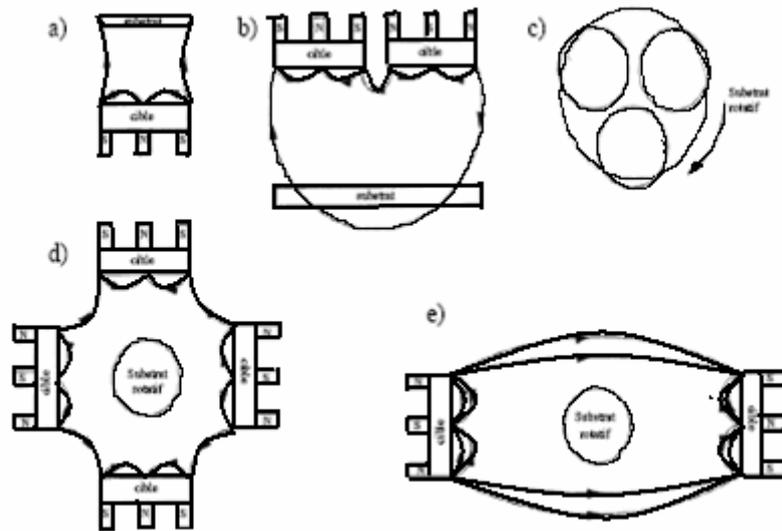


Fig. II.27 .Exemples d'arrangements de cathodes magnétron : a) Magnétron déséquilibré, b) dual magnétron pour copulvérisation, c) tri cathodes pour multicouches ou alliages, d) arrangement à 4 cathodes pour multicouches, alliages, couches réactives, e) dual magnétron face-à-face pour multicouches, alliages et dépôt sur des substrats de géométrie complexe [20].

Une cathode magnétron est dite déséquilibrée lorsqu'une partie des lignes de champ issues d'un pôle ne converge pas directement vers l'autre pôle. Par exemple, contrairement à un magnétron équilibré, on a des lignes de champ vers le porte-substrats d'où la formation d'ions près de celui-ci, grâce aux électrons arrivant sur ces lignes de champ. Ceci permet d'augmenter le flux d'ions. Les magnétrons à cathode rotative cylindrique ont une durée de vie, et donc d'utilisation, supérieure à celle des cathodes planes.

Des recherches ont également été faites afin d'améliorer ces cathodes planes et d'augmenter leur durée de vie. Le procédé Cyclomag a été développé afin de permettre le mouvement des aimants d'une cathode plane magnétron équilibré ou déséquilibré. Ainsi, grâce à ce procédé, la durée de vie d'une cathode plane est doublée voire même triplée. La pulvérisation magnétron permet d'obtenir des vitesses de dépôt plus élevées que les méthodes de pulvérisation plus classiques.

Cette vitesse dépend de plusieurs paramètres :

- Le matériau pulvérisé (selon le rendement de pulvérisation),
- Le gaz de décharge utilisé: plus la masse moléculaire du gaz est élevée, plus l'effet de pulvérisation est grand,
- La distance cible/substrat,
- La pression: la vitesse de dépôt décroît lorsque la pression augmente (ceci est dû au phénomène du libre parcours moyen),
- La densité de puissance électrique appliquée à la cible.

Par ailleurs, pour un même volume de la chambre de pulvérisation, la pression de travail étant plus faible en pulvérisation magnétron, cela permet de consommer beaucoup moins de gaz.

Ces dernières années des améliorations ont été réalisées sur ce procédé en incluant des microondes ainsi que le Plasma Immersion Ion Implantation (PIII).

II.7.8.4. Système micro-ondes

Dans un réacteur plasma magnétron traditionnel, le matériau de la cible est pulvérisé par les ions du plasma, principalement sous forme neutre. Cette vapeur est éjectée de la cible en direction du substrat situé en face du magnétron, et diffuse pour se déposer sur le substrat. Le principe du réacteur conçu est de créer un plasma micro-ondes sur le trajet de la vapeur et d'ioniser par collisions électroniques les atomes pulvérisés du magnétron. L'objectif est d'obtenir, par la vapeur ionisée, un dépôt de meilleures qualités et permettre un effet de polarisation du substrat.

Les caractéristiques du plasma produit par les systèmes micro-ondes (densité et température électroniques) ont été mesurées par une sonde de Langmuir. On obtient typiquement une densité électronique de l'ordre de 10^{12} cm^{-3} pour 30 mTorr (4Pa) d'argon en appliquant 600 ou 800 W de puissance sur chaque système micro-ondes. La densité est maximale entre les deux systèmes et décroît d'un facteur 2 sur 5-6 cm. On peut vérifier que la densité augmente linéairement avec la puissance micro-ondes. La température électronique varie entre 1,5 et 2

eV sur toute la gamme de pression étudiée (10 et 100 mTorr, soit 1,3 et 13 Pa). Elle est homogène spatialement. Quand les caches métalliques de protection sont installés, la température électronique augmente légèrement (de l'ordre de 10-15%) et la densité électronique décroît. La perte de densité dépend de l'ouverture des caches ; elle atteint un facteur 2 pour la plus petite ouverture de 1 cm.

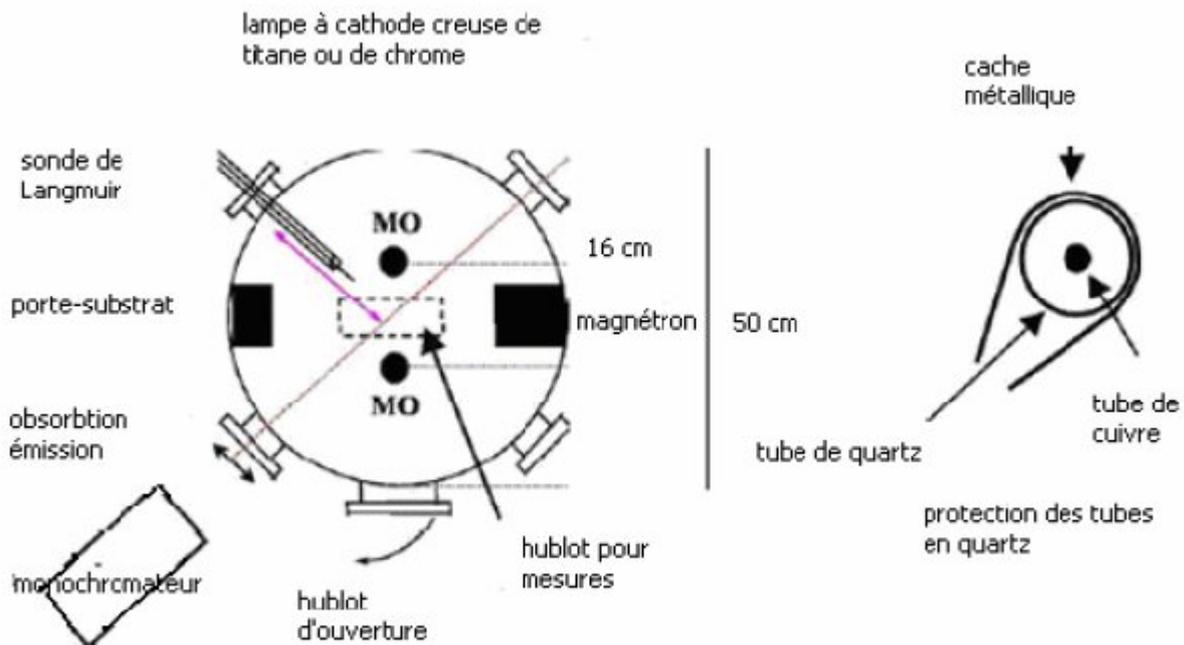


Fig. II.28. Schéma de principe du réacteur associant magnétron et systèmes micro-ondes pour l'ionisation de la vapeur pulvérisée [21].

Un schéma du réacteur est présenté sur la Figure : II.28, développé par le laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP) [21]. Ce réacteur a été conçu pour permettre la mise en place de diagnostics de spectroscopie d'émission, de spectroscopie d'absorption et de sondes électrostatiques. Le réacteur est constitué d'un cylindre de 50 cm de diamètre et de 45 cm de hauteur.

Les mesures peuvent se faire :

- Horizontalement, selon un axe de 45° par rapport à l'axe magnétron-substrat et à mi-hauteur du réacteur. Les mesures optiques sont alors intégrées selon un diamètre du réacteur. La sonde de Langmuir peut quant à elle se déplacer à l'intérieur du réacteur.

- Verticalement, perpendiculairement à l'axe magnétron-substrat, 10 cm de part et d'autre du centre du réacteur. Les mesures optiques sont alors intégrées selon une hauteur du réacteur.

La cathode magnétron est rectangulaire de 22 cm de longueur et de 9 cm de largeur. La distance du magnétron au centre du réacteur peut être ajustée entre 4,5 et 10 cm. Les deux systèmes micro-ondes produisant l'ionisation sont situés perpendiculairement à l'axe magnétron-substrat et sont distants de 8 cm du centre du réacteur. Afin de réduire le dépôt métallique sur les tubes de quartz, des caches métalliques sont réalisés autour des tubes de quartz, caches « ouverts » schématisés sur la Figure : III.28. L'ouverture des caches est de 1 à 3 cm et est orientée à environ 45° vers le substrat. La cathode magnétron est alimentée par un générateur continu 500 V - 3 A et chaque système micro-onde est relié à un générateur de 2,45 GHz et 1,2 kW. Deux cibles ont été utilisées : une en chrome et une en titane. Le gaz utilisé est de l'argon.

La concentration des atomes de chrome et de titane a été mesurée par absorption optique en utilisant une lampe à cathode creuse de chrome ou de titane. Cette lampe est alimentée en régime pulsé avec des impulsions de 100µs, un courant de 225 mA et une fréquence de répétition de 100 Hz à l'aide d'un générateur mis au point au laboratoire. Ce système permet de s'affranchir de la lumière émise par le plasma. Ces mesures ont été effectuées dans un premier temps suivant la visée à 45° et une distance magnétron-antennes de 10 cm pour les deux cibles. Elles ont par la suite été réalisées suivant l'axe vertical pour plusieurs positions entre le magnétron et le substrat et pour une distance magnétron-antennes de 4,5 cm (seulement pour la cible de titane) [21].

II.7.8.5. Système de dépôt par ablation Laser (Pulsed Laser Deposition-PLD)

Le dépôt par ablation laser que nous désignerons fréquemment par l'acronyme anglo-saxon PLD (Pulsed Laser Dépositions) a démontré, depuis déjà plusieurs années, sa flexibilité. Il est en effet possible de déposer un éventail important de matériaux.

La PLD se caractérise par l'évaporation congruente des espèces qui permet, en principe, la conservation de la composition de la cible dans le film déposé.

On obtient alors :

- Un flux instantané considérable de particules sur le substrat pendant la croissance de la couche (supérieur aux autres méthodes de dépôt),

- Une énergie cinétique importante des espèces éjectées de la cible (atomes, ions, petites molécules) que l'on peut contrôler en jouant sur les paramètres laser.

Grâce à ces caractéristiques originales, il est possible de déposer des couches cristallisées, voire mono orientées, à des températures de substrat très inférieures aux températures « communes » de cristallisation. Ainsi, la PLD a acquis ses lettres de noblesse pour la réalisation de couches mono orientées d'oxyde d'yttrium baryum cuivre, sur des substrats tels que des monocristaux d'oxyde de magnésium, présentant des transitions vers l'état supraconducteur exceptionnellement étroites.

La PLD s'avère tout aussi adaptée à la réalisation de couches ultra dures destinées à diverses industries et applications.

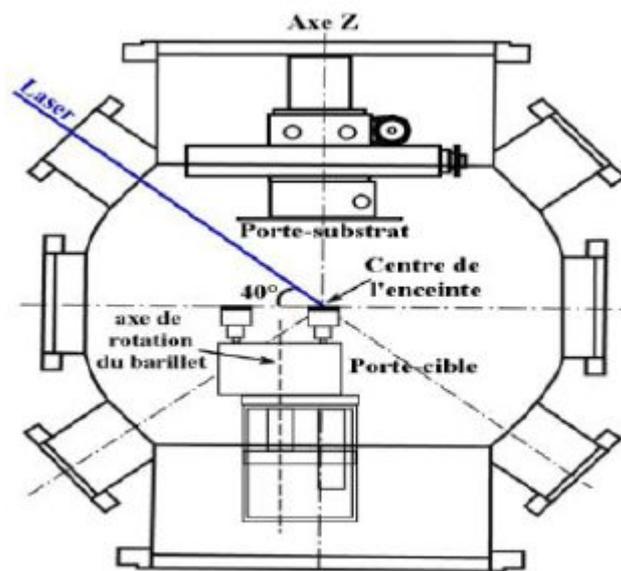


Fig. II.29 .Schéma de principe du réacteur PLD [21].

La porte cibles possède deux rotations (Figure II.29). L'une commande la révolution de l'ensemble des cibles (ou barillet), permettant de les amener sous le faisceau laser. La seconde commande la rotation des cibles sur elles-mêmes. Ces mouvements sont pilotés par PC.

Le porte-substrats est placé dans l'enceinte au-dessus du système porte-cibles. Il est équipé de trois micromoteurs destinés à un fonctionnement sous ultra-vide:

- Deux d'entre eux assurent les translations suivant les directions x et y,
- Le dernier est dédié à la rotation du substrat.

La conversion de la rotation des moteurs en translation de la platine portant le substrat est assuré par une vis sans fin en acier et une roue en bronze-phosphore (pour réduire les risques de blocage).

Les moteurs de ces trois axes disposent de codeurs magnétiques (de type 20B) qui permettent, comme pour le moteur du barillet du porte-cibles, de contrôler son déplacement par l'intermédiaire de cartes ADRES et du logiciel WinTCX.

La préparation des substrats se fait d'une manière classique (nettoyage et décapage), la durée d'un dépôt se fait entre 4 et 5 heures à un vide de $1.3 \cdot 10^{-5}$ Pa.

La particularité de ce procédé est le réglage de la fluence du laser grâce à un calorimètre, il faut ajuster la haute fréquence de ce laser pour obtenir l'énergie voulue (environ 180 mJ par impulsion). Le centrage des cibles afin que le laser percute la cible en son centre est nécessaire avant chaque dépôt afin de réaliser une prise d'origine du système. Après décapage des cibles et réglage du taux de répétition du laser le dépôt pourra ainsi commencer.

Les dépôts par PLD se distinguent par leurs grandes flexibilités ; cette technique permet de déposer un éventail important de matériaux.

Ils se caractérisent par :

- Une évaporation congruente des espèces qui permettent, en principe, la conservation de la composition de la cible dans le film déposé,
- UN flux instantané considérable de particules sur le substrat pendant la croissance de la couche (supérieur aux autres méthodes de dépôt),
- Une énergie cinétique importante des espèces éjectées de la cible (atomes, ions, petites molécules) que l'on peut contrôler en jouant sur les paramètres laser

II.7.8.6. Dépôts chimiques en phase vapeur (C.V.D.- P.A.C.V.D.)

Le procédé connu sous le nom de C.V.D. (Chemical Vapor Deposition) consiste à placer le substrat à recouvrir dans une enceinte dans laquelle on fait circuler le matériau à déposer sous forme gazeuse. Le substrat est chauffé à une température telle que lorsque la molécule du composé gazeux le touche, elle se décompose en un matériau solide (celui que l'on cherche à déposer) et en un composé gazeux qui est pompé [21].



A l'origine, ce procédé s'utilisait à pression atmosphérique ou au-delà. Mais progressivement, sous l'impulsion des micros électroniciens, ce procédé s'est étendu aux basses pressions (Low

Pressure C.V.D.-LPCVD) et même plus récemment, en présence d'une décharge qui a pour effet d'activer la réaction (Plasma Assisted C.V.D.-PACVD).

II.7.9. Avantages et inconvénients des procédés P.V.D. et C.V.D

Les avantages et inconvénients des différentes techniques de dépôt décrites précédemment sont résumés dans le tableau II.3.

Tableau II.3. Avantages et inconvénients des procédés P.V.D. et C.V.D [21]

Procédé	Avantages	Inconvénients
Pulvérisation cathodique : Système diode	-vitesse de dépôt élevée -matériel simple -prix de l'équipement faible -faible température du substrat (dépôt sur matières plastiques) -bien adapté pour applications électriques et optiques	-mal adapté pour dépôts réfractaires -difficultés pour déposer alliages -faible pouvoir de recouvrement aux basses pressions -adhérence faible des dépôts -dépôts parfois poreux et non uniformes en épaisseur
Système Magnétron	-idem système diode -vitesse de dépôt élevée -faible température de dépôt (revêtement sur plastiques) -bien adapté pour applications optiques, mécaniques, électriques et décoration	dépôts non uniformes en épaisseur -coût matériel élevé -cible pouvant être sensible à la fissuration -réaction possible de la cible avec l'atmosphère gazeuse
Dépôts ioniques	vitesse de dépôt élevée -bonne adhérence des dépôts -bon pouvoir de recouvrement -faible température de dépôt -possibilités de déposer de nombreux métaux, alliages, composés réfractaires ou non, conducteurs ou diélectriques -bien adapté pour applications mécaniques, électriques	coût matériel élevé -contrôle de la stœchiométrie du dépôt parfois délicat -dépôts non uniformes en épaisseur
C.V.D.	-très grande pureté des matériaux déposés -dépôts de matériaux sous forme poly- et monocristalline, production de composés amorphes -possibilités quasi illimitées dans le choix des matériaux à déposer -possibilités de contrôler facilement la stœchiométries des dépôts, la	-connaissances thermodynamiques parfois insuffisantes et cinétique des réactions complexes -température élevée souvent nécessaire d'où : · possibilités de modification de la structure du support

	<p>composition, et par conséquent, leurs propriétés</p> <ul style="list-style-type: none"> -facilité de dopage du dépôt à l'aide de quantités contrôlées d'impuretés -possibilités de dépôt de couches épitaxiales -possibilité de dépôt de substances avec modification continue ou discontinue de la composition du revêtement (structure duplex). -possibilités de dépôt de matériaux réfractaires à des températures faibles -possibilité de dépôt sur des pièces de forme complexe (intérieur de cylindre par exemple) -possibilité de préparer chimiquement <i>in situ</i> le substrat avant dépôt -bonne adhérence entre couche et support -vitesse de dépôt supérieure à celle des P.V.D. -possibilité de travailler à pression atmosphérique. 	<ul style="list-style-type: none"> · possibilité de déformation des pièces · nécessité de trempe ultérieure · élimination de certains substrats -gaz utilisés en C.V.D. et produits de réaction souvent toxiques, explosifs ou corrosifs -possibilité d'attaque du substrat ou du revêtement par ces gaz corrosifs -dans certains cas, temps de réaction long -l'uniformité des dépôts est parfois difficile à contrôler -précaution à prendre quand au couple dépôt/substrat ; on ne peut déposer n'importe quel matériau sur n'importe quel substrat.
--	---	---

II.7.10. Intérêt des revêtements pour outils coupants

Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre toutes les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage.

Ces sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre. Il semble ainsi évident qu'un outil de perçage dans un matériau thermoplastique ne sera pas sollicité de la même manière qu'une fraise-mère dans de l'acier prétraité. Néanmoins, toutes les applications d'usinage présentent des familles de sollicitations voisines, à ceci près, que chacune d'elles n'a ni la même intensité absolue, ni la même importance relative. Afin de décrire les sollicitations induites sur un outil de coupe, il faut se ramener à l'étude de la formation du copeau (Figure : II.30). Il est nécessaire de distinguer 4 zones sollicitant différemment l'outil.

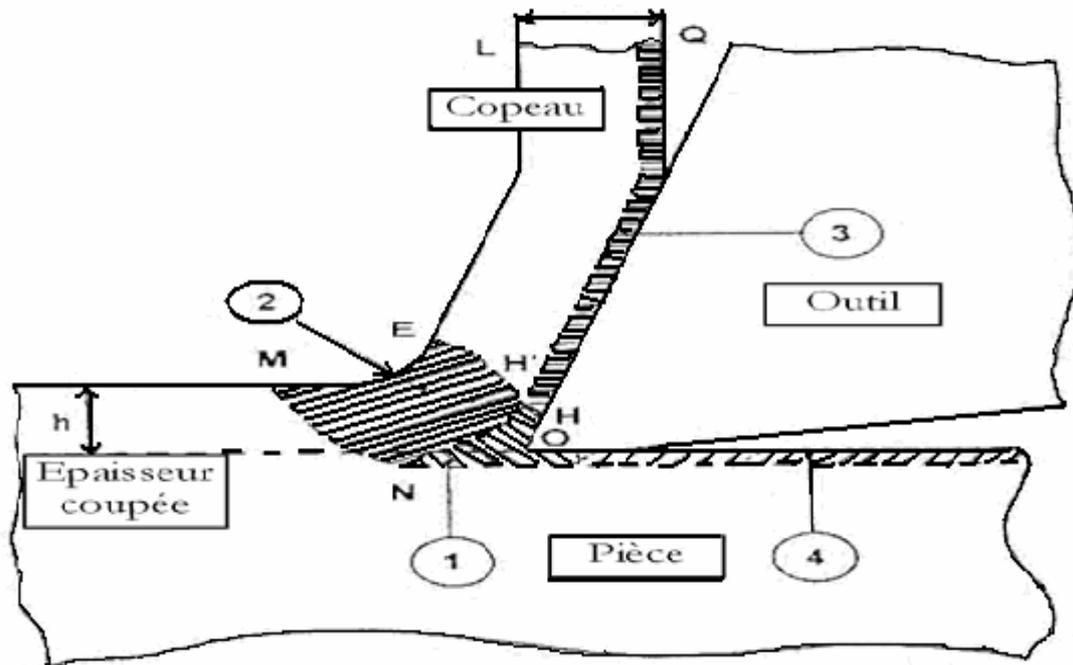


Fig. II.30. Mise en situation des 4 zones caractérisant le contact du triplet
Pièce outil copeau [21].

Zone 1 : il s'agit de la zone de séparation du métal en deux. Dans cette zone, qui entoure de manière étroite l'arête de l'outil, il y a une déformation intense par refoulement du métal. Cette zone peut donner naissance à des phénomènes de soudures locales de la matière usinée sur l'outil (arête rapportée), dès lors que l'on travaille avec des vitesses de coupe trop basses et avec des fraises en acier rapide non revêtues. Ces soudures locales se créent et disparaissent fréquemment. Cette forme d'usure provoque principalement des micros écaillages de l'arête de coupe des fraises [21].

Zone 2 : Zone de glissement plastique (zone de formation du copeau). La ligne MN (Figure : 1.3.11) est le front où la limite élastique est atteinte. La ligne EFF est celle de fin de déformation plastique. Cette zone est couramment dénommée Zone de Cisaillement Primaire (ZCP) et n'étant pas en contact direct avec l'outil, elle n'influence pas directement l'usure de celui-ci. Par contre, les grandes déformations plastiques qui s'y produisent sont à l'origine d'un dégagement de chaleur très important qui va conditionner une grande partie du flux de chaleur transmise à l'outil. Le niveau de température qu'atteindra le substrat de l'outil sera un des éléments clefs de sa résistance à l'usure [21].

Zone 3: Les phénomènes qui se produisent à l'interface copeau/copeau et copeau/outil, sont d'une extrême complexité et ont depuis longtemps interpellé les chercheurs. Il semble que cette interface soit le siège de cohabitations de glissement et/ou d'alternance entre des phénomènes locaux d'adhésion et intenses frottements de glissement. Ces phénomènes conduisent à des cisaillements locaux très intenses dans le copeau, alors que la majeure partie de celui-ci s'écoule sans être franchement perturbé.

Il est possible de faire un parallèle avec des phénomènes de couche limite dans le domaine de la mécanique des fluides. Cette zone à frottement et adhésion intense est dénommée Zone de Cisaillement Secondaire (ZCS) et génère une quantité de chaleur très importante (20 à 30 % de la chaleur totale produite selon Trent et Lecalvez. Ce flux de chaleur diffuse à la fois dans l'outil et le copeau. Cette source de chaleur tend à faire accroître les températures dans le substrat des outils et donc à le fragiliser.

Cette ZCS donne lieu à divers phénomènes d'usure : une usure par abrasion et une usure par diffusion. L'usure par abrasion vient de la présence de particules dures dans la matière usinée, issues notamment du traitement de désoxydation des aciers (grains Al_2O_3). Ces particules se comportent comme un outil abrasif à la surface de coupe de l'outil et enlève des micros copeaux. C'est le mode d'usure le plus usuel à toutes les vitesses de coupe, car ces particules ne sont pas influencées par la cinématique relative outil/copeau. Par contre, l'abrasion aura d'autant plus d'effets que la température locale est grande.

En effet, la hausse des températures de coupe, liée à la hausse des vitesses de coupe, entraîne une diminution de la résistance à l'abrasion des substrats (baisse de la dureté superficielle).

De plus, lorsque les températures de coupe à l'interface outil/copeau augmentent, des phénomènes de diffusion des composés du substrat vers le copeau peuvent se produire. En effet, la diffusion est activée thermiquement et ne peut avoir lieu qu'à partir d'une température minimale. Par contre, la vitesse de diffusion est une fonction exponentielle de la température. Ce phénomène d'usure est donc d'autant plus important que les températures d'interfaces sont élevées [21].

Zone 4: La zone d'interface entre la surface usinée et la face en dépouille est une zone clef de l'usure en dépouille des outils. Cette interface est principalement le siège d'un frottement à grande vitesse (vitesse de coupe). Ce frottement est moins énergétique que celui de la zone de cisaillement secondaire, car la pression locale est bien plus réduite. L'usure par abrasion est le phénomène principal produit à cette interface. Cette usure abrasive est conditionnée par la

température de l'outil sur la face de coupe. Le frottement outil/pièce génère une quantité de chaleur qui n'est pas très importante comparativement à celle de la ZCS, mais qui est très localisée, ce qui entraîne des températures d'interface élevées.

Les phénomènes associés aux quatre zones caractéristiques de la formation du copeau donnent une bonne représentation des sollicitations d'un outil lors d'une opération de coupe continue (tournage, perçage, etc.). Les opérations à coupe interrompue (fraisage, taillage, etc.) se distinguent par le fait que l'outil est en contact avec son environnement extérieur entre deux phases d'usinage : l'air (cas des opérations en usinage à sec) ou le fluide de coupe (Émulsion, huile entière). De là, apparaissent d'autres formes de sollicitations :

- L'air ou le fluide vont entraîner des réactions chimiques initiées par les hautes températures à la surface des outils: oxydation de l'outil, décomposition des hydrocarbures du fluide de coupe (particules abrasives résultantes), etc....
- L'air ou fluide de coupe vont refroidir plus ou moins intensément la surface de l'outil, induisant ainsi des contraintes mécaniques internes pouvant conduire à des fissurations par fatigue thermomécanique.

Ces particularités des procédés à coupe interrompue entraînent la dégradation par écaillage : forme d'usure particulièrement difficile à maîtriser lorsqu'elle est prédominante.

L'intérêt de déposer un revêtement sur un outil va donc être de limiter l'influence des sollicitations suivantes : (figure : II.31)

- Adhésion entre la matière usinée et l'outil,
- Abrasion,
- Oxydation,
- Diffusion des composés de l'outil vers la matière usinée

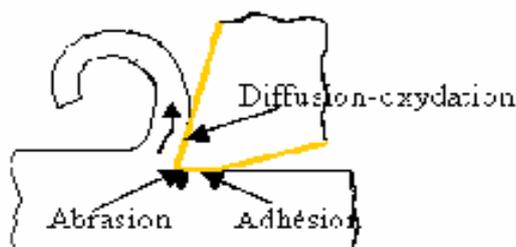


Fig. II.31. Zone de sollicitations du couple outil/matière [24].

En plus de ces propriétés, il est également possible de demander aux revêtements de :

- ✓ Limiter la quantité de chaleur transmise jusqu'au cœur de l'outil (barrière thermique en vue de garder les caractéristiques mécaniques),
- ✓ Rendre le mode d'usure en dépouille prépondérant afin de faciliter la maîtrise et la prédétermination des opérations d'usinage.

II.7.11. Propriétés recherchées chez un revêtement

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent se traduire par des objectifs opérationnels.

Ainsi, il est possible de demander au système substrat + revêtement de répondre au cahier des charges:

- ✓ Une ténacité élevée,
- ✓ Une parfaite adhésion sur le substrat,
- ✓ Une grande résistance à la formation et à la progression des fissures,
- ✓ Une dureté élevée,
- ✓ Une inertie chimique élevée,
- ✓ Une faible conductivité et diffusivité thermique,
- ✓ Une haute résistance à l'oxydation,
- ✓ Une épaisseur adéquate,
- ✓ Une fonction barrière de diffusion.

II.7.12. Les traitements structuraux et superficiels (traitements thermochimiques)

Ce type de traitements est largement utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux par diffusion dans leur masse d'éléments sur de faibles profondeurs (<100 µm).

Des atomes étrangers, formant des solutions solides le plus souvent interstitielles, distordent les réseaux cristallins et augmentent la dureté superficielle en créant des contraintes résiduelles de compression, ce qui améliore la résistance à la corrosion et à l'oxydation.

On distingue :

- ✓ La diffusion de métalloïdes, carbone, azote, soufre, bore par voie liquide (bains de sels) ou gazeuse et plus récemment, par bombardement ionique,

- ✓ La diffusion de métaux, aluminium et chrome notamment, qui améliore la résistance à l'oxydation à haute température.

II.7.12.1. La nitruration

La nitruration a été découverte en 1923 par un technicien de la firme Krupp qui, après avoir chauffé un acier dans une atmosphère d'ammoniac, observa une dureté superficielle anormalement élevée.

C'est un traitement thermochimique de diffusion consistant à enrichir superficiellement l'acier en azote. L'azote diffuse dans l'acier et forme, avec les éléments d'alliage, des nitrures très fins qui produisent un durcissement structural. La dureté de base des aciers rapides, généralement de l'ordre de 800 à 900 HV, s'accroît alors superficiellement pour atteindre des valeurs supérieures à 1200 HV. Les propriétés des couches nitrurées dépendent dans une large mesure de leur épaisseur et pour conserver une ténacité convenable aux outils en aciers rapides, il ne faut pas que la profondeur durcie excède 50 μm .

II.7.12.1.1. La nitruration par implantation ionique

La nitruration par implantation ionique fait partie des principaux procédés de nitruration appliqués aux outils en aciers. Ce procédé consiste à former autour des pièces à traiter un plasma contenant des ions réactifs qui, grâce à des tensions de quelques kV à quelques centaines de kV, viennent bombarder la surface de cette pièce.

Ce bombardement se traduit par un double effet :

- ✓ Chauffage des pièces par dissipation de l'énergie cinétique des ions en énergie calorifique,
- ✓ Implantation d'ions dans l'acier, fournissant dans notre cas, l'azote nécessaire à la formation de nitrures métalliques.

En pénétrant dans le matériau, l'ion incident va perdre son énergie cinétique dans des collisions électroniques et nucléaires induisant des phénomènes de freinage. Le freinage nucléaire a pour effet de mettre en mouvement les atomes du substrat, entraînant des collisions en chaînes qui désorganisent localement la structure cristalline du solide.

La répartition finale des ions étant le résultat d'un processus aléatoire, elle est bien représentée par la courbe de Gauss, caractérisée par la position R_p de son maximum et de sa

largeur à mi-hauteur $2\Delta R_p$ (Figure : II.32). Ces deux paramètres suffisent à caractériser, en première approximation, la pénétration d'un ion dans une cible.

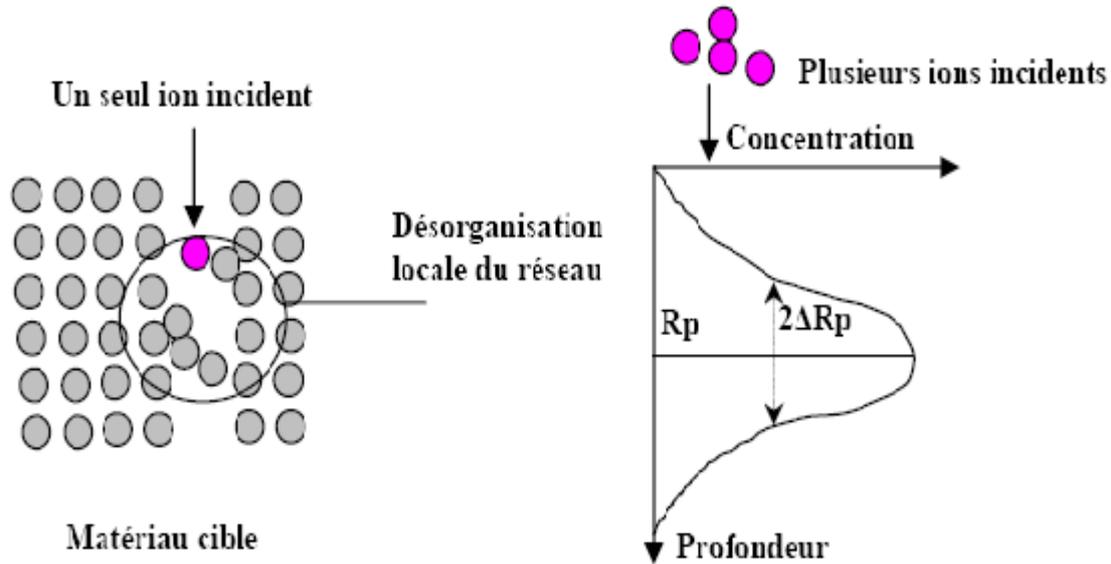


Fig. II.32. Principe de l'implantation ionique [24].

Les avantages de la nitruration par implantation ionique résident dans la possibilité de traiter des outils de très grandes dimensions et de conserver l'état de surfaces initial des outils, même les plus fines (poli spéculaire par exemple). Par ailleurs, il est possible, par le procédé de nitruration ionique, d'éviter, en contrôlant le procédé, la formation de la couche de combinaison (ou couche blanche) très fragile en surface.

Ceci étant, l'implantation s'accompagne d'un phénomène d'érosion ou pulvérisation de la surface si l'ion incident possède une énergie supérieure à celle de l'énergie de liaison des atomes du solide.

La nitruration ionique, tout comme les revêtements durs, confère aux outils et composants traités un meilleur comportement. En augmentant la dureté superficielle elle diminue la vitesse d'usure des surfaces traitées.

Cependant, cette technique de nitruration est unidirectionnelle et se prête mal aux exigences de la production industrielle sur des surfaces complexes. La forme simple des outils utilisés n'a donc pas été un obstacle à leur traitement. De plus, le coût de mise en œuvre d'une implantation ionique se répercute directement sur le coût des pièces produites, ce qui a limité l'application de cette technique à des industries à forte valeur ajoutée (nucléaire, microélectronique,...).

II.7.12.2. Système d'Implantation ionique par immersion plasma

II.7.12.2.1. Principe

Lors de l'implantation ionique, les ions sont accélérés par une grande énergie et sont projetés vers la surface de la pièce à traiter. Ce phénomène d'implantation d'ions engendre une modification de surface. Compte tenu du contrôle de la dose reçue par la pièce et de celui de l'épaisseur finale de la couche modifiée, l'implantation ionique est très utilisée pour le dopage de semi-conducteur.

Récemment, cette technique a été utilisée pour modifier les propriétés de surface de certains matériaux, comme par exemple l'amélioration de la résistance à l'usure d'alliages de titane.

L'implantation d'azote dans des outils en acier leur confère de bonnes propriétés vis-à-vis de l'usure. L'épaisseur de la couche modifiée peut atteindre plusieurs centaines d'Å lorsque l'énergie des ions est voisine de 100 keV [25].

Les avantages de l'implantation ionique sont :

- ✓ L'amélioration des propriétés de surface sans affecter les propriétés volumiques des matériaux,
- ✓ Pas de problème d'interface ou d'adhérence contrairement aux dépôts,
- ✓ Contrôle du processus assez simple durant l'implantation ionique.

Cependant, l'un des inconvénients majeurs de cette technique est son caractère directionnel, il est très difficile de traiter des objets 3D par ce procédé.

Dans le procédé d'implantation ionique par immersion plasma (PIII), la pièce à traiter est directement placée au sein d'un plasma. Des impulsions fortement négativement sont ensuite appliquées à la pièce. Durant le pulse de tension, une gaine plasma se forme autour de la pièce. Les ions positifs sont accélérés et projetés perpendiculairement à l'objet à traiter.

L'énergie des ions correspond à la tension appliquée.

II.7.12.2.2. Avantages de la PIII

- ✓ Le procédé est non-directionnel, les ions positifs frappent la surface simultanément sur toutes les faces. Ceci permet aussi de traiter facilement des pièces à géométrie complexe. La taille des pièces ne détermine pas le temps de traitement,
- ✓ Les pulses très courts ne permettent pas à la pièce de chauffer; ceci permet donc d'avoir une température de traitement peu élevée comparativement aux autres procédés de nitruration. Ce procédé est donc intéressant pour les matériaux thermosensibles,

- ✓ L'implantation ionique ne permet pas de créer des couches très épaisses, elles sont au maximum de l'ordre de 100 nm. Il est cependant assez simple de coupler le procédé PIII avec un procédé de dépôt classique tel que le CVD ou le PVD [25]

II.7.12.2.3. Inconvénients de la PIII

- ✓ Lors de l'implantation, aucune séparation de masse ne peut être effectuée; tous les ions positifs présents dans le plasma sont implantés. Il est néanmoins nécessaire que ces ions possèdent une énergie suffisante.
- ✓ En théorie, plus les pulses sont importants (très haute tension négative), meilleur sera l'implantation; en réalité, les tensions de travail sont limitées et il est ainsi très difficile d'implanter certains ions. Les tensions limites sont voisines de 100kV. En effet pour ces tensions élevées, le matériel serait trop coûteux et les risques d'amorçage d'arcs trop importants [25]

II.8. Conclusion

Il est bien évident que la modification de la nature des surfaces des outils d'usinage par l'application de revêtements durs en couches minces ou bien par des traitements thermo-chimiques améliore la durée de service de ceux-ci. Face au grand choix de matériaux durs ainsi qu'au nombre croissant de techniques de revêtement et de traitement thermo-chimique, il faut être sûr quant au choix des techniques ou matériaux qui seront les plus adéquats à satisfaire les besoins des industries.

Chapitre III

Approche expérimentale

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique afin de caractériser le comportement des outils avec des aciers.

Ce chapitre va consister en une présentation du matériel qui sert à l'étude de l'évolution de l'usure et du relevé de profil des plaquettes utilisées, et l'observation microscopique des plaquettes.

III.2. Présentation Du Matériel

Notre travail repose à la fois sur l'obtention de résultats expérimentaux et sur la mise en place d'outils pour le tournage d'aciers 42 Cr Mo 4 avec des plaquettes en carbure métallique de type TiN.

Les usinages ont été réalisés sur un tour parallèle conventionnel. Fig. III.1

De manière générale, un tour adapté à de l'usinage de matériaux doit présenter un certain nombre de caractéristiques :

- Faibles vibrations en usinage, donc une bonne rigidité et un bon amortissement en particulier pour le bâti,
- Précision et fiabilité des déplacements du chariot,
- Des jeux de broches et d'éléments mobiles aussi faibles que possible.

III.2.1. Machine D'essai



Fig. III.1 .tour parallèle conventionnel.

Le tour parallèle de puissance à la broche 25 KW a une gamme de vitesses comprise entre 80 et 2000 tour /mn.

III.2.2. Mesure de la rugosité des plaquettes

III.2.2.1. Machine de mesure

L'état d'usure des plaquettes généré pendant l'usinage est évalué à l'aide d'un rugosimètre, muni d'un enregistreur type PERTHOGRAPH C40, Fig (III .2).



Fig. III .2. PERTHOMETER

Le principe de la mesure de l'état de surface est le déplacement d'un palpeur sur la pièce comme montre la figure (III.3). Le déplacement transversal de la pointe détermine le profil de la surface de l'outil.

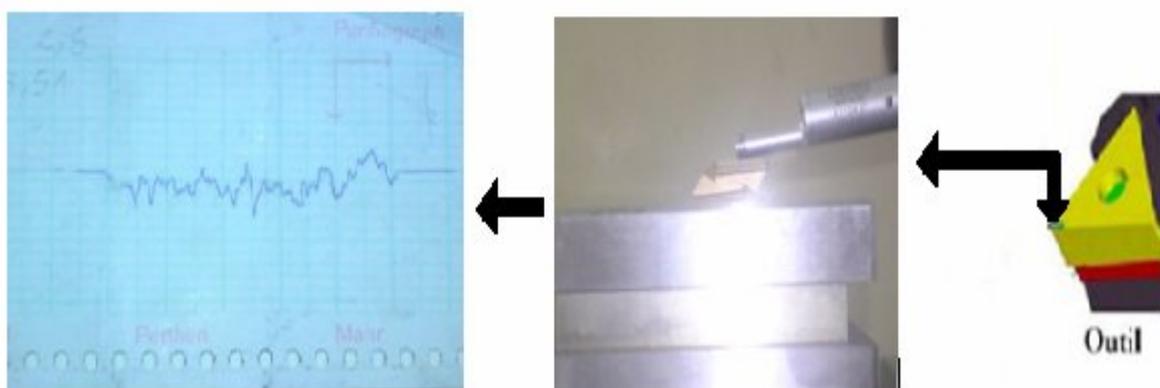


Fig. III .3. Méthodologie de mesure la rugosité.

III.2. 3. Plaquettes utilisées

La plaquette doit supporter les contraintes d'usinage dues aux duretés des matériaux des pièces usinées. Pour obtenir la résistance optimale, le rayon de bec doit être le plus grand possible minimisant ainsi les risques de rupture sous de fortes pressions.



Fig.III.4. Types de plaquettes utilisées.

La structure de plaquettes utilisées est donnée par la micrographie suivante (fig.III.5).

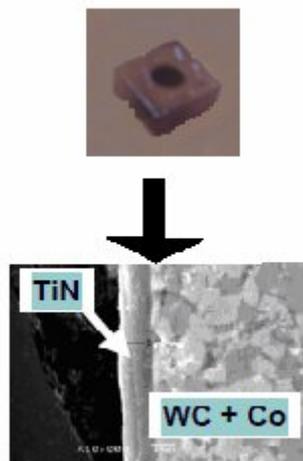


Fig.III.5. Structure des plaquettes utilisées.

En considérant l'ensemble des résultats à obtenir et des facteurs influents à priori, sur leur niveau, on peut établir un bilan récapitulatif :

Paramètres à tester :

- ✓ Vitesse de coupe,
- ✓ Résultats à observer :
- ✓ Effort,
- ✓ Suivi d'usure des plaquettes,
- ✓ Relevé de profil des plaquettes usées,

Le but du travail consiste à établir et quantifier les modes d'évolution de ces résultats en fonction de l'ensemble des paramètres recensés.

III.2.4. Matière à usiner

Acier pour traitements thermiques de caractéristiques suivantes :

UNI : 42 Cr Mo 4

Constitution du matériau testé :

C % entre 0,39 et 0,45.

Cr % entre 0,9 et 1,2.

Mo % entre 0,15 et 0,25.

III.3. Méthodologie d'essais

Les essais sont effectués en chariotage sur des éprouvettes cylindriques en acier (diamètre 20 mm et longueur 50 mm). On présente sur les figures suivante quatre (4) positions de notre travaille sur le tour.

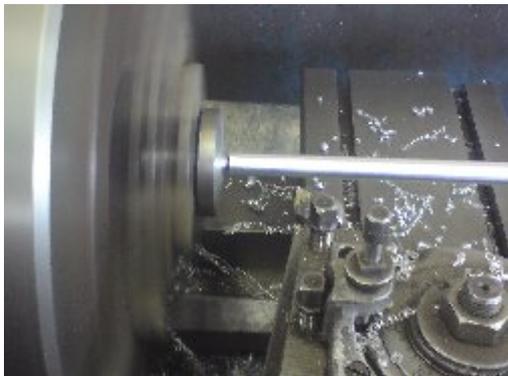


Fig III.7. Chariotage vue de face.



Fig III.8. Chariotage vue en dessus.



Fig. III.9. Chariotage vue à gauche.



Fig. III.10. Chariotage vue complète.

Les essais ont été menés avec les plus grandes précautions. La démarche générale des essais est la suivante :

- ✓ Mise en position de l'éprouvette sur le tour,
- ✓ Réglage de l'avance, de la profondeur de passe et choix de la plage de vitesse,
- ✓ Observation visuelle périodique des plaquettes utilisées (face de coupe, et la face de dépouille).

III.4. Mesure Du Profil De Plaquette

III.4.2. Techniques de mesures l'usure

III.4.2.1. Mesure avec un microscope optique

Le suivi de l'évolution de l'usure en dépouille est réalisé à l'aide d'un microscope optique (fig.III.11).



Fig. III.11 .Microscope optique pour la mesure de l'usure en dépouille.

III.5. Microscope a Balayage Electronique « MEB » :



Fig. III.12 : Microscope a balayage électronique « MEB ».

Chapitre IV
ANALYSES ET INTERPRETATION
DES RESULTATS
EXPERIMENTAUX

ANALYSES ET INTERPRETATION DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

IV. 1. Montage expérimentale matériaux et technique des mesures

IV. 1. 1. Description du montage expérimentale

IV. 1.1.1. Spécification

Tous les essais ont lieu en coupe orthogonale en chariotage en deux parties ;

- D'une part, étude de comportement des outils, en particulier l'usure et la rupture, sous certaines conditions de coupe telle que la vitesse de coupe, la profondeur de coupe, le temps de coupe à la pointe de l'outil
- D'autre part, les analyses des surfaces en contacts outils pièce sur microscope à balayage électronique (MEB) et sur le rugosimètre mécanique ont été effectuées.

En outre ces essais sont établis selon la spécification des normes AFNOR. Ces spécifications sont relatives aux pièces à usiner à l'outil, à l'équipement, à un mode opératoire des essais et au mode d'enregistrement et de mesure.

IV. 1. 1.2. Méthodes et mesures de la rugosité

Les processus d'usure ainsi que les opérations affectent la topographie des surfaces des outils de coupe qui peut avoir une influence considérable sur leurs fonctions. Ceci a conduit au développement et à la construction de plusieurs modèles d'instrumentation de mesures pouvant caractériser cette topographies et parmi lesquelles on cite essentiellement :

- les méthodes mécaniques
- les méthodes optiques
- les méthodes pneumatiques

De ce fait, nous avons utilisé la méthode la plus utilisée à l'échelle industrielle et aux laboratoires, c'est un profilomètre mécanique

On a abordé la partie expérimentale sur la mesure de l'usure en dépouille (V_b) des plaquettes en carbure métallique revêtu TIN et non revêtu avec le contrôle de la rugosité des surfaces des outils pour différents régimes de coupe.

IV. 1.1.3. Procédure expérimentale

Nous avons effectué les différentes mesures de l'usure en dépouille (V_b) et de la rugosité (R_a) (rugosité arithmétique), Notre travail s'applique à l'usinage de l'acier **42C_r Mo 4** avec des outils en carbure métallique sans revêtement et avec revêtement l'outil est recouvert d'une couche de quelques micromètres de carbure de Titane.

IV.1.1.3.1. Outil de coupe

L'outil de coupe utilisé est un outil à plaquette amovible. Les plaquettes utilisées sont des plaquettes en carbure métallique non revêtues et revêtues TIN.

IV.2.Evaluation de rugosité pour les deux types de plaquette

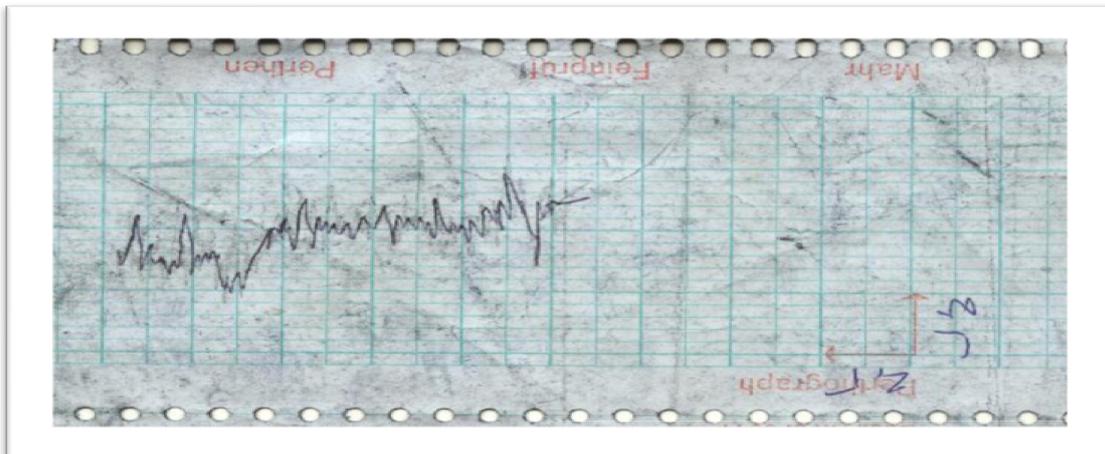


Fig. IV. 1.a) profil de rugosité de plaquette non revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a=0,2$ mm/tr, $p=0,2$ mm, $V_c= 180$ m/mn, $T=15$ mn.

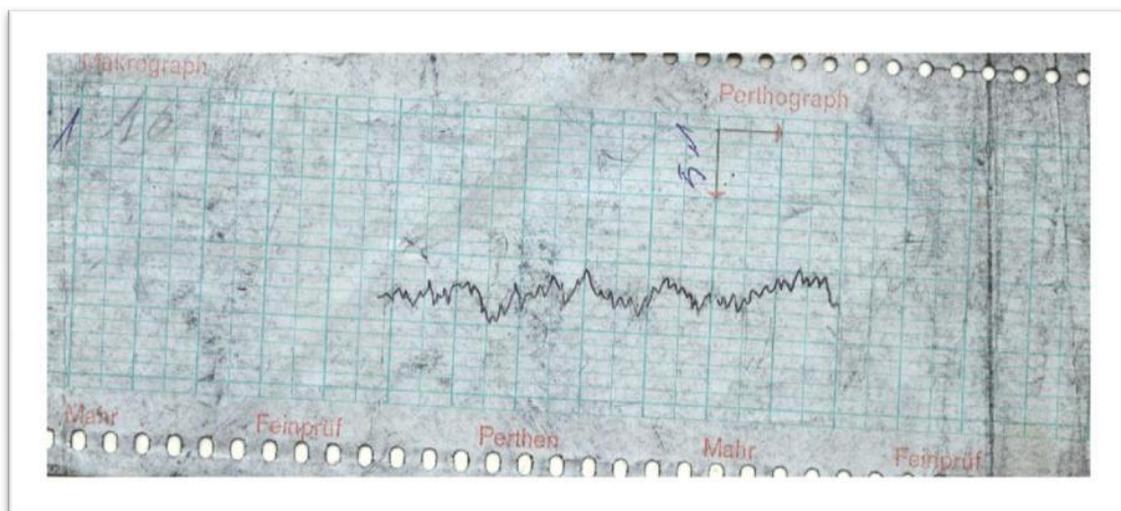


Fig. IV. 1. b) profil de rugosité de plaquette non revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a=0,2$ mm/tr, $p=0,2$ mm, $V_c= 220$ m/mn, $T=30$ mn.

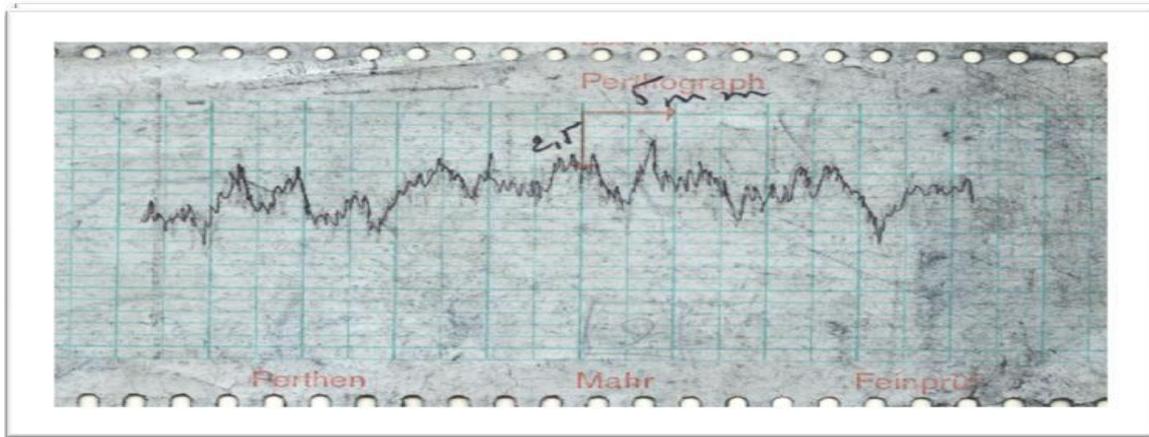


Fig. IV. 1.c) profil de rugosité de plaquette non revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 260$ m/mn, $T = 45$ mn.

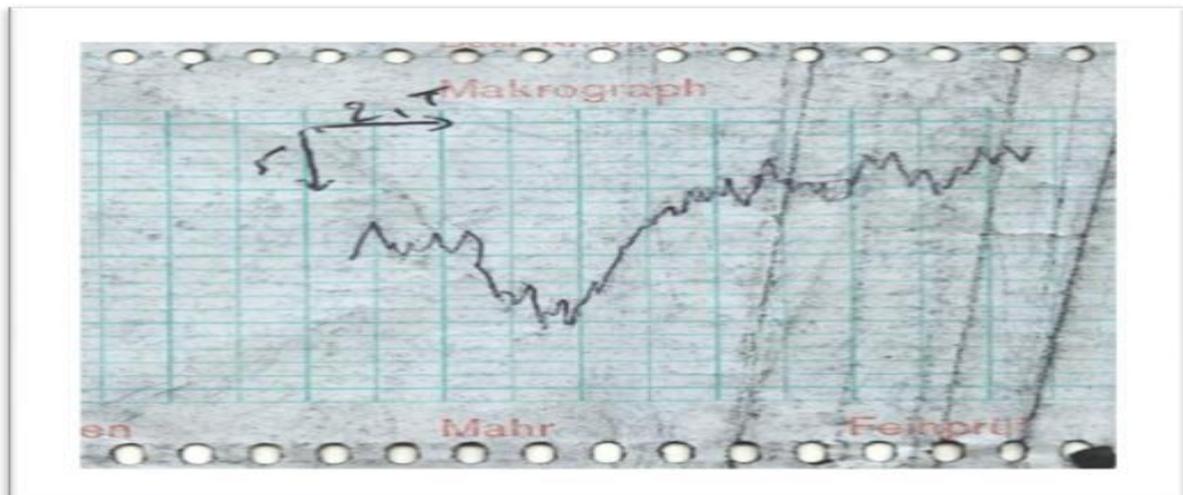


Fig. IV. 1.d) profil de rugosité de plaquette non revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 300$ m/mn, $T = 60$ mn.

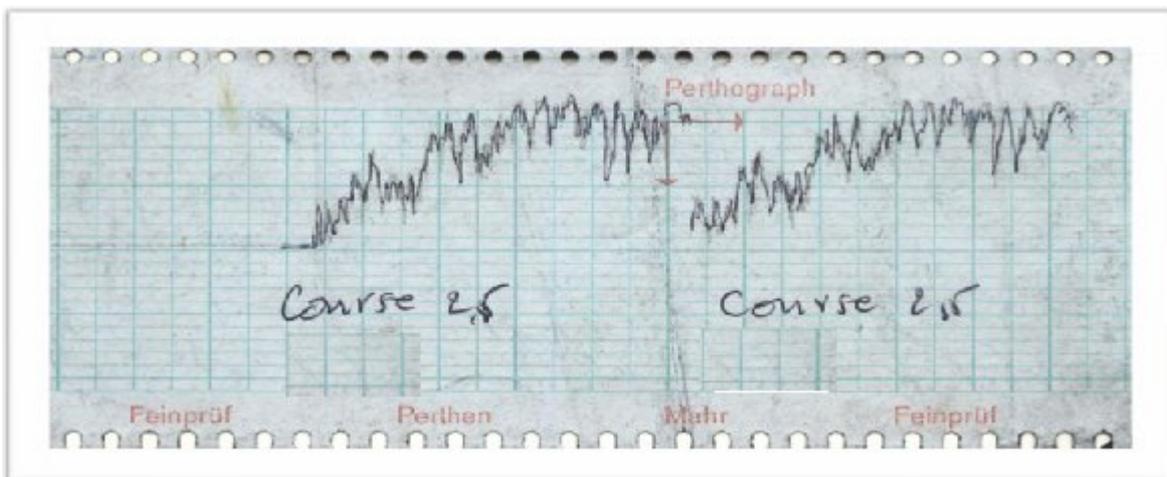


Fig. IV. 1. e) profil de rugosité de plaquette non revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 180$ m/mn, $T = 75$ mn.



Fig. IV. 1. f) profil de rugosité de plaquette non revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p = 0,2 \text{ mm}$, $V_c = 220 \text{ m/mn}$, $T = 90 \text{ mn}$.

Fig. IV. 1. Evaluations de Rugosité des plaquettes non revêtu sur le rugosimètre mécanique pour différentes régimes de coupe.

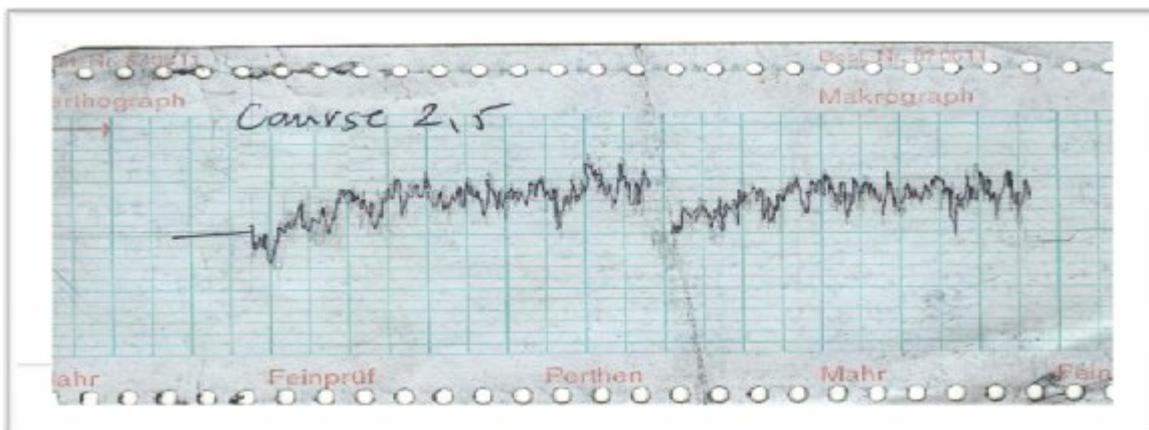


Fig. IV.2. a) profil de rugosité de plaquette revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p = 0,2 \text{ mm}$, $V_c = 180 \text{ m/mn}$, $T = 90 \text{ mn}$.

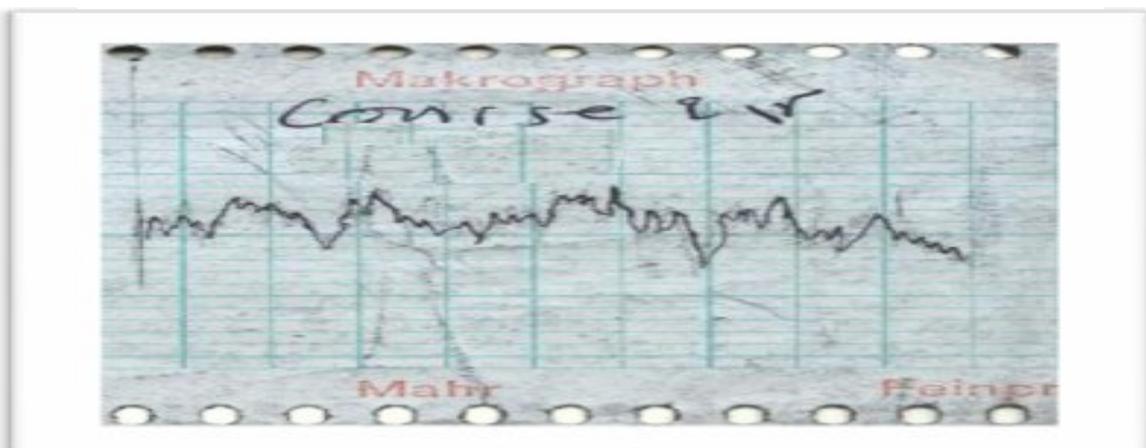


Fig. IV.2. b) profil de rugosité de plaquette revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p = 0,2 \text{ mm}$, $V_c = 220 \text{ m/mn}$, $T = 45 \text{ mn}$.

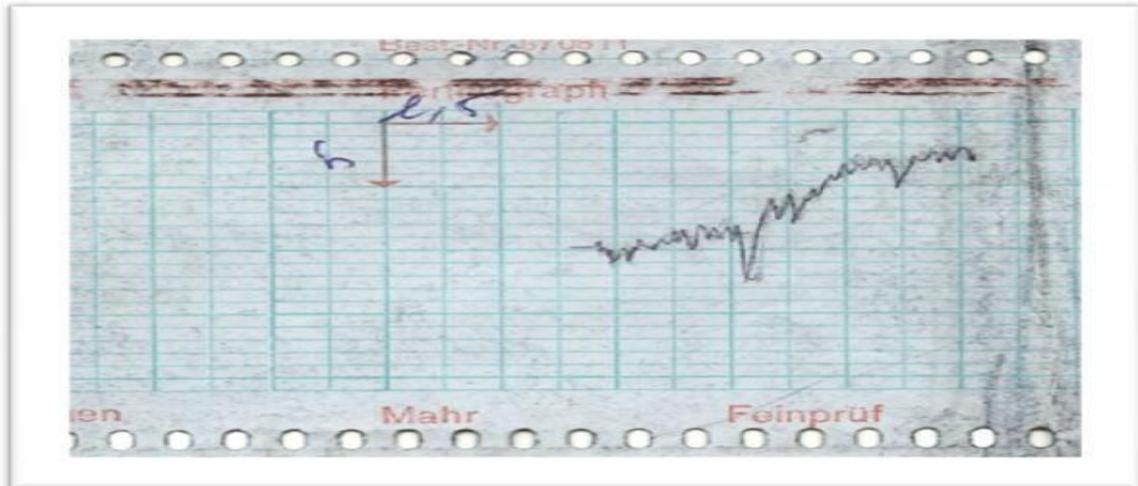


Figure IV.2.c) profil de rugosité de plaquette revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 260$ m/mn, $T = 60$ mn.

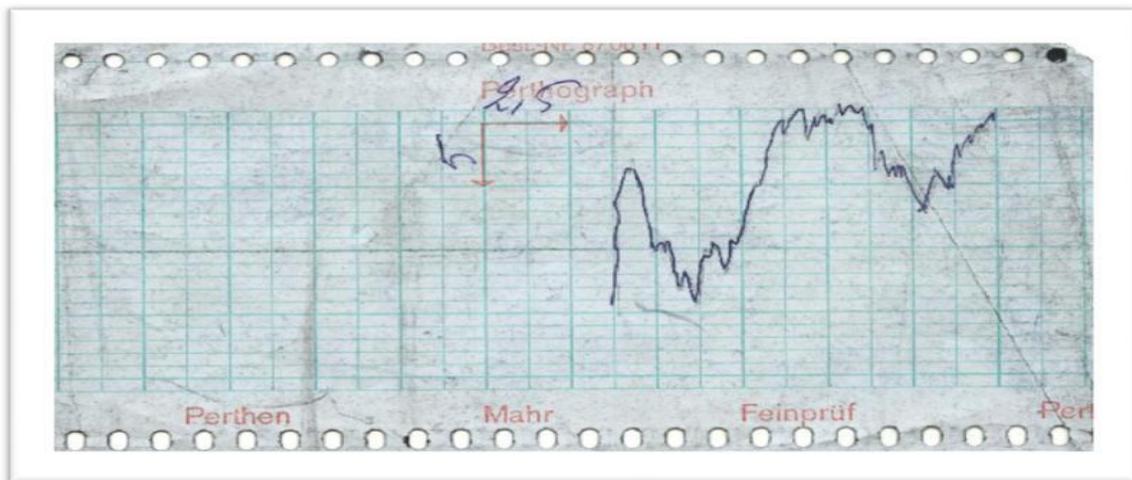


Fig. IV.2.d) profil de rugosité de plaquette revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 300$ m/mn, $T = 90$ mn.

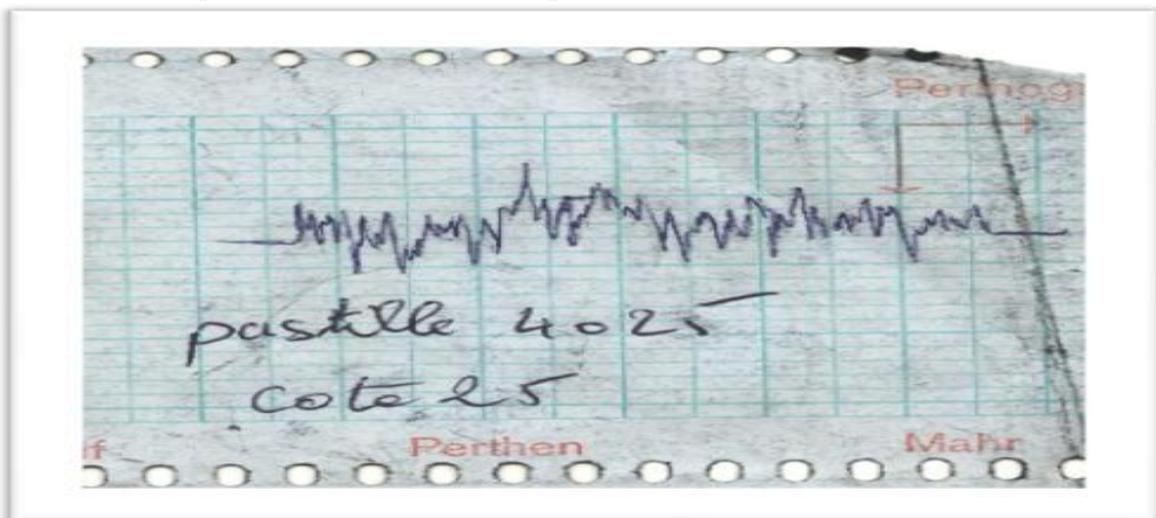


Fig.IV.2. e) profil de rugosité de plaquette revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 180$ m/mn, $T = 75$ mn.

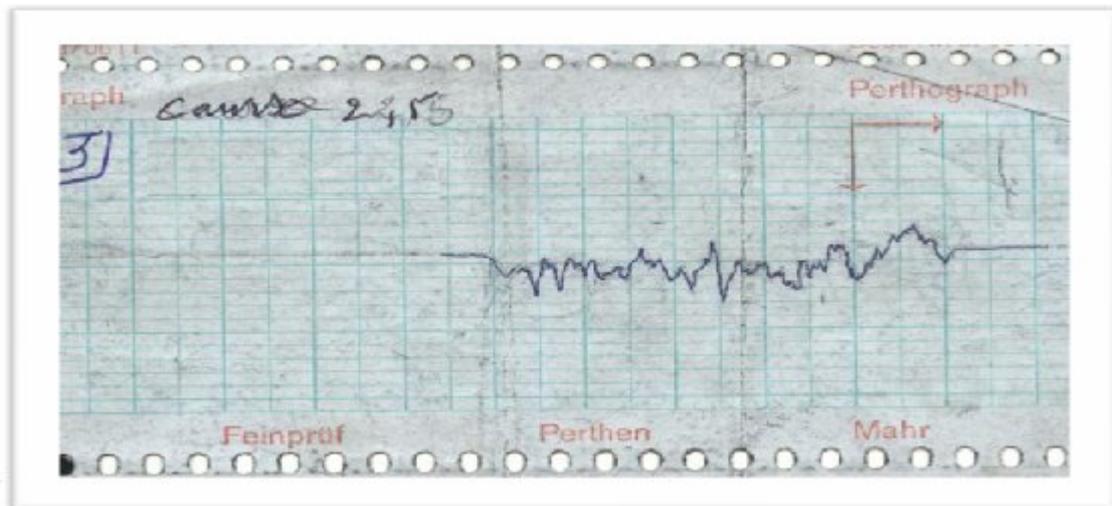


Fig. IV.2. f) Profil de rugosité de plaquette revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 220$ m/mn, $T = 30$ mn.

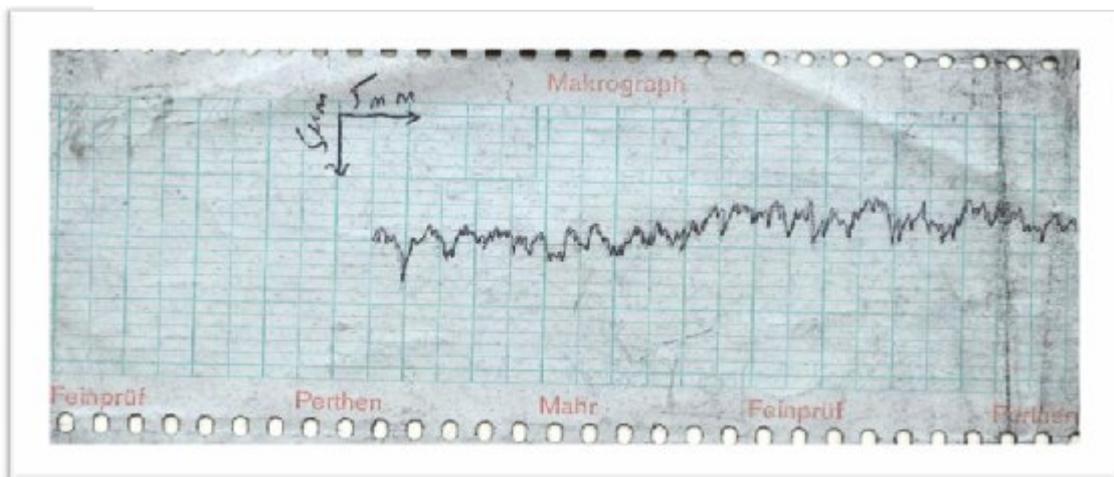


Fig. IV.2. g) profil de rugosité de plaquette revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 180$ m/mn, $T = 15$ mn.



Fig. IV.2. h) profil de rugosité de plaquette revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 220$ m/mn, $T = 60$ mn.

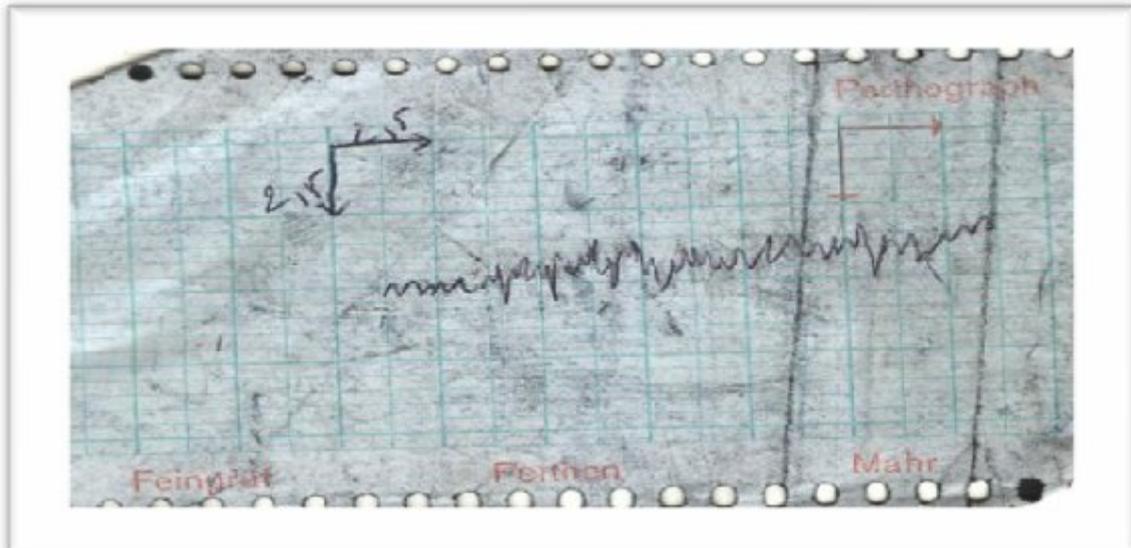


Fig. IV.2.i) profil de rugosité de plaquette revêtu avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0.2 \text{ mm/tr}$, $n = 0.2 \text{ mm}$, $V_c = 260 \text{ m/mn}$, $T = 90 \text{ mn}$.

Fig. IV.2. Évaluations de la rugosité des plaquettes revêtues sur le rugosimètre mécanique pour différents régimes de coupe.

IV.3. Plaquette revêtu de carbure de Titane

IV. 3. 1. Variation de l'usure en fonction de temps

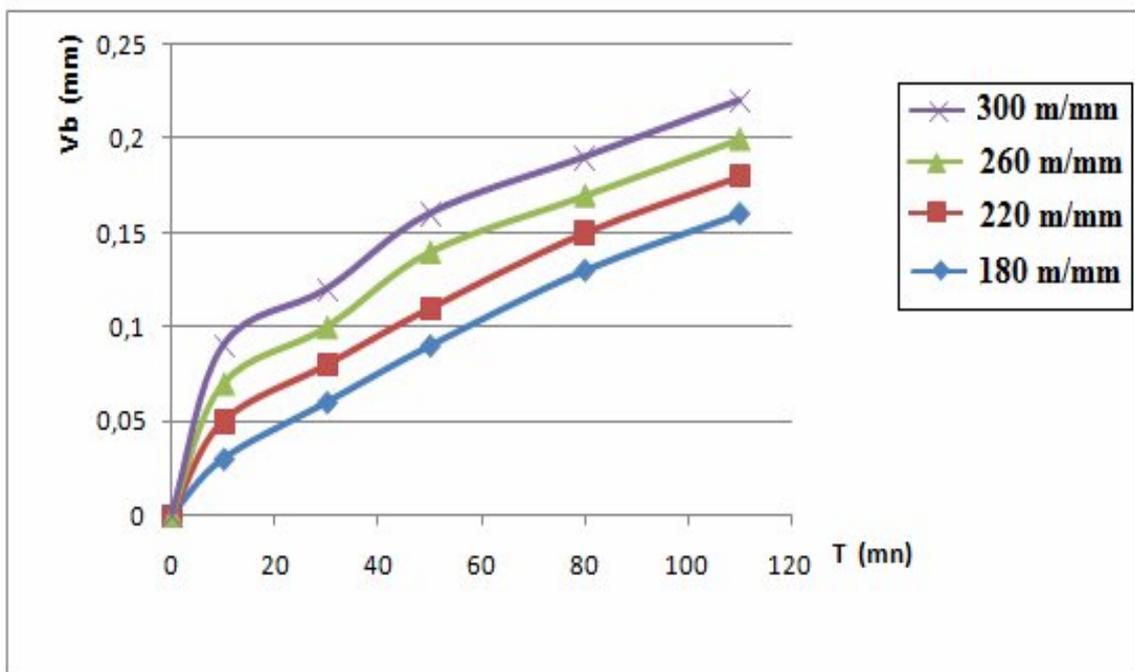


Fig.IV. 3. usure frontale V_b en fonction du temps, sur $42\text{CrMo}4$ outils revetu TIN avec le paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p = 0,2 \text{ mm}$.

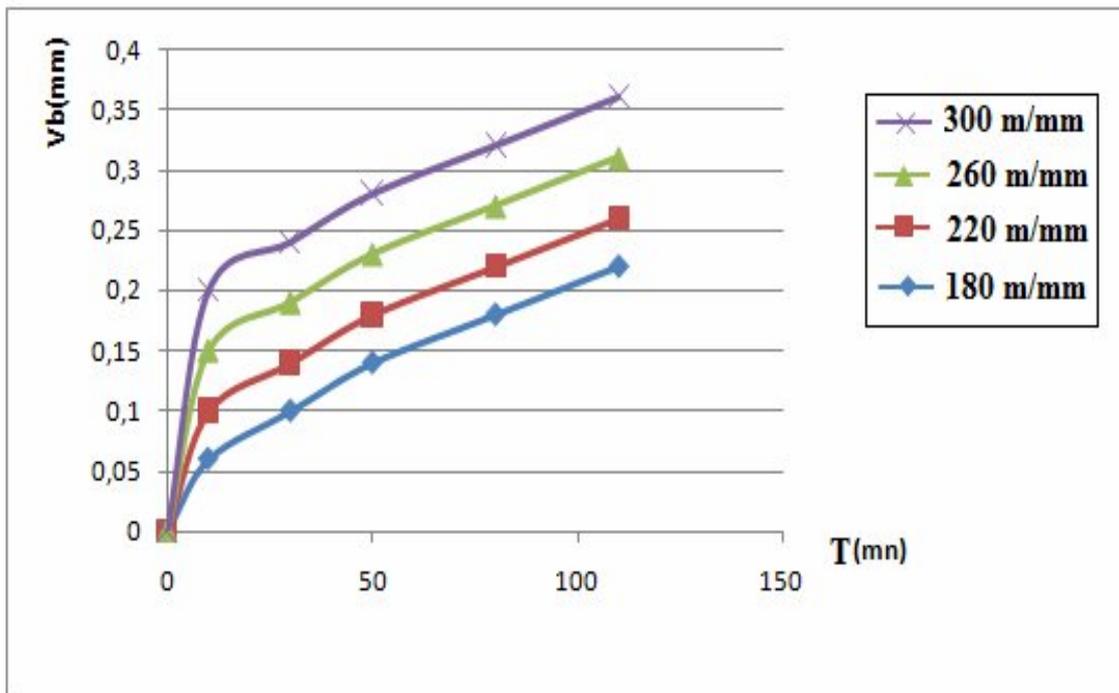


Fig.IV. 4 . usure frontale V_b en fonction du temps, sur 42CrMo4 outils en carbure de tungstène TiN avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,4$ mm.

IV. 3. 1. 1. commentaires des courbes tracées

Nous avons tracé sur la figure (IV. 3) ,(IV. 4) la variation de l'usure frontale V_b en fonction de temps de coupe pour les différentes vitesses de coupe chaque courbe tracée fait apparaître une pointe d'inflexion caractéristique.

Ainsi, la plaquette est sous contrainte mécanique dès qu'elle commence la coupe et aussi longtemps que la coupe dure. L'importance et la direction des forces de coupe varient cependant ces variations provoquent ainsi des criques principalement parallèles à l'arête de coupe. Des variations des températures se produisant parce que l'arête de coupe s'échauffe pendant la coupe et qu'elle se refroidit en dehors de celle-ci. Cet effet d'échauffement et de refroidissement engendre des contraintes thermiques qui provoquent des criques thermiques perpendiculaires à l'arête de coupe.

IV.3.2. Variation de la rugosité en fonction l'usure en dépouille avec plaquette revêtue

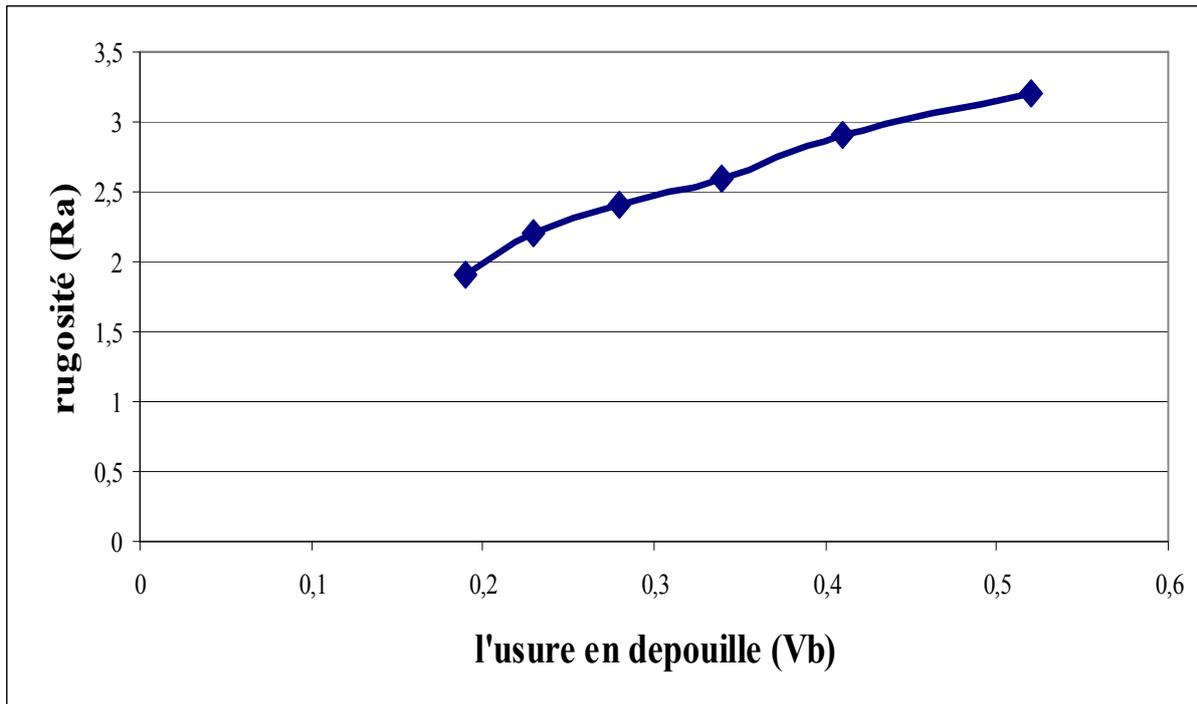


Fig. IV.5 .Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille avec plaquette revêtue TIN pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 180$ m/mn.

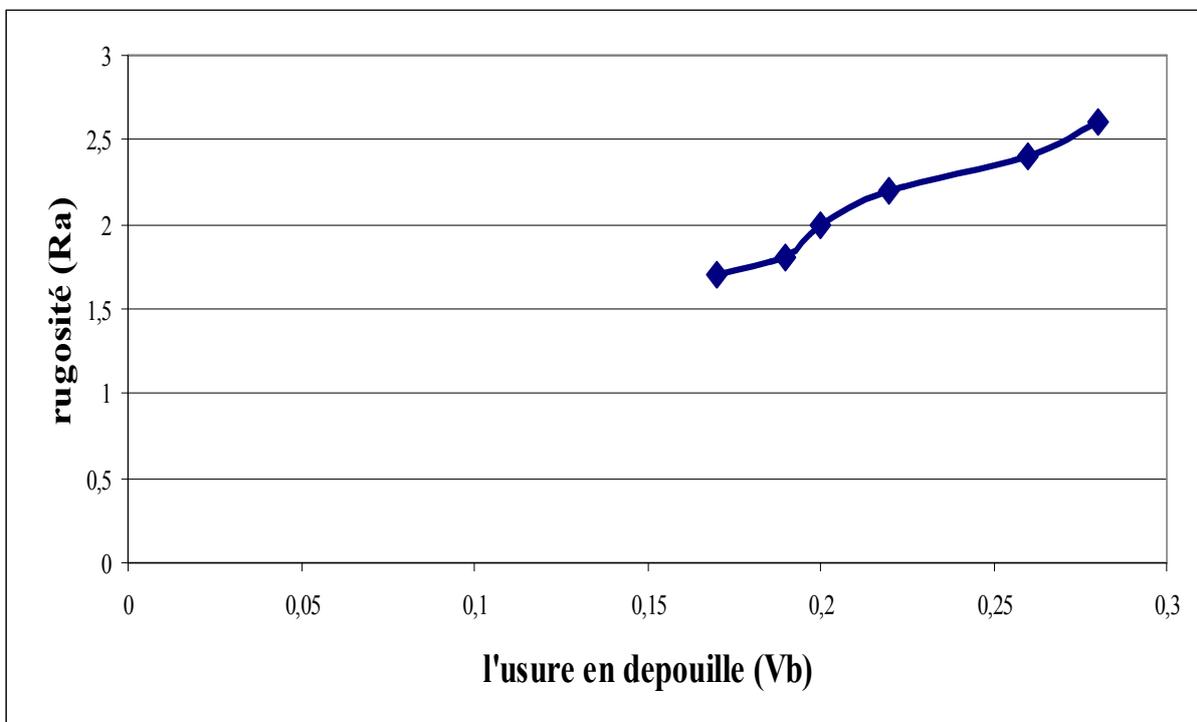


Fig. IV.6 .Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille avec plaquette revêtue TIN pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec les paramètres de coupe suivants: $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 220$ m/mn.

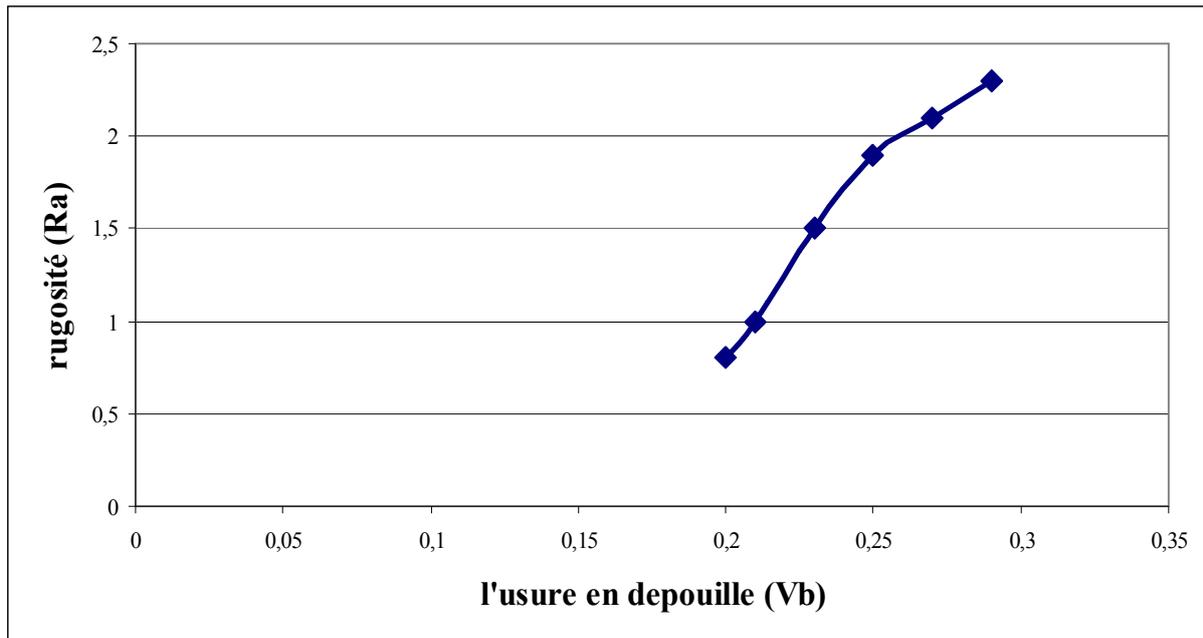


Fig. IV.7. Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille avec plaquette revêtue TIN pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2\text{mm/tr}$, $p=0,2\text{ mm}$, $Vc= 260\text{m/mn}$.

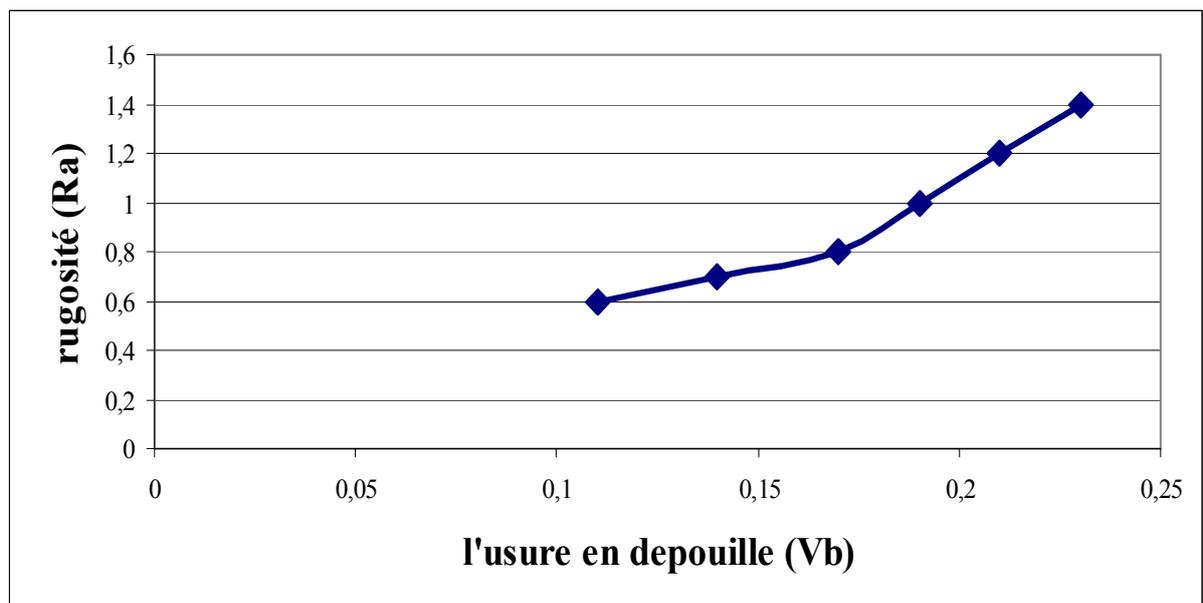


Fig. IV. 8. Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille avec plaquette revêtue TIN pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, $a = 0,2\text{ mm/tr}$, $p=0,2\text{ mm}$, $Vc=300\text{m/mn}$.

Les courbes représentées par les figures ; (IV.5) ; (IV.6) ; (IV.7) ; (IV.8) montrent l'augmentation de la rugosité (Ra) en fonction de l'usure pour le chariotage à vitesses de coupe élevées, on remarque que le carbure revêtu donne un bon état de surface avec une valeur d'usure minimale par rapport à celle donnée par l'outil non revêtu,

On remarque que Lorsque l'usure Vb augmente, la surface de contact entre l'outil et la pièce s'agrandit, ce qui augmente ainsi la rugosité (Ra) de la pièce.

IV. 3. 3 .Variation de la rugosité en fonction de la vitesse d'usinage

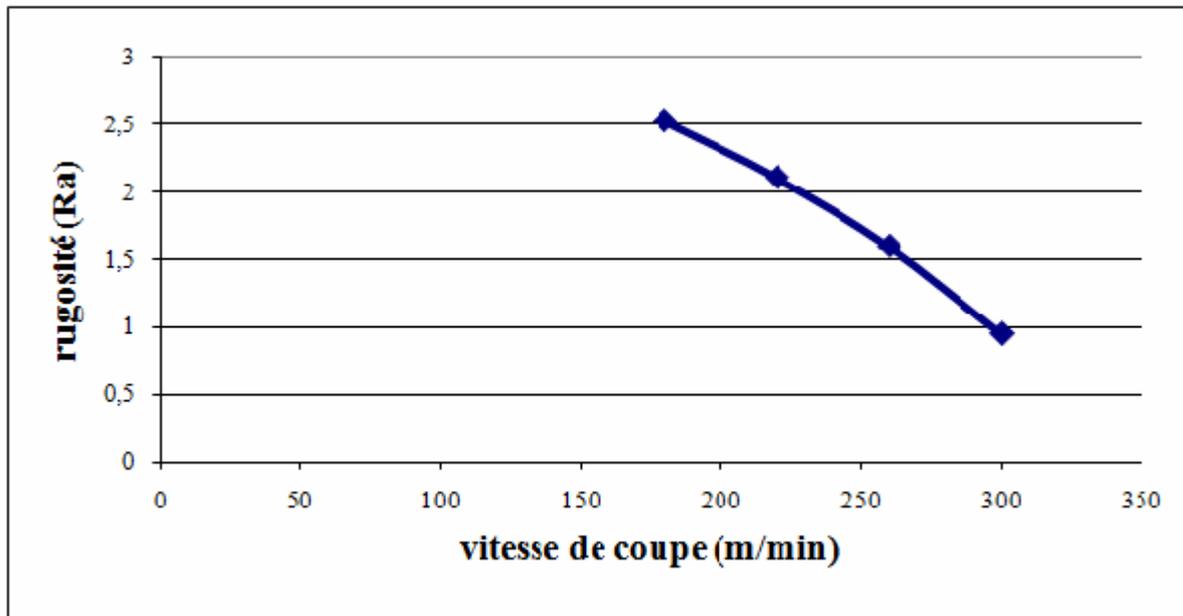


Fig. IV.9 .Variation de la rugosité (Ra) en fonction de la vitesse de coupe (Vc) pour l'usinage de l'acier 42C_r Mo 4, avec plaquette revêtue $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p = 0,2 \text{ mm}$.

La courbe représentée par la figure (IV.9) montre l'évolution de la rugosité (Ra) en fonction de la vitesse de coupe Vc. On remarque que la rugosité (Ra) diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe (Vc).

IV.3.4. Evolution de la rugosité en fonction de temps

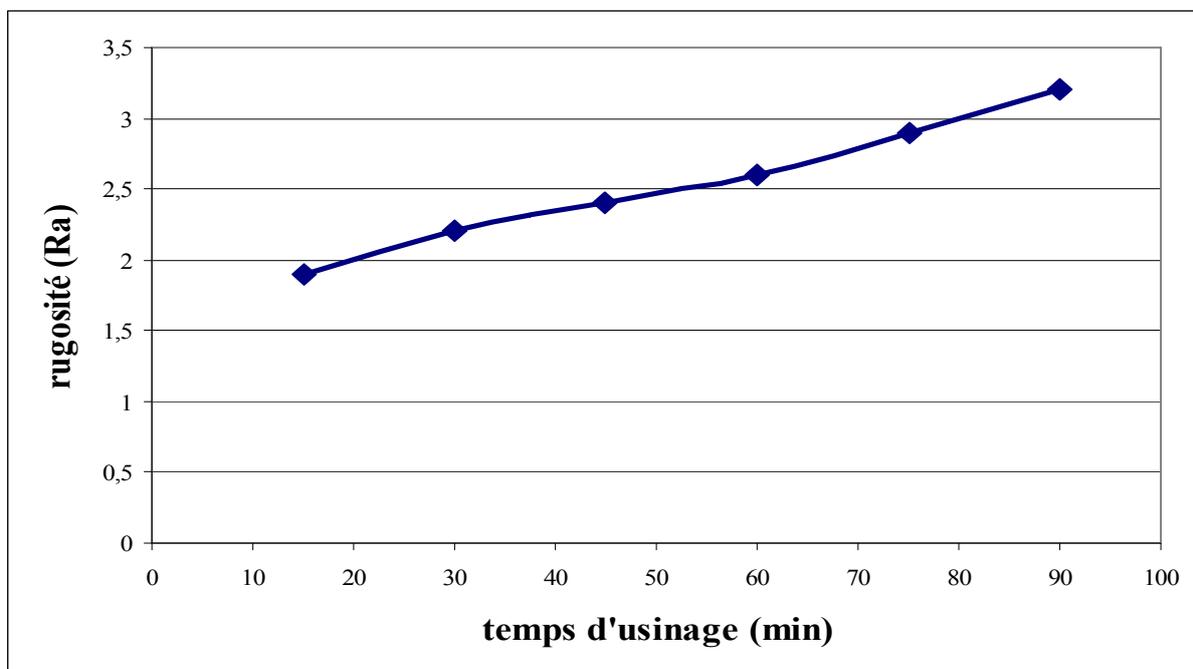


Fig. IV.10. Variation de la rugosité en fonction du temps pour l'usinage de l'acier 42C_r Mo 4, avec plaquette revêtu TIN, $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p = 0,2 \text{ mm}$, $V_c = 180 \text{ m/mn}$.

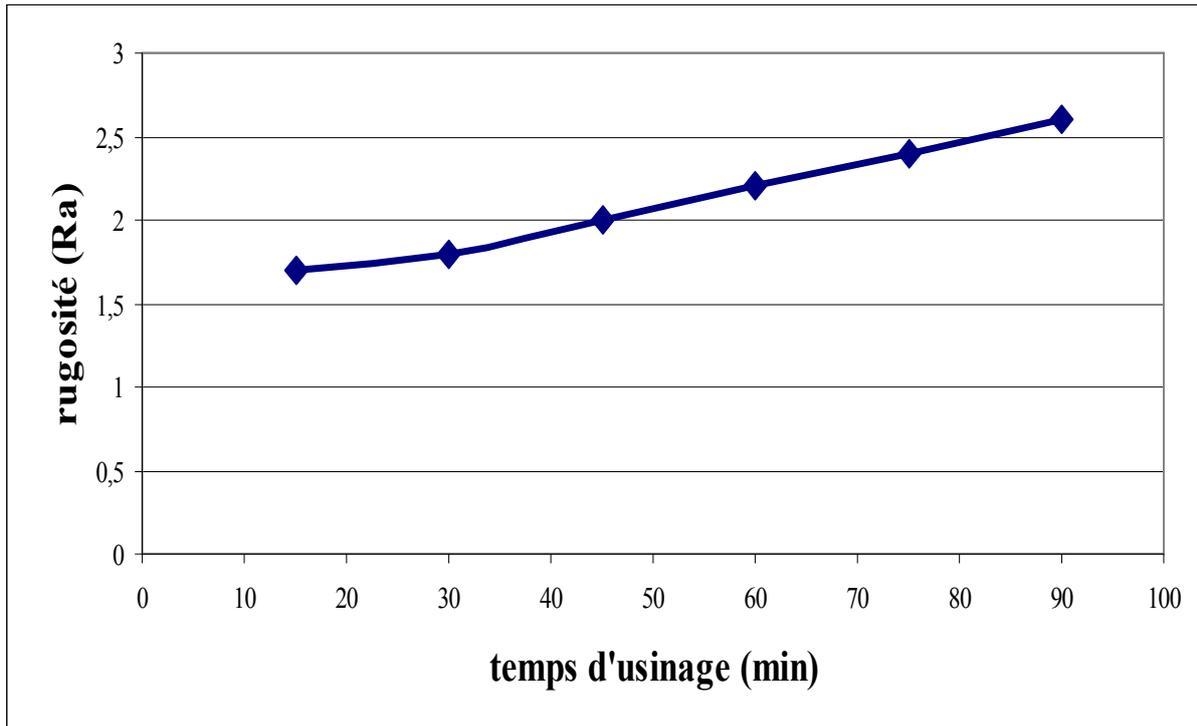


Fig. IV.11. Variation de la rugosité en fonction du temps pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec plaquette revêtu TIN, $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 220$ m/mn.

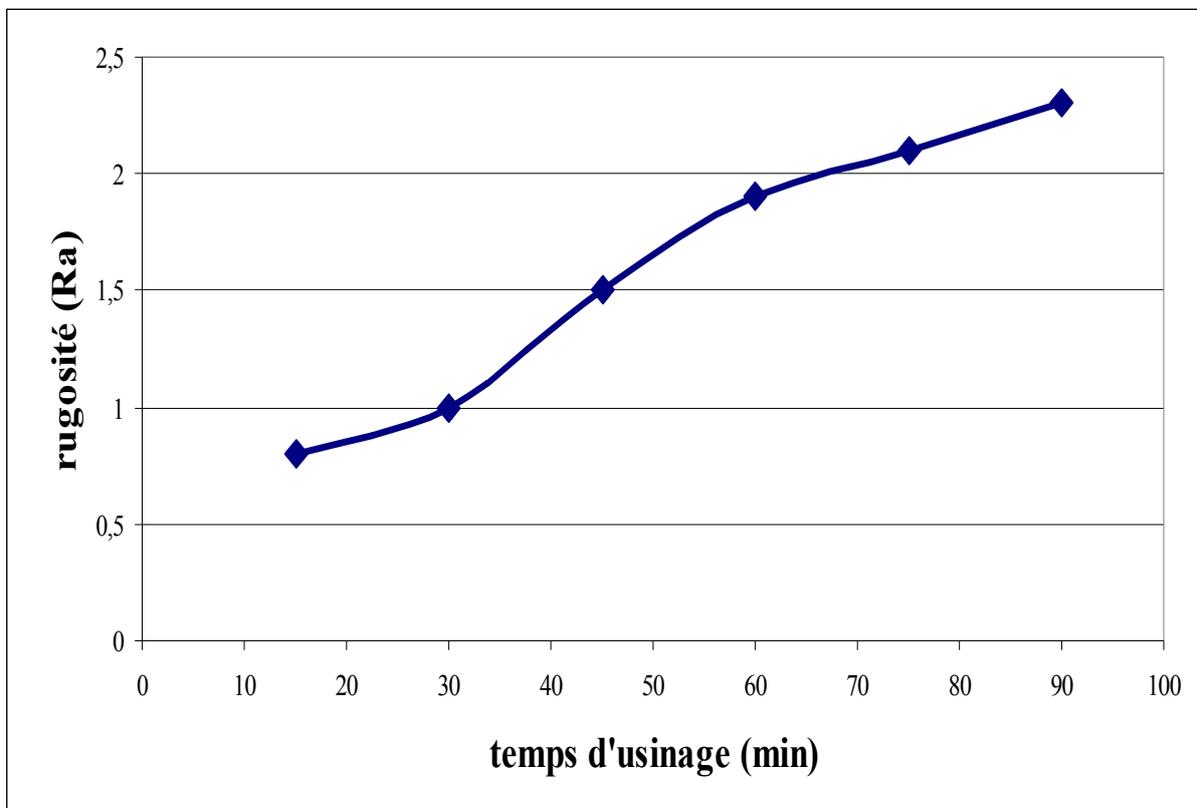


Fig. IV.12. Variation de la rugosité en fonction du temps pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, avec plaquette revêtu TIN, $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 260$ m/mn.

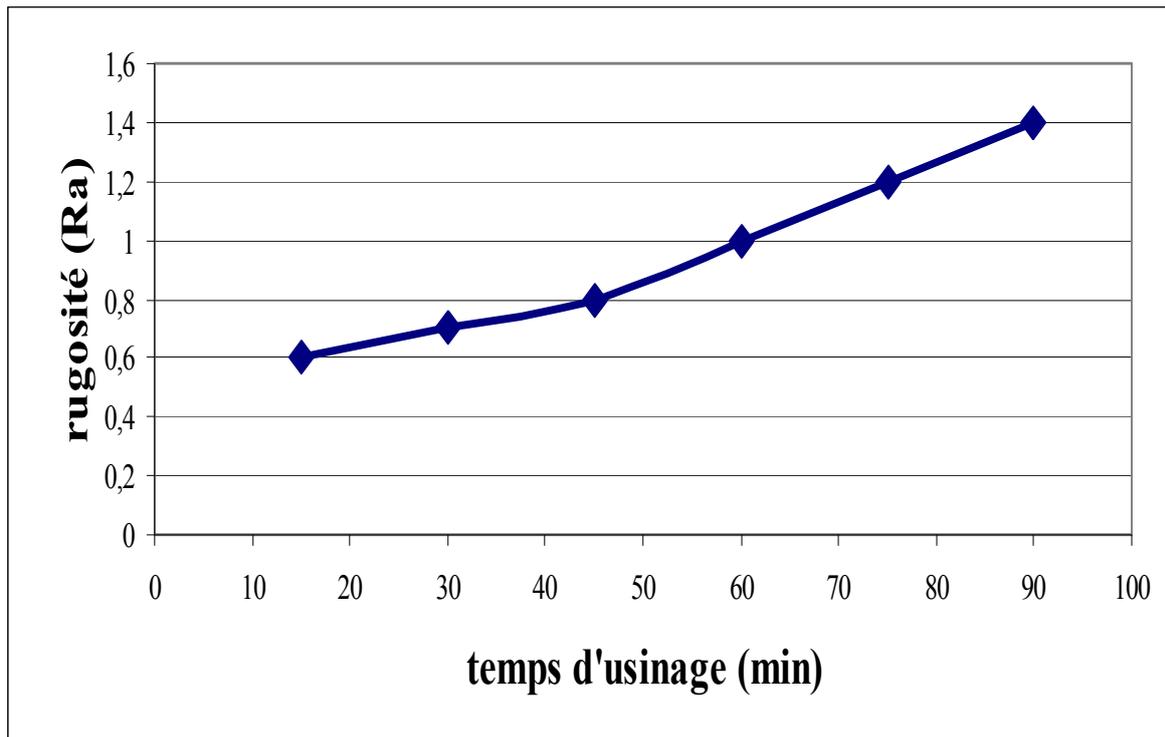


Fig. IV.13. Variation de la rugosité en fonction de temps pour l'usinage de l'acier 42Cr Mo 4, plaquette revêtu TIN, $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 300$ m/mn.

IV. 4. Plaquette non revêtue

IV. 4.1. Variation de l'usure en fonction de temps

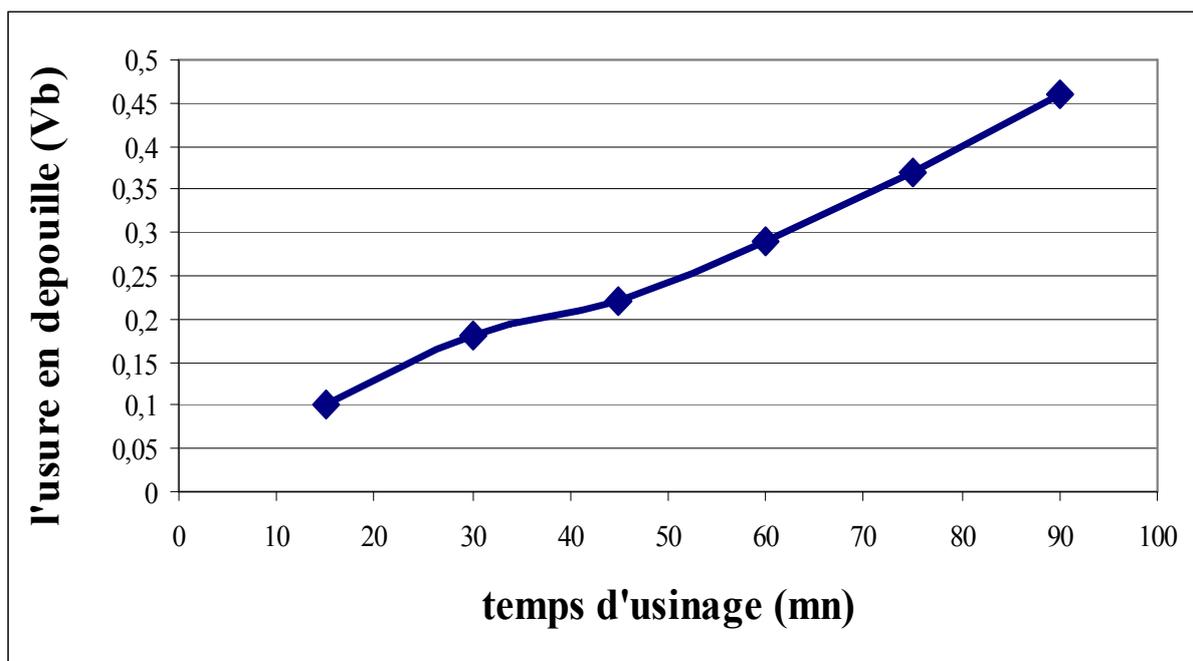


Fig. IV.14. Variation de l'usure (Vb) en fonction du temps de coupe (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 180$ m/mn.

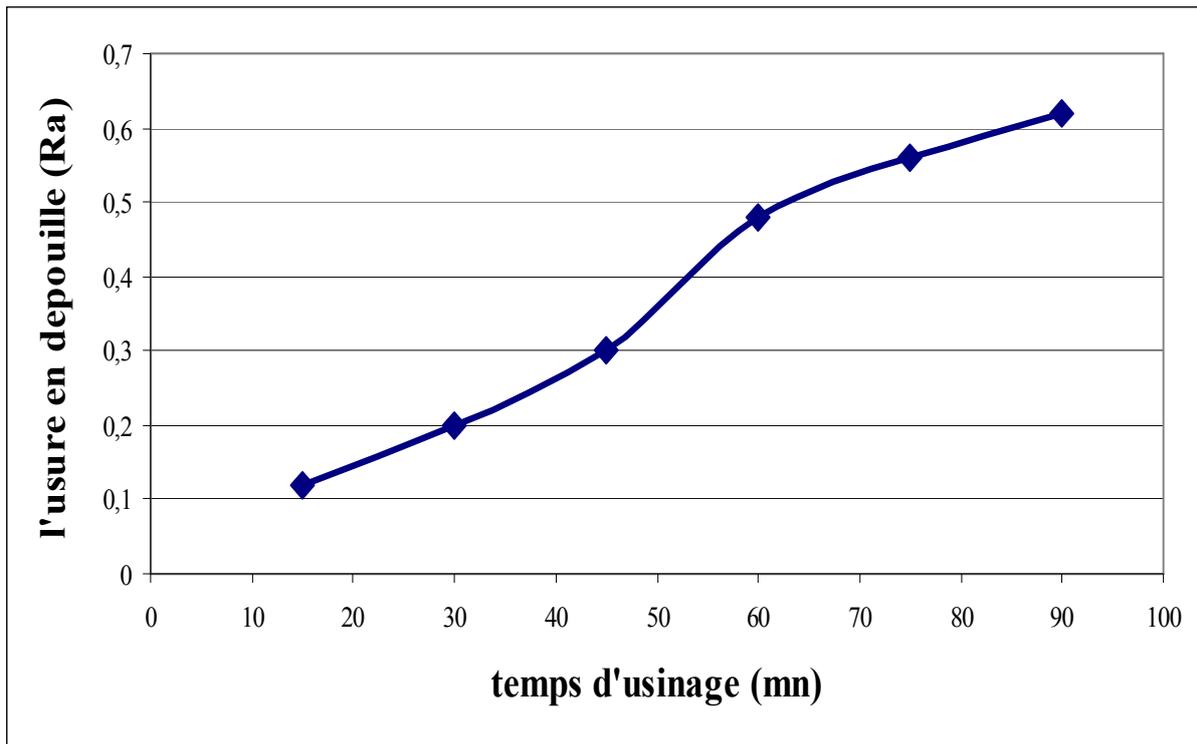


Fig. IV.15 .Variation de l'usure (Vb) en fonction du temps de coupe (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 220$ m/mn.

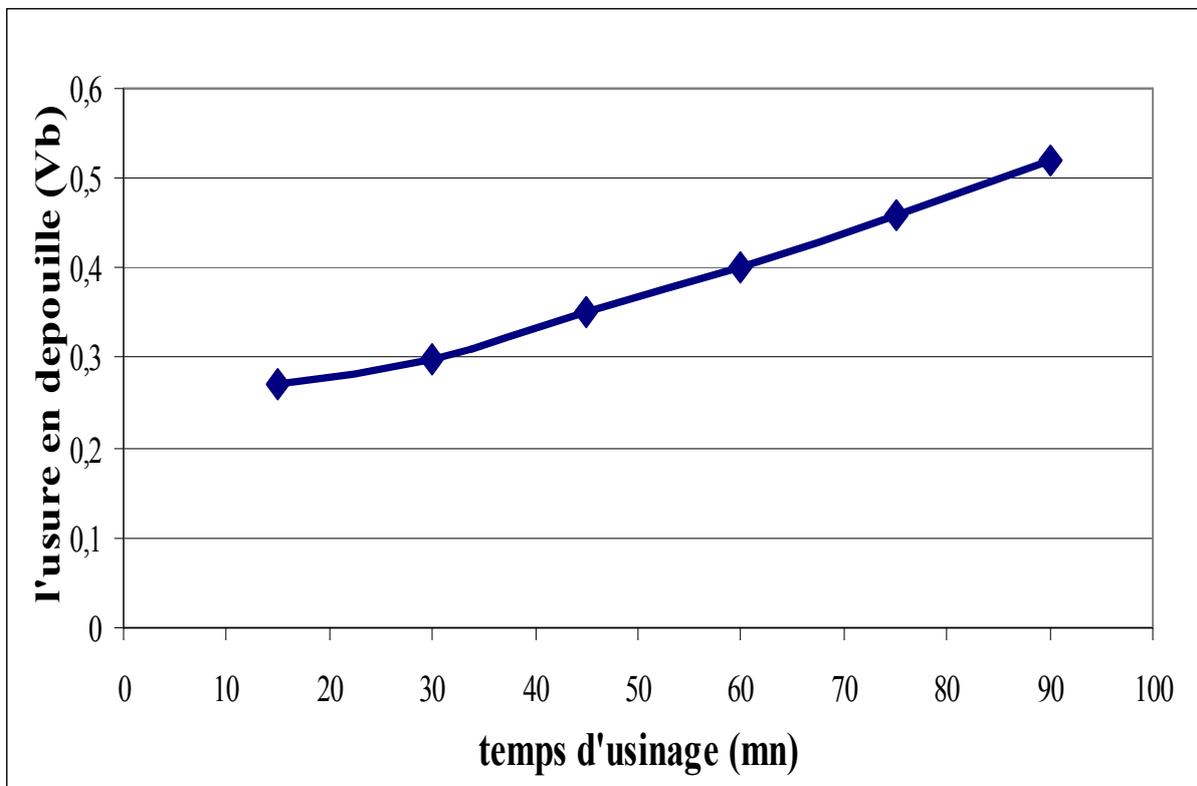


Fig. IV.16. Variation de l'usure (Vb) en fonction du temps de coupe (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 260$ m/mn.

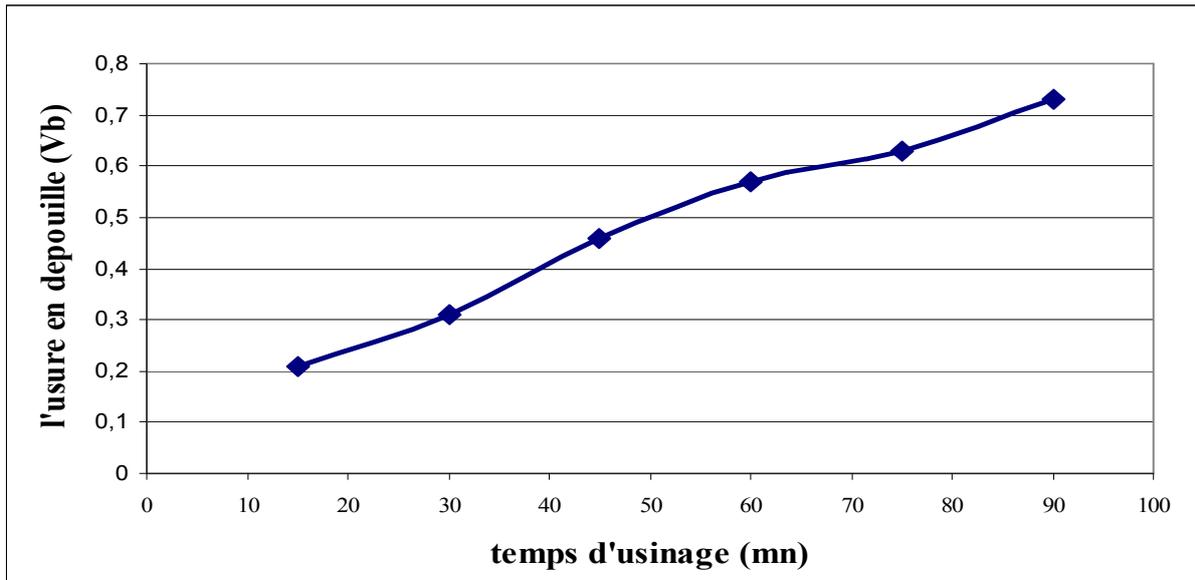


Fig. IV.17. Variation de l'usure (Vb) en fonction du temps de coupe (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a=0,2$ mm/tr, $p=0,2$ mm, $V_c=300$ m/mn.

Les courbes représentées dans les figures (IV.14) ; (IV.15) ; (IV.16) ; (IV.17) montrent la variation de l'usure en dépouille (Vb) en fonction du temps (t) de coupe pour différentes vitesses de coupe lors du chariotage de l'acier à l'aide de plaquette en carbure non revêtue. On remarque que l'usure Vb pour un temps d'usinage constant pour la plaquette non revêtue est maximum

IV. 4.2. Variation de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille

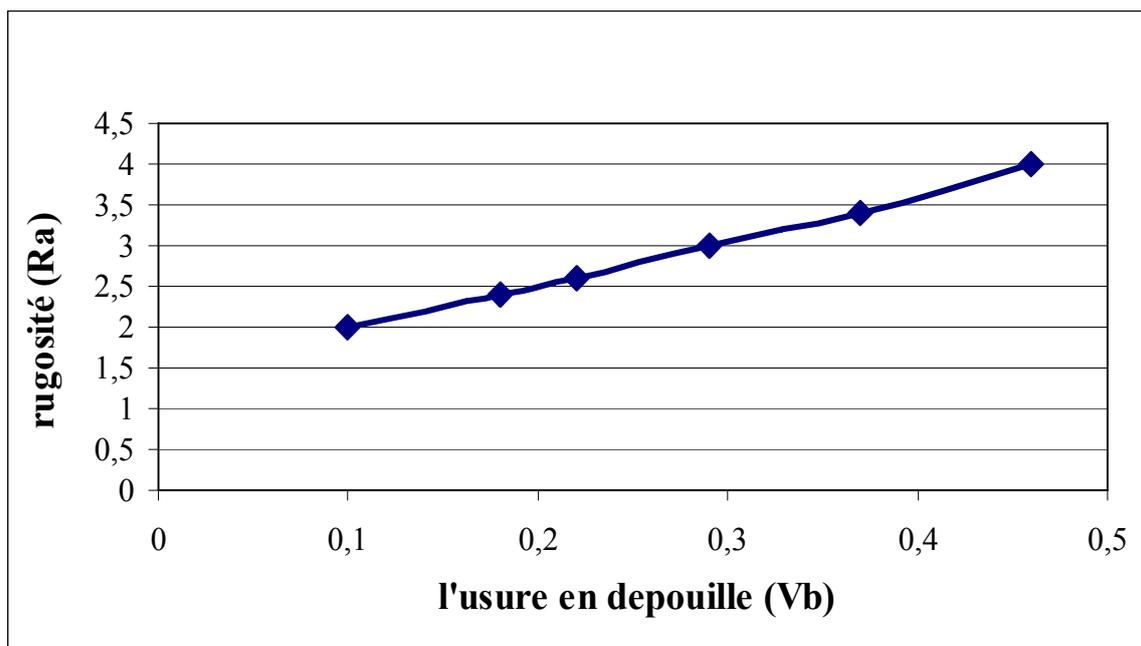


Fig. IV.18. Variation de la rugosité (Ra) en fonction de l'usure en dépouille (Vb) avec plaquette non revêtue, avec les paramètres de coupe suivante : $a=0,2$ mm/tr, $p=0,2$ mm, $V_c=180$ m/mn.

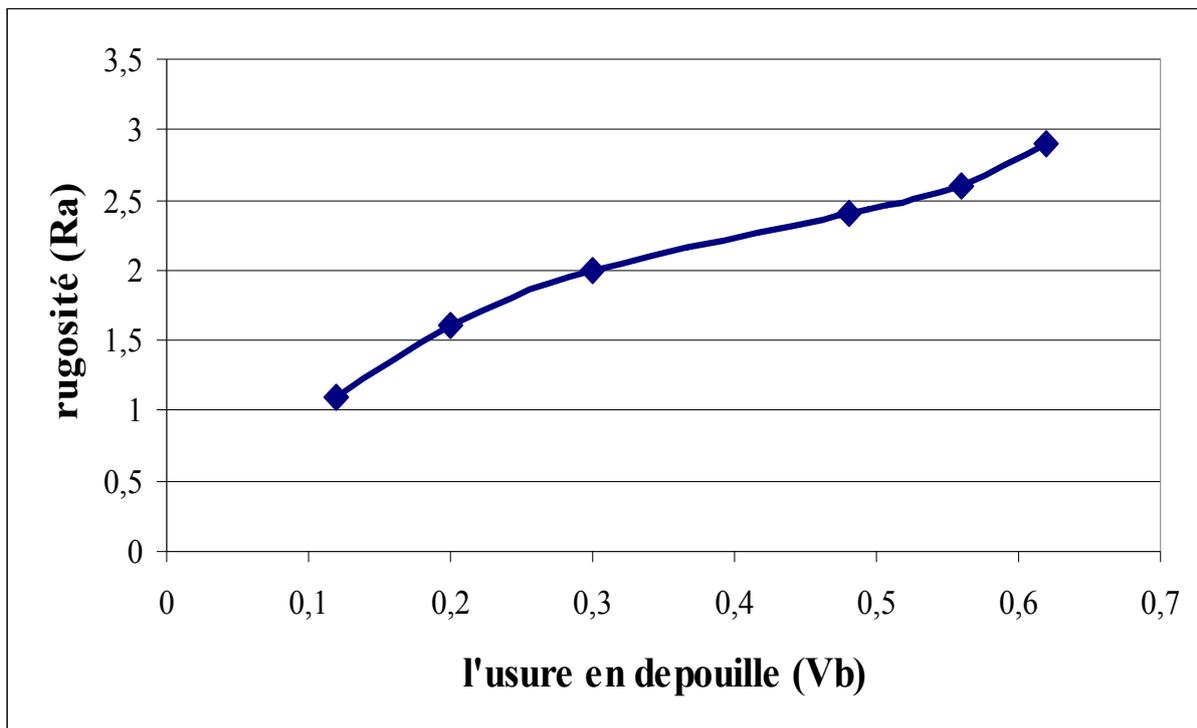


Fig. IV.19. Variation de la rugosité (Ra) en fonction de l'usure en dépouille (Vb) avec plaquette non revêtue, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 220$ m/mn.

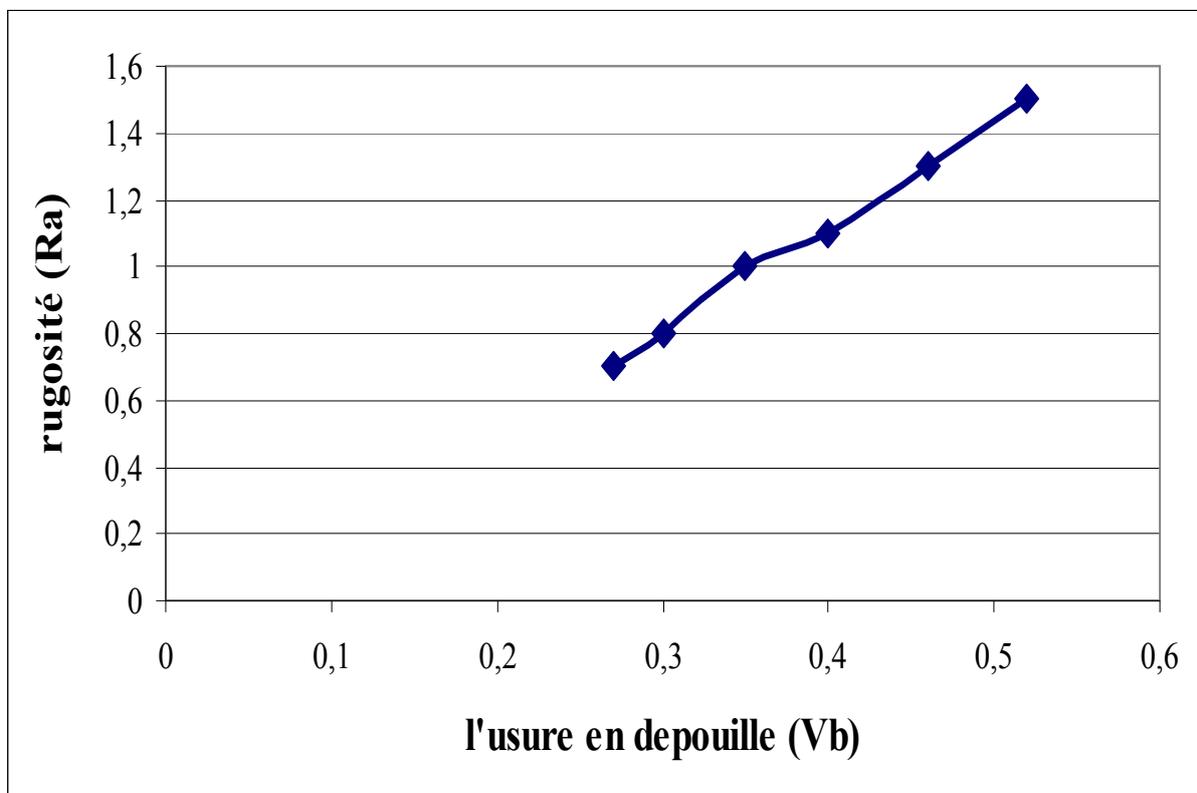


Fig. IV.20. Variation de la rugosité (Ra) en fonction de l'usure en d épouille (Vb) avec plaquette non revêtue, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p = 0,2$ mm, $V_c = 260$ m/mn.

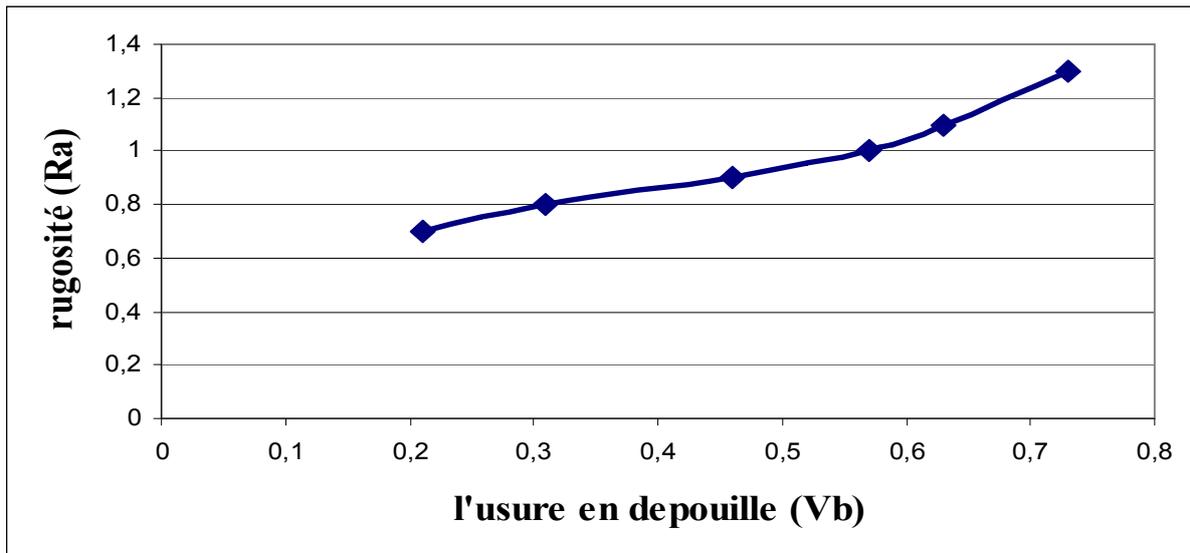


Fig. IV.21. Variation de la rugosité (R_a) en fonction de l'usure en dépouille (V_b) avec plaquette non revêtue, avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2$ mm/tr, $p=0,2$ mm, $V_c= 300$ m/mn.

Les courbes représentées par les figures ; (IV.18) ; (IV.19) ; (IV.20) ; (IV.21) montrent l'augmentation de la rugosité (R_a) en fonction de l'usure. Par contre pour le chariotage à vitesses de coupe élevés, on remarque que le carbure non revêtue donne une valeur d'usure grande.

On remarque que Lorsque l'usure V_b augmente, la surface de contact entre l'outil et la pièce s'agrandit et avec elle les efforts de coupe, ce qui entraîne la déformation des couches superficielles, ce qui augmente ainsi la rugosité (R_a) de la pièce.

IV.4.3. Variation de la rugosité en fonction de la vitesse de d'usinage

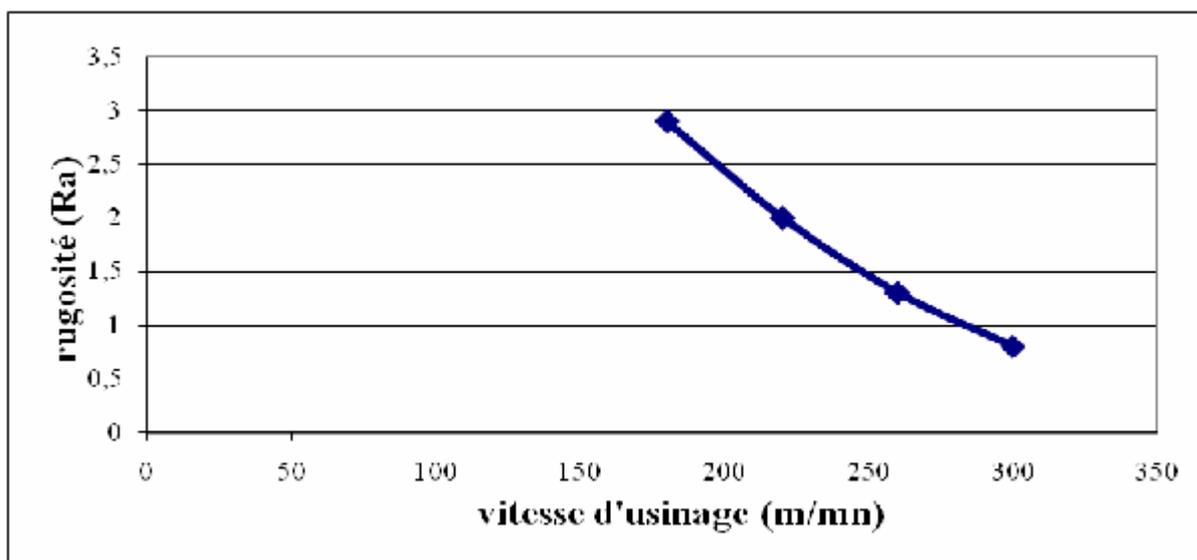


Fig. IV.22. Variation de la rugosité (R_a) en fonction de la vitesse de coupe (V_c) (180 – 300) m/min avec plaquette non revêtue.

La courbe représentée par la figure (IV.22) montre l'évolution de la rugosité (Ra) en fonction de la vitesse de coupe V_c . On remarque que la rugosité (Ra) diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c).

IV. 4 .4.Variation de la rugosité en fonction de temps d'usinage

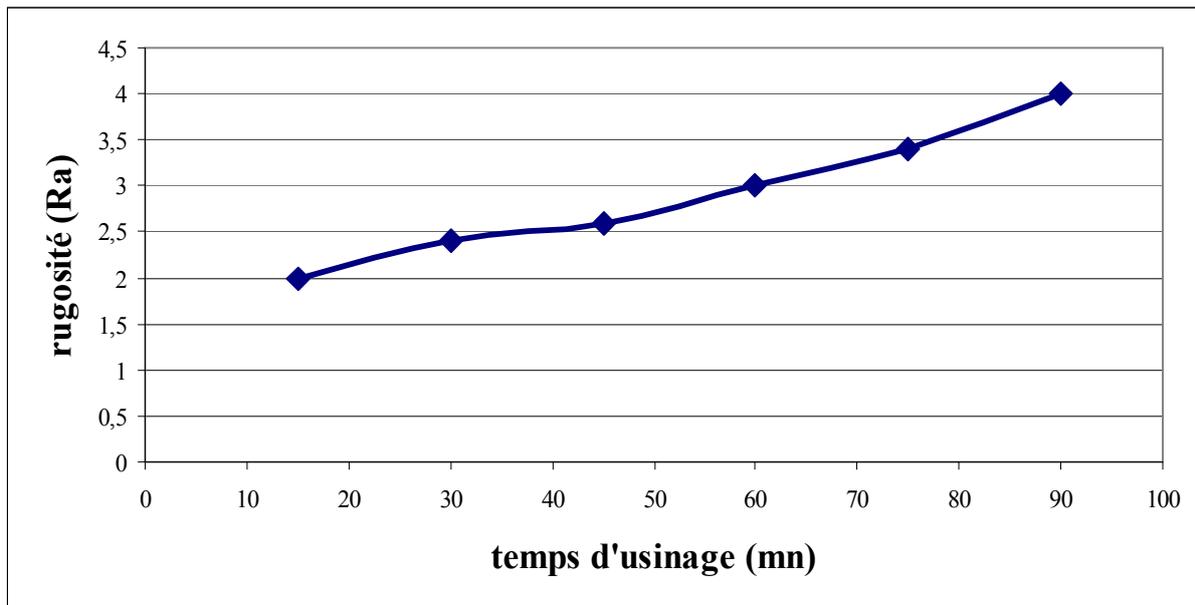


Fig. IV.23. Variation de la rugosité (Ra) en fonction du temps (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p = 0,2 \text{ mm}$, $V_c = 80 \text{ m/mn}$.

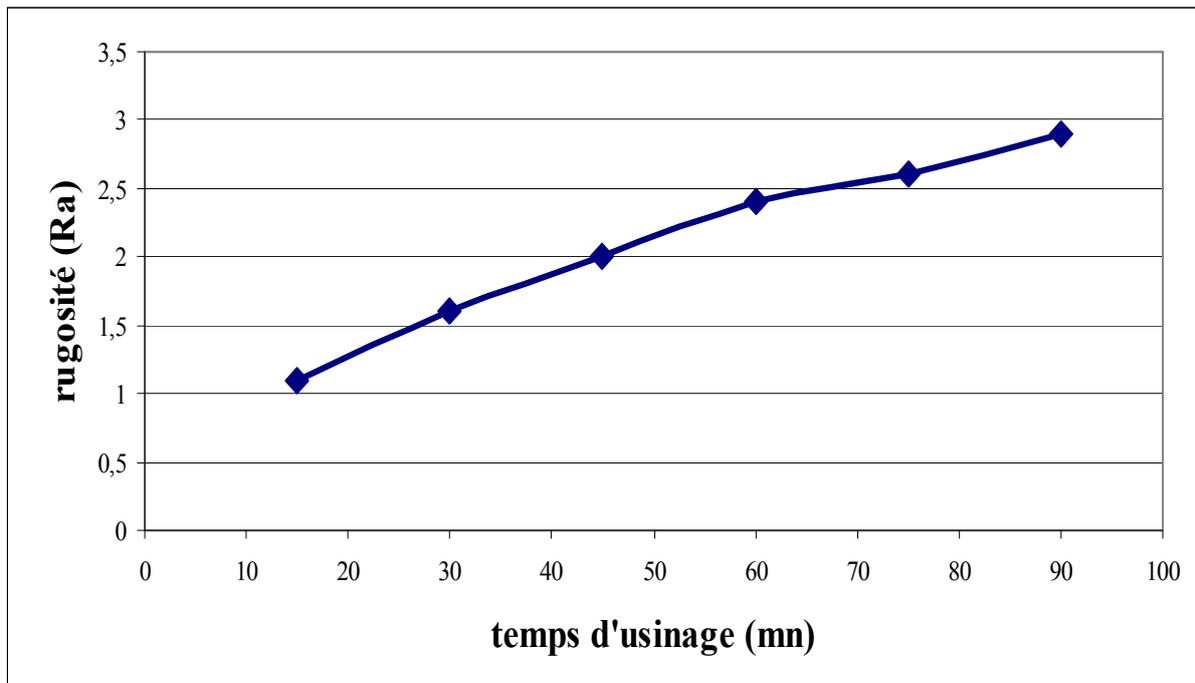


Fig. IV.24. Variation de la rugosité (Ra) en fonction du temps (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p = 0,2 \text{ mm}$, $V_c = 100 \text{ m/mn}$.

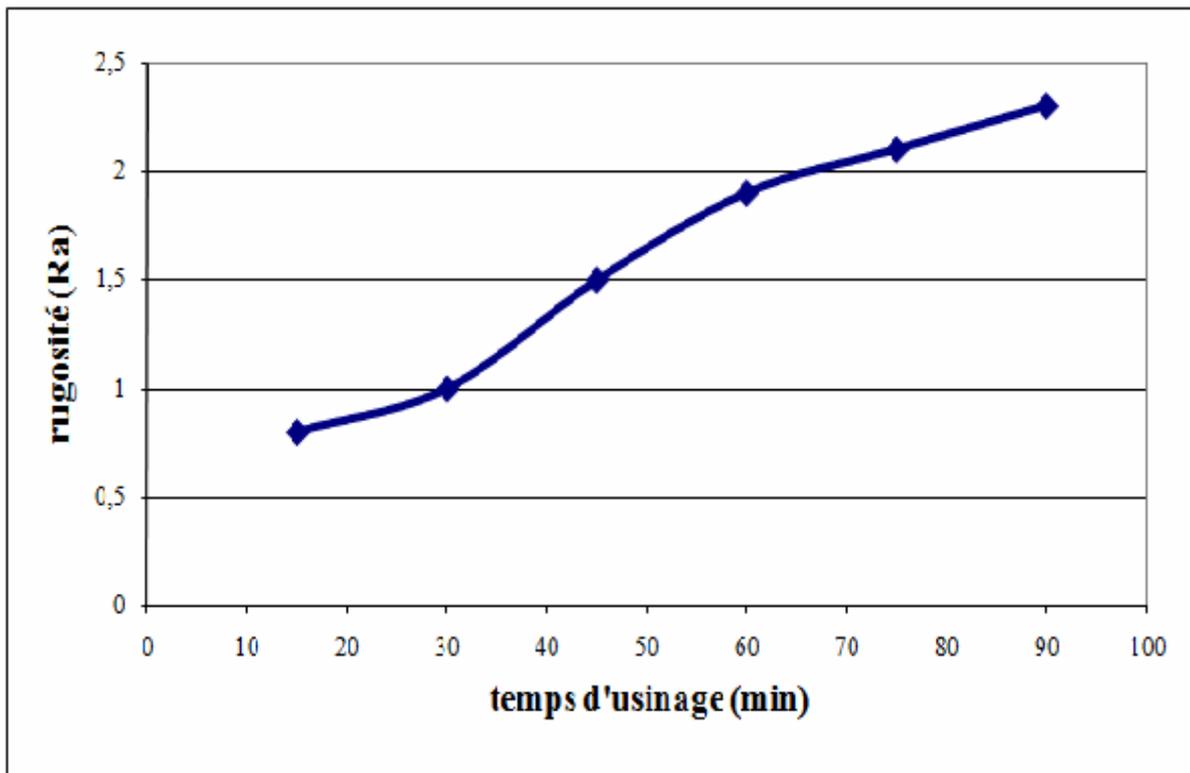


Fig. IV.25. Variation de la rugosité (Ra) en fonction du temps (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $Vc=120\text{m/mn}$.

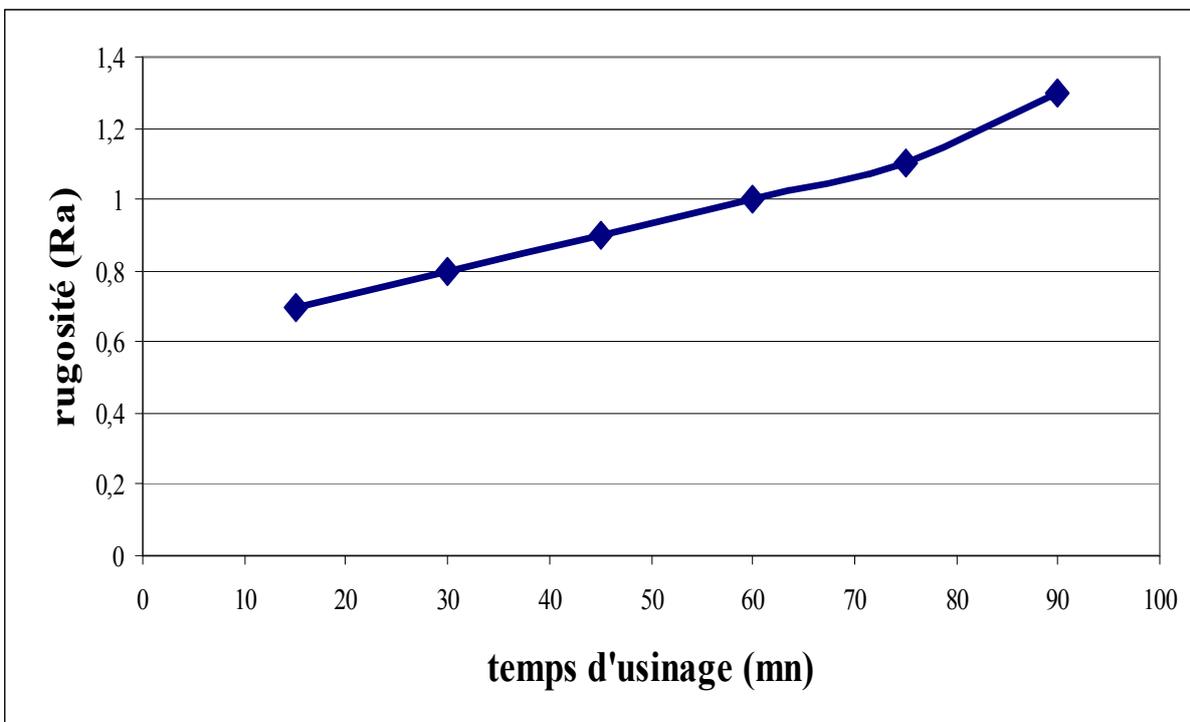


Fig. IV.26. Variation de la rugosité (Ra) en fonction du temps (t), avec les paramètres de coupe suivante : $a = 0,2 \text{ mm/tr}$, $p=0,2 \text{ mm}$, $Vc=140\text{m/mn}$.

IV.5. Images Topographique Sur Microscope A Balayage Electronique

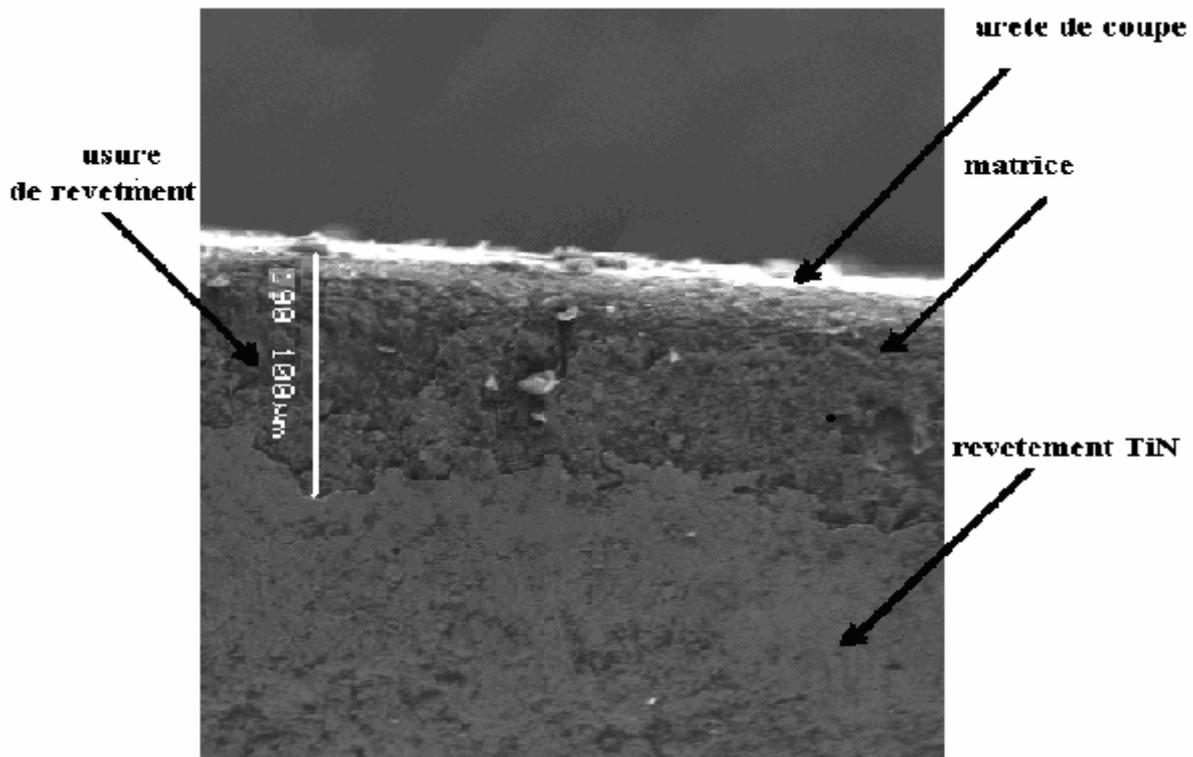


Fig. IV.27. Image MEB de plaque TiN pour le chariotage de l'acier 42CrMo4 avec les paramètres de coupe suivantes : $a=0.2\text{mm/tour}$; $V=120\text{m/min}$; $p=0.2\text{mm}$; $t=70\text{min}$ Illustrant le détachement de revêtement

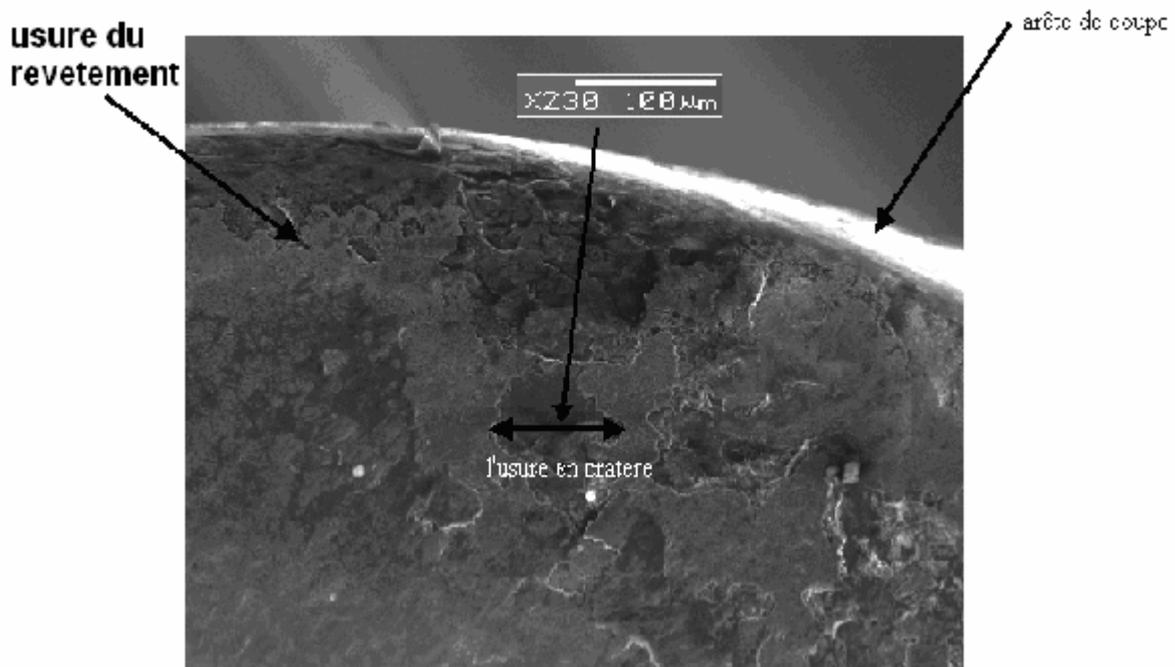


Fig. IV.28. Image MEB de plaque TiN pour le chariotage de l'acier 42CrMo4 avec les paramètres de coupe suivantes : $a=0.2\text{mm/tour}$; $V=140\text{m/mn}$; $p=0.2\text{mm}$; $t=50\text{min}$ Montrant une fragilisation de revêtement avec formation de cratère.

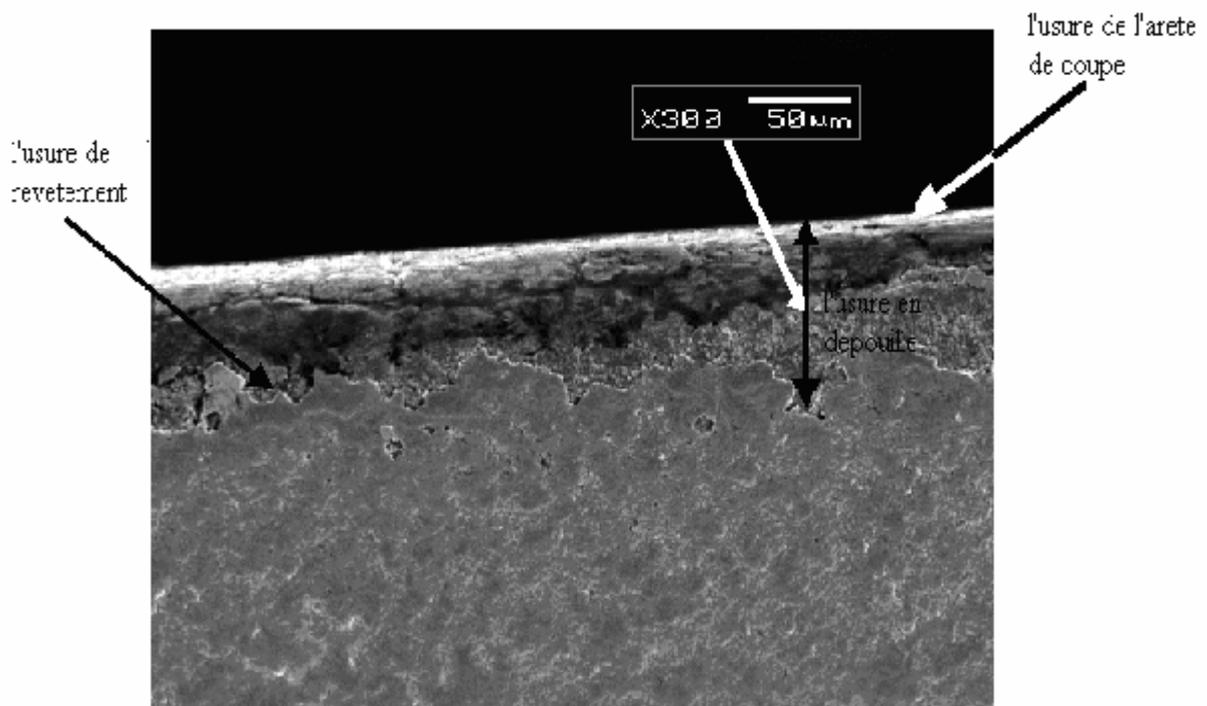


Fig. IV.29 .Image MEB de plaquette TiN pour le chariotage de l'acier 42CrMo4 avec les paramètres de coupe suivantes : $a = 0.2\text{mm/tour}$; $V = 120\text{m/n}$; $p = 0.2\text{mm}$; $t = 180\text{min}$ détermination de l'usure en dépouille.

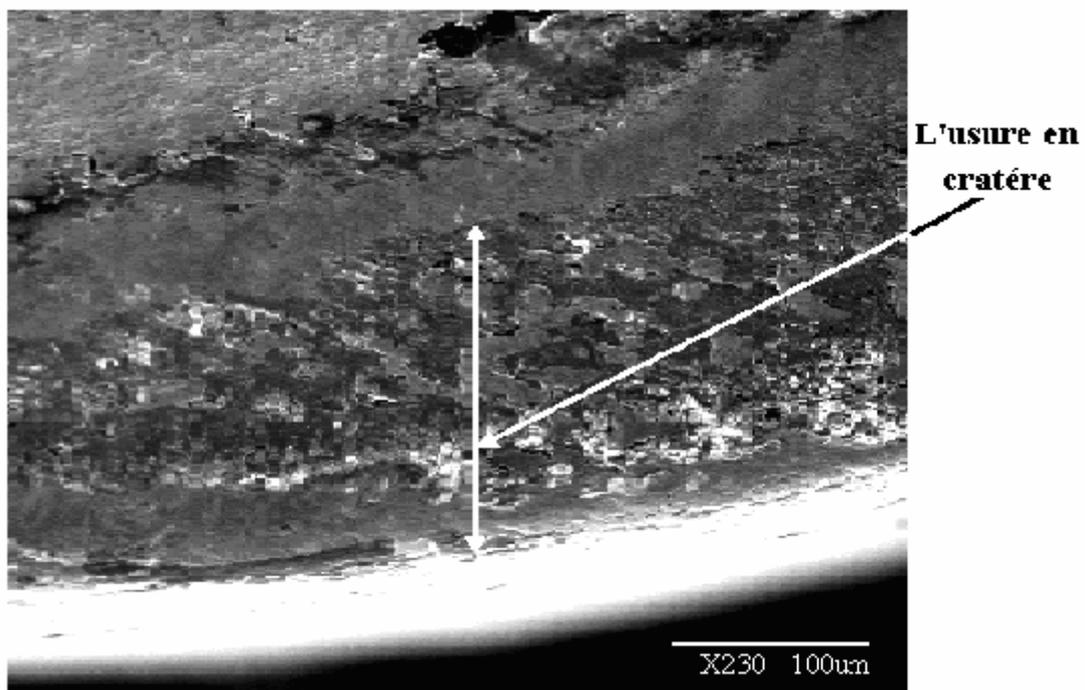


Fig. IV. 30. Image MEB de plaquette TiN pour le chariotage de l'acier 42CrMo4 avec les paramètres de coupe suivantes : $a = 0.2\text{mm/tour}$; $V = 140\text{m/mn}$; $p = 0.2\text{mm}$; $t = 60\text{min}$ détermination de l'arrêt de coupe avec formation cratère et d'un amas de matière.

IV.5.1. Commentaires Analyses MEB

Les micrographies illustrant d'une manière générale l'évolution de l'usure de la face de coupe au cours de l'usinage .elle croit sensiblement et proportionnellement au temps de coupe durant toute la première phase de l'évolution de l'usure, puis elle devient importante lorsque le taux de croissance de l'usure s'accélère. L'évolution de l'entaille de l'arête de coupe et de la profondeur de cratère évoluent d'une façon régulière jusqu'à la rupture de l'arête de coupe, puis se stabilise, le bord extérieure du cratère rejoint lentement l'arête principale, diminuant de ce fait progressivement la résistance de l'arête. Lorsque il débouche sur celle ci la rupture se produit rapidement .aussi la dure de vie de l'arête de coupe par accroissement de l'usure. L'usure de la face est déterminée par les dimensions du cratère en profondeur, sa largeur, et sa longueur. Une usure de ce type, trop rapide, peut prévenir d'une avance trop grande, d'une lubrification insuffisante ou d'une avance inadaptée.

IV. 6. Conclusion

Les outils de coupe s'usent parce que les surfaces d'usure (face de coupe et de dépouille) de l'outil doivent supporter des charges normales élevées et parce que le copeau et la pièce appliquent ces chargements lors de mouvements relatifs sévères par rapport aux surfaces d'usure. Les actions de coupe et de frottement sur ces surfaces de contact augmentent la température du matériau d'outil, ce qui accélère l'usure physique et chimique de ce dernier. Pour enlever de la matière à la pièce, ces mouvements et ces forces sont nécessaires, A travers toutes les figures tracées, nous avons essayé de chercher la combinaison des différents éléments du régime de coupe (V_c , a , p) qui nous ont permet d'approcher le plus possible la valeur de l'usure admise (V_{b0}) et celle du temps correspondant à une rugosité minimale.

Conclusion :

A travers notre étude, on peut conclure que l'étude de l'état de surface de l'outil de coupe est un facteur principal dans le domaine de l'industrie. Pour cela on a fait une étude sur la minimisation des rugosités et l'usure afin d'améliorer l'état de surface et augmenté la durée de vie de l'outil et éviter l'endommagement rapide des outils de coupe.

Nous avons effectué différentes mesures de l'usure en dépouille (V_b) et de la rugosité (R_a) (rugosité arithmétique), Notre travail s'applique à l'usinage à sec de l'acier **42Cr Mo 4** avec des outils en carbure métallique sans revêtement et avec revêtement recouvert d'une couche de quelques micromètres de carbure de Titane.

A travers tous les résultats obtenus ou nous avons essayé de chercher la combinaison des différents éléments du régime de coupe qui nous ont permis d'approcher le plus possible la valeur de l'usure admise (V_{b0}) qui est 0.3mm pour les plaquette en carbures métallique et celle du temps correspondant à une rugosité minimale.

Il s'agit de la rugosité qu'il faut minimiser pour obtenir un bon état de surface tout en conservant une usure admissible de la plaquette et cela en agissant sur les niveaux des facteurs testés.

On remarque aux vitesses de coupe élevées, les déformations plastiques perdent leur intensité avec l'absence de l'arête rapportée ce qui maintien la rugosité a des valeurs faibles.

On remarque aussi, que l'augmentation de la profondeur de passe crée l'augmentation du coefficient de frottement et la force de frottement entre outil-pièce, ce qui fait l'apparition du copeau adhérent, qui augmente aussi la force de coupe qui favorise la dégradation de l'outil de coupe.

Conclusion

Par ailleurs, les micrographies montrent d'une manière significative l'évolution de l'usure des outils de coupe au cours de l'usinage qui croît sensiblement et proportionnellement au temps de coupe.

Notre perspective est de réaliser plusieurs types de revêtement et faire une modélisation de ces outils de coupe par la méthode des éléments finis pour comparer l'étude expérimentale et l'étude théorique.

Afin d'obtenir un meilleur type de revêtement adéquat à une réalisation d'usinage efficace et fiable

Références bibliographiques

- [1] Jawahir I.S. and Luttervelt (van) C.A. - Recent developments in Chip Control Research and Applications – Annals of the CIRP - Vol. 42/2/1993.
- [2] Grolleau V. – Approche de la validation expérimentale des simulations numériques de la coupe avec prise en compte des phénomènes locaux à l'arête de l'outil – Thèse de doctorat de l'Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Nantes (1996).
- [3] Le Calvez C. – Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone – Thèse de doctorat de l'ENSAM Paris (1995).
- [5] Gilormini P. et Felder E. – Modélisation thermomécanique de la formation du copeau en usinage à grande vitesse – Bulletin du Cercle des Métaux - Tome 15, n°9 mars 1985.
- [6] Komanduri R., Schroeder T., Hazra J., Turkovich (von) B.F., Flom D.G. – On the catastrophic Shear Instability in High-Speed Machining of an AISI 4340 Steel – Journal of Engineering for Industry – Vol.104, p.121-131, may (1982).
- [7] Thibaut F. – Etude de la coupe à grande vitesse des aciers – Mémoire de recherche bibliographique – DEA de Production Automatisée – LURPA – ENS de Cachan (1995).
- [8] Schulz H. – Hochgeschwindigkeitsfräsen metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe – Ed. Hanser (1989).
- [8] Gekonde H.O. and Subramanian S.V.- Influence of phase transformation on tool crater wear – First French and German Conference on High Speed Machining – p.49-62, Juin (1997).
- [9] Moufki A., Molinari A., Dudzinski D. – Modelling of orthogonal cutting - First French and German Conference on High Speed Machining – p.8-28, Juin (1997).
- [10] Fourment L., Oudin A., Massoni E., Mittès G., Le Calvez C. – Numerical simulation of tool wear in orthogonal cutting - First French and German Conference on High Speed Machining – p.38-48, Juin (1997).
- [11] Tnshoff H.K., Karpuschewski B., Lapp C., Andrae P. – New lachine techniques for High-Speed Machining – Proceedings of the Int. Seminar on Improving Machine Tool Performance – vol. n°1, p.65-76, july (1998).

Références Bibliographie

- [12] Weck M., Schumacher A. – Machine tools for High Speed Machining - Proceedings of the Int. Seminar on Improving Machine Tool Performance – vol. n°1, p.27-41, july (1998).
- [13] Collectivité d’auteurs, Fraisage, un domaine où l’outil va de plus en plus vite, Revue périodique, Machine de production, I.S.S.N. (1989).
- [14] Roumesy B, Bedrin C. Usinabilité et coupe des métaux, Matériaux et techniques, Août/sept. (1981).
- [15] Roumesy B. Détermination des lois d’usure des outils de coupe, Machineoutils Juillet (1975).
- [16] P. BAGARD, M. PALLEAU, CETIM Senlis – « on gagne à usiner à grande vitesse » CETIM Information Février 1995 N°142, (p 39 – 43)
- [17] M. PALLEAU, CETIM Senlis – « La grande vitesse transforme ses essais » CETIM Information Oct. 1996, N°150, (P41–43)
- [18] P. BAGARD, M. PALLEAU, CETIM Senlis – « L’usinage à grande vitesse vu par le CETIM » Plastiques Modernes et élastomères Mai 1995, N°505, (p 43 – 45)
- [19] Nother A.T, Heath J.P, Usinage des métaux ferreux de grande dureté à l’aide de l’amborite, Matériaux et Techniques, N°386, pp 301, (1981).
- [20] Norme Internationale ISO 3685-1977 (F), Tool-life testing with single-point turning tools, PP.5-15, première Edition (1977).
- [21] Bodart .E « Une méthode rapide de mesure de l’usinabilité et les essais de longue durée » CIRP ANNALES, pp.261-263, (09/1990)
- [22] Poulachon G., Aspects phéménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Thèse de doctorat de L’ENSAM de cluny, (1999).
- [23] DAWSON.T.G; machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools Georgia institute of technology (2002).
- [24] Shigley, Joseph E.; Mischke, Charles R.; Mechanical Engineering Design, Mc Graw- Hill; (1989).
- [25] Hug J. L., Tournage des métaux durs, Machine de production, N° 110 pp 17-19, (1995).