وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY جامعـة باجي مختار–عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR **Année 2011**

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : *MAGISTER*

Etude de l'effet de la variabilité du matériau des fraises sur le comportement micro-géométrique des pièces usinées

Option : MECANIQUE DE LA RUPTURE

Par

BOUMERIBAA Leila

DIRECTEUR DE MEMOIRE : Lakhdar BOULANOUAR Pr Université Badji-Mokhtar Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT :	**A.Amirat**	**Pr**	**Université Badji-Mokhtar Annaba**
EXAMINATEURS :	**H.Hamadache**	**MC/A**	**Université Badji-Mokhtar Annaba**
	R.Khelif	**MC/A**	**Université Badji-Mokhtar Annaba**

A mon mari

A mes parents

A mes enfants

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce manuscrit a été réalisé dans le cadre d'une préparation du diplôme de magistère au sein du Laboratoire de Recherche Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle ''LR3MI'' de l'université d'Annaba dirigé par le Professeur L. BOULANOUAR.

Je tiens tout d'abord à remercier mon encadreur L. BOULANOUAR, Professeur au département de Génie Mécanique de l'Université d'Annaba pour son aide scientifique et matérielle et surtout pour son suivi régulier et son assistance jusqu'à la fin de cette recherche, ainsi que pour les encouragements qu'il n'a cessé d'apporter à mes travaux durant cette période.

J'adresse mes remerciements distingués à monsieur le Dr.Mahieddine Benghersallah pour son importante participation à ce travail. Ses conseils et connaissances m'ont été précieux.

J'adresse aussi mes vifs remerciements à Monsieur A.Amirat, Professeur au département de Mécanique à l'Université de Annaba d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.

Je remercie également Monsieur H.Hammadache, Maître de conférences au département de Mécanique à l'Université de Annaba d'avoir pris le soin d'examiner ce travail et me faire l'honneur de participer au jury.

Je remercie profondément Monsieur R. Khelif, Maître de conférences au département de Mécanique à l'Université de Annaba d'avoir pris le soin d'examiner ce travail et me faire l'honneur de participer au jury.

Je remercie chaleureusement Monsieur N. Zeghib Professeur au département de Mécanique à l'Université de Annaba pour son aide précieuse durant ce travail d'étude. Je remercie vivement A.LABACI pour sa collaboration et son aide.

Mes remerciements vont aussi tout particulièrement à l'ensemble des membres du laboratoire ''LR3MI'' et du département de mécanique. Leur contribution a été essentielle dans la réalisation de ce travail.

Un très grand merci à toute ma famille pour son soutien constant et chaleureux pendant toutes ces années d'études et pour son intérêt dans l'avancement de mon travail.

Je remercie toute ma promo, notamment mes amies Afef, Lamia, Karima, Meriem, et Samia.

Je remercie enfin toutes les personnes qui par un sourire ou une parole bienveillante, m'ont permis de garder le moral tout au long de ces années de formation.

Résumé

Le travail présenté consiste à étudier l'effet de la variabilité du matériau de coupe sur le comportement micro-géométriques des pièces usinées. Les expériences ont été réalisées sur deux types d'aciers C45 et 100Cr6. L'usinage a été fait sur deux série d'essai : dans la 1ère série, on a utilisé deux nuances de matériau à outil : cermet 530 et GC4030 ; dans la 2ème, quatre plaquettes de coupe ont été utilisées : GC4230, GC1030, GC2030 et H13A. Les essais ont été menés selon la méthode de planification des expériences. Les paramètres technologiques, constituant l'objectif ou l'étude sont, la qualité de la surface usinée, le comportement à l'usure des outils testés et la morphologie du copeau formé.

Dans la 1ère série, les plaquettes cermets CT350 ont montré un comportement à l'usure nettement meilleur que celui des plaquettes en carbure métallique revêtu et ceci pour les différentes conditions de travail. Cette performance de supériorité est caractérisée par un ratio allant de 1,78 à 1,91fois. La surface usinée s'est caractérisée par un meilleur état de surface respectivement pour le C45 et le 100Cr6 par (0.06<Ra<1.37µm) et (0.21<Ra<0.40) lors de l'usinage avec le cermet 530, comparativement avec celui obtenu avec la GC4030 (1.17<Ra<3.61µm) et (0.42<Ra<1.60).

Dans la 2ème série, les plaquettes H13A et GC1030 ont donné des résultats meilleurs par rapport aux plaquettes GC4230 et GC2030. Par ailleurs les plaquettes 1030 ont donné lieu à des états de surfaces respectivement pour l'acier C45 et 100Cr6 (Ra= 0,021 à 0,206 µm) et (Ra= 0,20 à 1,87 µm) , les H13A (Ra = 0,0826 à 0,206 µm) et (Ra = 0,31 à 0,88µm), tandis que les GC4230 ont enregistré une rugosité atteignant (Ra = 0.386 µm) pour 100Cr6 et (Ra=1.77) pour le C45 et les GC2030 ont donnée une rugosité (Ra=0.47µm) pour le 100Cr6 (Ra=1.61µm). Le meilleur état de surface a été enregistré pendant l'usinage du 100Cr6 par rapport à celui du C45.

Mots clés: Fraisage - Rugosité -Usure - Acier C45- Acier 100 Cr6-Carbure métallique revêtu-Carbure métallique non revêtu-Traitement thermique-Dureté.

Abstract

The present work is to study the effect of the variability of cutting material on the behavior of geometrical micro-machined parts. The experiments were performed on two types of steels C45 and 100Cr6. The machining was done on two test series: in the first series, we used two shades of tool material: cermets 530 and GC4030; in the second, four cutting inserts were used: GC4230, GC1030, GC2030 and H13A. The tests were conducted using the method of planning experiments. Technological parameters that are target or study are the quality of the machined surface, the wear behavior of tested tools and morphology of the chip formed.

In the first series, platelets cermets CT350 showed a wear behavior significantly better than that of carbide coated metal and this for different working conditions. This superior performance is characterized by a ratio ranging from 1.78 to 1.91 times. The machined surface was characterized by a better surface respectively for the C45 and 100Cr6 by (0.06 <Ra <1.37μm) and (0.21 <Ra <0.40) when machining with cermets 530, compared with that obtained with the GC4030 (1.17 <Ra <3.61μm) and (0.42 <Ra <1.60).

In the second series, platelets and GC1030 H13A yielded better results compared to platelets and GC4230 GC2030. Moreover platelets 1030 gave rise to surface states respectively for steel C45 and 100Cr6 (Ra = 0.021 to 0.206 microns) and (Ra = 0.20 to 1.87 microns), the H13A (Ra = 0, 0826 to 0.206 microns) and (Ra = 0.31 to 0.88 microns), while GC4230 recorded adjacent roughness (Ra = 0386 microns) to 100Cr6 and (Ra = 1.77) for C45 and GC2030 were given a roughness (Ra = 0.47μm) for 100Cr6 (Ra = 1.61μm). The best surface was recorded during the machining of 100Cr6 compared to that of C45.

Keywords: Milling - Roughness-Wear - Stainless Steel 100 Cr6 C45-carbide-coated metal-carbide metal-coated non-Hardness Heat treatment.

ملخص

توضح هذه الدراسة تأثير تقلبات مواد القطع على السلوك الهندسي المجهري على قطع مشغلة. أجريت تجارب على نوعين من الفولاذ C45 و100Cr6 . وقد تم التشغيل من خلال سلسلتي تجارب: في المجموعة الأولى تم استعمال الخزف المعدني cermet 530 و GC4030 ¡ وفي المجموعة الثانية تم استعمال أربع لقم للأداة من المواد: GC4230 ¡ GC1030 ¡ GC2030 ، و H13A. وأنجزت الاختبارات باستخدام أسلوب مخطط التجارب. تشكل العناصر التكنولوجية هدف دراسة نوعية السطح المشغل وسلوك التثلم للأدوات المختبرة ومورفولوجية الجذاذة الناتجة. في السلسلة الأولى ، لقم الخزف المعدني CT350 أظهر سلوك مميز أفضل بكثير من الكربيدات المعدنية المغلفة خلال مختلف ظروف التشغيل. ويتميز هذا الأداء الواضح بنسبة تتراوح بين 1.78 – 1.91 مرة. وتميز السطح المشغل بنوعية جيدة على التوالي لـ C45 و100 Cr6 بنسبة (0.06<Ra<1.37µm) و (0.21<Ra<0.40) وفي التشغيل بالخزف المعدني 530 مقارنة بالمحصل عليه بـ GC4030 (1.17<Ra<3.61µm) و (0.42<Ra<1.60).

في المجموعة الثانية ، حققت اللقم H13A و GC1030 نتائج أفضل من اللقم GC4230 و GC2030 وعلاوة على ذلك اللقم 1030 بينت مكانة لنوعية السطح على التوالي للفولاذ C45 و 100Cr6 (Ra= 0,021 à 0,206 µm) و (Ra= 0,20 à 1,87 µm) ، ومجموعة H13A (Ra = 0,0826 à 0,206 µm) و (Ra = 0,31 à 0,88µm) بينما مجموعة GC4230 سجلت خشونة (Ra=0.47µm) و لـ 100Cr6 (Ra=1.61µm) . وكان أفضل نوعية سطح مشغل خلال تشغيل 100Cr6 مقارنة للمحصل علية لـ C45 .

كلمات مفاتيح

تفريز – خشونة – تثلم – فولاذ C45 – فولاذ 100 Cr6 – كربيد معدني مغلف – كربيد معدني غير مغلف – معالجة حرارية – صلادة.

Liste des abréviations et symboles

aj	Profondeur de coupe radiale [mm]
ap	Profondeur de passe [mm]
CVD	Chemical Vapor Deposition
De	Diamètre de coupe effectif
fz	Avance par dent [mm/dent]
fn	Avance par tour [mm/tr]
Fa	Effort axial [N]
Fr	Effort radial [N]
Fv	Effort tangentiel [N]
h_{ex}	Epaisseur de copeaux maximale
hj	Epaisseur moyenne de copeau [mm]
HB	Dureté Brinell
HV	Dureté Vickers
HR	Dureté Rockwell
Kc	Effort spécifique de coupe [N/mm^2]
Kr	Angle de direction d'arête [degré]
KT	Usure en cratère [mm]
k	Angle d'attaque [degré]
Lc	Longueur de coupe [mm]
n	Fréquence de rotation [tr/min]
PC	Puissance de coupe [W]
PVD	Physical Vapor Deposition
Q	Débit copeaux
R^2	Coefficient de détermination
$r_£$	Rayon du bec [mm]
Ra	Rugosité moyenne arithmétique [µm
Rq	Rugosité moyenne quadratique [µm]
Rmax	Rugosité maximale [µm]
Rt	Rugosité totale [µm]
R_Z	Rugosité totale moyenne [µm]
S	Section du copeau [mm^2]
Te	Temps d'usinage [min]

T	Tenue [min]
VB	Usure en dépouille principale [mm]
VS	Usure en dépouille auxilliaire [mm]
VC	Usure au bec de 1'outil [mm]
Vc	Vitesse de coupe [m/min]
Vf	Vitesse d'avance [mm/min]
Z	Nombre de dent de la fraise
z_n	Nombre de dents total de l'outil
γ	Angle de coupe [degré]
γ_f	Angle de coupe axial [degré]
γ_p	Angle de coupe radial [degré]
α	Angle de dépouille [degré]

SOMMAIRE

Remerciements
Liste des figures
Liste des tableaux
Liste des abréviations
Résumés
INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre1: Etude et analyse bibliographique

I.1 GENERALITES SUR LA COUPE DES METAUX 5
I.1.1. Introduction 5
I.1.2 Définition de la coupe 5
I.1.3 L'étude des divers modes de mise en œuvre de la coupe des métaux 6
I.1.4 Définition de l'usinabilité 7
I.1.5 Usinage à sec 8
I.2 LE FRAISAGE 8
I.2.1 Paramètres de coupe 8
I.2.2 Géométrie de l'outil de coupe 10
I.2.3 Influence de la géométrie de l'outil en fraisage 11
I.2.4 Influence de la géométrie de coupe 12
I.2.5 Domaines d'application 14
I.3 MATERIAUX DE COUPE 15
I.3.1 Introduction 15
I.3.2 Matériaux de coupe et revêtements 16
I.3.3 Matériaux de coupe 19
I.3.4 Coût 23
I.4 USURE DES OUTILS 23
I.4.1.Introduction 23
I.4.2 Définition de l'usure 24
1.4.3 Les principaux modes d'usure des outils de coupe 24
1.4.3.1 Usure par abrasion 24
1.4.3.2 Usure par adhésion 25
1.4.3.3 Usure par diffusion 26
1.4.3.4 Usure par fatigue thermomécanique 26
1.4.4 Les principales formes d'usure des outils de coupe 27
1.4.4.1 Usure en dépouille 27
1.4.4.2 Arête rapportée et entaille 28
1.4.4.3 Usure en cratère 29
1.4.4.4 Autres formes d'usure des outils 32
1.4.5 Conséquence de l'endommagement sur la qualité de la pièce 33
I.4.6 Modèles de lois d'usure 33
I.4.6.1 Modèle de TAYLOR généralisé 33
I.4.6.2 Modèle de COLDING 34
I.4.6.3 Modèle de KONING-DEPIEREUX 34
I.4.6.4 Bilan des modèles d'usure 34
I.5.CARACTERISTIQUES DES SURFACES USINEES 35
I.5.1. Introduction 35

I.5.2. Analyse d'une surface 35
I.5.3. Texture de la surface 36
I.5.4 Effet du régime de coupe sur la rugosité 37
I.5.4.1 Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants 38
I.5.4.2 Effet de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité 39
I.5.4.3 Effet de l'angle de coupe sur la rugosité 40
I.5.4.4 Influence du régime de coupe sur l'écrouissage superficiel 40
I.5.4.5. Influence de la machine 42
I.6 EFFORTS DE COUPE 42
I.6.1 Introduction 42
I.6.2 Intérêt de leur mesure: 42
I.6.3 Génération des efforts de coupe: 43
I.7 ETUDE DE LA FORMATION DU COPEAU 44
I.7.1 Introduction 44
I.7.2 Formation du copeau 44
I.7.2.1 Généralités sur la formation du copeau 45
I.7.2.2 Intérêt du contrôle de la formation du copeau 42
I.7.3 Types de copeaux rencontrés 48
I.7.3.1 Les différents types de copeaux 49
I.8 TRAITEMENTS THERMIQUES ET TREMPABILITÉ DES ACIERS 50
I.8.1 Introduction 50
I.8.2 Le durcissement par trempe des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés 51
I.8.2.1 L'austénitisation 51
I.8.2.2 Trempe 52
I.8.2.3 Revenu 54
I.8.3 Structures de différents aciers après traitement par trempe 55
I.8.4 Relations entre les traitements thermiques et les procédés de fabrication 56
I.8.5 Traitements thermiques et usinage 56
I.9 LA DURETE DES ACIERS 56
I.9.1 Introduction 56
I.9.2 Capacité de durcissement 56
I.10 Conclusion 58

Chapitre II : Méthodologie et équipements de recherche

II.1 Equipements utilisés 60
II.1.1 Introduction 60
II.1.2 Machine-outil 60
II.1.3 Matière à usiner 60
II.1.4 Plaquettes et porte plaquettes 62
II.1.5 Appareils de mesure et de contrôle 64
II.1.5.1 Microscope pour la mesure de l'usure 64
II.1.5.2 Microscope optique 65
II.1.5.3 Rugosimètre 65
II.1.5.4 Duromètre 66
II.1.6 Four 66
II.1.7 Machine à polissage 68
II.1.8 Microscope pour micrographie 69

II.1.10 Conditions de coupe 69
II.2.Méthodologie de réalisation des expériences 70
II.2.1.Méthode unifactorielle 70
Chapitre III : Résultats et analyse
III.1 Introduction 72
III.2 Résultats et analyses des essais de la série 1 72
III.2.1 Résultats de l'usure 72
III.2.2 Analyse des résultats de l'usure 73
III.2.2.1 Observations microscopiques de la morphologie de l'usure 75
III.2.2.2 Modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe 81
III.2.3 Résultats de la rugosité 81
III.2.3.1 Influence de l'usure sur la rugosité des surfaces usinées 82
III.2.3.2 Influence du temps sur la rugosité des surfaces usinées 86
III.2.3.3 Résultats de la rugosité selon la méthode unifactorielle 88
III.2.4 Analyse des résultats de la rugosité 88
III.2.4.1 Influence de l'usure sur la rugosité 89
III.2.4.2 Modèles de la rugosité en fonction du temps 89
III.2.5 Longueur et volume du copeau 90
III.3 Résultats et analyse des essais de la série 2 91
III.3.1 Résultats de la dureté 91
III.3.2 Analyse des résultats du traitement thermique et de la dureté 93
III.3.3 Résultats de l'usure 95
III.3.3.1 Résultats d'usure par plaquette et par arête 95
III.3.3.2 Résultats d'usure en fonction du matériau usiné 99
III.3.3.3 Résultats d'usure pour les différents matériaux traités 100
III.3.4 Analyse des résultats de l'usure 101
III.3.5 Analyse de la morphologie de l'usure 103
III.3.6 Influence du matériau de coupe sur la rugosité des surfaces usinées 113
III.3.6.1 Résultats de la Rugosité 115
III.3.7 Analyse des résultats de la rugosité de surface 116
III.3.8 Analyse de la morphologie du copeau 116
Conclusion générale
Références bibliographiques
Annexe I
Annexe II

Liste des tableaux

Tableau n	*Titre*	*Page*
	Chapitre II	
1	Composition chimique	**61**
2	Caractérisations et désignation des plaquettes utilisées	**63**
3	***a.*** Conditions de la trempe des éprouvettes	**67**
	b. Conditions du revenu des éprouvettes	**67**
4	Présentation du régime de coupe	**69**
5	Réalisation des essais d'après la méthode unifactorielle	**70**
	Chapitre III	
1	Durées de vie des différents matériaux à outil utilisés en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage des deux aciers	**80**
2	Effet de la vitesse de coupe sur la durée de vie des plaquettes	**80**
3	Modèles mathématiques de la tenue	**81**
4	Résultats des différents critères de rugosité en fonction de la vitesse de coupe de l'usinage des deux aciers C45 et 100 Cr6 avec les plaquettes Cermets 530 et GC 4030.	**88**
5	Modèles mathématiques de la rugosité en fonction du temps d'usinage	**83**
6	Longueurs et volumes de copeaux générés lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 et l'acier C45 pour les deux matériaux à outil GC4030 et les cermets CT530	**90**
7	Mesures de la dureté avant usinage des deux aciers trempés	**92**
8	Mesures de la dureté de l'acier C45 trempé et après usinage à Vc=120m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 mm	**92**
9	Mesures de la dureté de l'acier C45 trempé et revenu, après usinage à Vc=120m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 mm	**92**
10	Mesures de la dureté de l'acier C45 trempé et revenu, après usinage à Vc=80m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 mm	**92**
11	Mesures de la dureté de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, après usinage à Vc=80m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 ap = 0,5 mm	**92**
12	Résultats de la dureté de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, après usinage à Vc=120m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 mm	**93**
13	Résultats des différents critères de rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage des deux aciers C45 et 100 Cr6 traités avec les différentes matériaux de coupe	**115**
14	Résultats des différents critères de rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et sans revenu avec les différents matériaux de coupe.	**116**

Liste des figures

Figure n°	***Titre***	***Page***
	Chapitre I	
1	Schéma structural de l'usinabilité.	**6**
2	Interactions Pièces-Outils-Matière en usinage.	**8**
3	paramètres de coupe.	**9**
4	Géométrie de l'outil de coupe.	**10**
5	Battement axial et radial des dents de la fraise.	**12**
6	Influence de la géométrie de coupe.	**12**
7	Influence de l'angle de sortie sur la formation de bavures	**13**
8	Déflexion de la fraise en fraisage de bout.	**14**
9	Domaines d'application du fraisage.	**14**
10	Outil de coupe (plaquette) lors d'une opération de tournage.	**15**
11	Choix d'un type d'arête et définition d'une famille d'outil.	**16**
12	Statistique sur l'évolution de l'utilisation relative des revêtements pour outils-coupants	**17**
13	Classification des techniques de dépôts.	**18**
14	Cahier des charges d'un revêtement.	**18**
15	Zone de sollicitations du couple outil/matière.	**19**
16	Intérêt des revêtements multicouches dans la lutte contre la fissuration.	**19**
17	Influence du revêtement.	**20**
18	Comparaison entre les outils en cermet et les outils en carbure.	**21**
19	Obtention de PCBN	**22**
20	Obtention de PCD.	**22**
21	Processus d'usure par abrasion.	**25**
22	Processus d'usure par adhésion mécanique.	**25**
23	Processus d'usure par diffusion.	**26**
24	Types ou modes d'usures selon H. OPITZ et W. KÖNIG.	**27**
25	Différentes formes d'usures observées sur une plaquette de coupe.	**27**
26	Exemple d'usure par abrasion sur la face en dépouille.	**28**

27	Exemple d'arête rapportée dans le cas de l'usinage de l'acier C45	**27**
28	Exemple d'usure en cratère.	**30**
29	Modèle de diffusion dynamique entre l'outil et le copeau proposé par Trent : diffusion de W, Co et C dans le copeau et faible solubilité de TiC.	**30**
30	Modèle de diffusion quasi-statique de diffusion entre l'outil et le copeau proposé par Qi et al. : diffusion de W, Co et C dans la couche de gehlenite (Ca2Al(AlSi) O7).	**30**
31	Micrographies illustrant l'interaction entre le WC-Co et l'acier E24-2 après 1h de maintien sous vide à une pression de 2,5 MPa à température constante : - 900°C, - 1100°C, - 1300°C.	**31**
32	Phénomène de diffusion du fer dans l'outil de coupe en carbure de tungstène P10.	**32**
33	Représentation graphique des différents modèles.	**34**
34	Les différents défauts de surface.	**36**
35	Paramètres de rugosité.	**36**
36	Schéma de la ligne moyenne.	**37**
37	Variation des hauteurs d'aspérités avec la vitesse de coupe pour des aciers à diverses teneurs en carbone.	**38**
38	Micro géométrie de surface pour diverses vitesses de coupe.	**38**
39	Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants sur les états de surfaces usinées en tournage.	**39**
40	Effet de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité.	**40**
41	Effet de l'angle de coupe et de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité.	**40**
42	Profondeur écrouie en fonction de la vitesse de coupe d'un acier XC45.	**41**
43	Variation du taux et de la profondeur d'écrouissage superficiel en fonction de l'avance de l'acier XC 45.	**41**
44	Configurations de fraisage en concordance et en opposition.	**42**
45	Composantes de 1'effort de coupe.	**43**
46	Structure des efforts de coupe.	**43**
47	Zones de copeaux.	**44**
48	La coupe des matériaux à l'échelle mésoscopique (arête/matière).	**46**
49	Zones de cisaillement en usinage, image réalisée par Trent et Wright (2000).	**46**
50	Analyse de la coupe par des essais de QST.	**48**
51	Exemple de 3 formes différentes de copeau.	**49**
52	Les différents types de copeaux.	**50**
53	Graphe des traitements thermiques.	**50**
54	Diagramme d'équilibre des aciers au carbone.	**51**

55	Domaines de températures d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des aciers au carbone.	**52**
56	Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C) : Ce diagramme se lit en suivant une isotherme.	**53**
57	TTT des aciers et microstructure.	**53**
58	Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement.	**55**
59	Structure ferrito-perlitique.	**55**
60	Structure mixte martensite + austénite.	**55**
61	Dureté des martensites en fonction de leur teneur en carbone.	**57**
62	Représentation schématique d'une section sous indentation.	**58**
63	Exemple schématique d'interactions multidisciplinaires d'un processus d'usinage et positionnement du présent travail.	**58**
Chapitre II		
1	Fraiseuse verticale modèle 6H11 utilisée pour les essais	**60**
2	Eprouvette d'essai en acier C45	**61**
3	Eprouvette d'essai en acier 100Cr6	**61**
4	Montage d'essai	**62**
5	Plaquettes de coupe utilisées dans les essais	**62**
6	Géométrie de l'outil fraise et de la plaquette	**63**
7	Fraise à surfacer à plaquettes amovibles	**64**
8	Microscope optique modèle MMN-2	**64**
9	Mise en coordonnées de la plaquette	**65**
10	Microscope optique	**65**
11	Rugosimètre Mitutoyo SJ 201.M	**66**
12	Duromètre pour la mesure de la dureté	**66**
13	Four Furnaces 48000	**67**
14	Structure de l'acier 100 Cr6	**68**
15	Structure de l'acier C45	**68**
16	Machine de polissage	**69**
17	Microscope pour micrographie	**69**
18	Représentation graphique de la droite de régression	**71**

Chapitre III		
1	Evolution de l'usure en dépouille principale VB en fonction du temps Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**72**
2	Evolution de l'usure en dépouille principale VB en fonction du temps Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**73**
3	Evolution de l'usure en dépouille auxiliaire VS en fonction du temps Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**73**
4	Evolution de l'usure en dépouille auxiliaire VS en fonction du temps Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**73**
5	Micrographie de l'usure VB, VS et au sommet des plaquettes GC4030 à différentes vitesses de coupe, fz=0.02 mm/d, ap=1mm a)Surface en dépouille auxiliaire, b) Surface en dépouille principale, c) Surface en dépouille (sommet)	**76**
6	Micrographie de l'usure VB, VS et au sommet des plaquettes Cermets 530 à différentes vitesses de coupe, fz=0.02 mm/d, ap=1mm a) Surface en dépouille auxiliaire, b) Surface en dépouille principale, c) Surface en dépouille (sommet)	**77**
7	Micrographie de l'usure VB, VS et au sommet des plaquettes GC4030 à différentes vitesses de coupe, fz=0.02 mm/d, ap=1mm a) Surface en dépouille auxiliaire, b) Surface en dépouille principale,c) Surface en dépouille (sommet)	**78**
8	Micrographie de l'usure VB, VS et au sommet des plaquettes Cermets 530 à différentes vitesses de coupe, fz=0.02 mm/d, ap=1mm a)Surface en dépouille auxiliaire, b) Surface en dépouille principale, c) Surface en dépouille (sommet)	**79**
9	Tenues expérimentales des différents matériaux à outil à différentes vitesse de coupe, à [VB]=0.3 mm	**81**
10	Evolution de la rugosité **a)** Ra et **b)** Rz en fonction de l'usure VBmax lors de l'usinage des deux aciers C45 et 100Cr6 pour la Vc = 80m/min ;f_z;=0.02mm/d a_p =1mm.	**82**
11	Evolution de la rugosité **a)** Ra et **b)** Rz en fonction de l'usure VBmax lors de l'usinage des deux aciers C45 et 100Cr6 pour la Vc = 120m/min ; f_z =0,02mm/d ;a_p =1mm	**83**
12	Evolution de la rugosité **a)** Ra et **b)** Rz en fonction de l'usure VS lors de l'usinage des deux aciers C45 et 100Cr6 pour la Vc =120m/min;f_z =0,02mm/d ;a_p =1mm	**84**
13	Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil GC4030 en fonction de l'usure VB àVc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**84**
14	Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil Cermet 530en fonction de l'usure VB àVc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**84**
15	Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil GC4030 en fonction de l'usure VB à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**85**
16	Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil Cermet 530 en fonction de l'usure VB à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**85**
17	Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil GC4030 en fonction de l'usure VS à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**85**
18	Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil Cermet 530 en fonction de l'usure VS à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**86**

19	Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil Cermet 530 en fonction de l'usure VS à Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**86**
20	Evolution de la rugosité Ra en fonction du temps lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6avecles outils GC4030 et le Cermet530 à Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**86**
1	Evolution de la rugosité Ra en fonction du temps lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 avec les outils GC4030 et le Cermet530 à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**87**
22	Evolution de la rugosité Rz en fonction du temps lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 avec les outils GC4030 et le Cermet530 à Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**87**
23	Evolution de la rugosité Rz en fonction du temps lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 avec les outils GC4030 et le Cermet530 à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm	**87**
24	Longueur de copeau généré par différents matériaux à outil à différentes vitesses de coupe, à [VB]=0.3 mm	**91**
25	Apparition d'une fissure sur l'éprouvette en acier 100C6 (avant l'usinage).	**93**
26	Aspect de la fissure sur l'éprouvette du 100C6 après l'usinage avec la plaquette 1030.	**93**
27	Evolution de la fissure sur l'éprouvette (en acier 100C6) après usinage avec des matériaux de coupe différents	**93**
28	**.** Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier C45 après trempe et sans revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min.	**96**
29	Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=80m/min	**96**
30	Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min.	**97**
31	Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=80m/min.	**98**
32	Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min.	**99**
33	Evolution de l'usure VB et VS los de l'usinage de l'acier C45 trempé et C45 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min	**99**
34	Evolution de l'usure VB et VS lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 trempés et revenus en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=80m/min	**99**
35	Evolution de l'usure VB et VS lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 trempés et revenus en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min	**100**
36	Evolution de l'usure VB et VS lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et C45 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min	**100**

37	Evolution de l'usure VB et VS des différents matériaux de coupe testés lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 trempés et revenus à Vc=80m/min	**100**
38	Evolution de l'usure VB et VS des différents matériaux de coupe testés lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 trempés et revenus à Vc=120m/min	**101**
39	Micrographie de l'usure des plaquettes H13A après l'usinage de l'acier C45trempé à Vc= 120m/mn, fz=0.018 mm/d, ap=0.5mm a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**104**
40	Micrographie de l'usure des plaquettes GC1030 après l'usinage de l'acier C45trempé à Vc= 120m/mn, fz=0.018 mm/d, ap=0.5mm a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB,c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**104**
41	Micrographie de l'usure des plaquettes GC4230 après l'usinage de l'acier C45trempé à Vc= 120m/mn, fz=0.018 mm/d, ap=0.5mm a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**105**
42	Micrographie de l'usure des plaquettes GC2030 après l'usinage de l'acier C45trempé à Vc= 120m/mn, fz=0.018 mm/d, ap=0.5mm a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**105**
43	Micrographie de l'usure des plaquettes H13A après l'usinage de l'acier C45trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**106**
44	Micrographie de l'usure des plaquettes GC1030 après l'usinage de l'acier C45trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**107**
45	Micrographie de l'usure des plaquettes GC4230 après l'usinage de l'acier C45trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB,c)Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**108**
46	Micrographie de l'usure des plaquettes GC2030 après l'usinage de l'acier C45trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c)Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**109**
47	Micrographie de l'usure des plaquettes H13A après l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**110**
48	Micrographie de l'usure des plaquettes GC1030 après l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**111**
49	Micrographie de l'usure des plaquettes GC4230 après l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**112**

50	Micrographie de l'usure des plaquettes GC2030 après l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c)Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque	**113**
51	Evolution de la rugosité de l'acier C45 trempé en fonction des matériaux de coupe à Vc=120m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm	**114**
52	Evolution de la rugosité de l'acier C45 trempé et revenu en fonction des matériaux de coupe à Vc=80m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm	**114**
53	Evolution de la rugosité de l'acier C45 trempé et revenu en fonction des matériaux de coupe à Vc=120m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm	**114**
54	Evolution de la rugosité de l'acier 100Cr6 trempé et revenu en fonction des matériaux de coupe à Vc=80m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm	**115**
55	Evolution de la rugosité de l'acier 100Cr6 trempé et revenu en fonction des matériaux de coupe à Vc=120m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm	**115**
56	Evolution de la forme du copeau en fonction de l'usure et de la vitesse de coupe pour la GC4030 lors de l'usinage de l'acier C45, a) Vc=80m/min, b) Vc=120m/min,	**117**
57	Evolution de la forme du copeau en fonction de l'usure et de la vitesse de coupe pour la GC4030 lors de l'usinage de l'acier 100Cr6, a) Vc=80m/min, b) Vc=120m/min,	**118**
58	Evolution de la forme du copeau en fonction de l'usure et de la vitesse de coupe pour les cermets CT530 lors de l'usinage de l'acier C45, a) Vc=80m/min, b) Vc=120m/min	**118**
59	Evolution de la forme du copeau en fonction de l'usure et de la vitesse de coupe pour les cermets CT530 lors de l'usinage de l'acier 100Cr6, a) Vc=80m/min, b) Vc=120m/min	**119**
60	Evolution de la forme du copeau de l'acier C45 en fonction de la vitesse de coupe lors de son usinage par les différentes plaquettes, a) H13A, b) GC1030,c) GC4230, d) GC2030	**120**
61	Evolution de la forme du copeau de l'acier 100Cr6 en fonction de la vitesse de coupe lors de son usinage par les différentes plaquettes, a) H13A, b) GC1030,c) GC4230, d) GC2030	**120**
62	Micrographies du copeau en fonction de la Vc et l'acier usiné par les différents matériaux à outils, a)H13A, b) GC1030, c) GC4230, d) GC2030	**121**

INTRODUCTION

A ce jour, l'enlèvement de matière par outil coupant occupe toujours une place en termes de coût, dominante parmi les procédés de mise en forme des matériaux. L'accroissement des performances des machines-outils, des outils de coupe a permis à ce procédé de garder un niveau de compétitivité grâce aux gains de productivité et une augmentation de la qualité (dimensionnelle, géométrique, état et intégrité de surface, entre autres). Les procédés d'usinage sont très utilisés dans l'industrie pour mettre en forme les pièces mécaniques. Leurs applications remontent à plus de 200 ans (tour à charioter de Vaucanson (1751) et la raboteuse de Focq (1775), par exemple), mais dans la forme actuelle, il faut attendre les travaux de Taylor (1903).

La concurrence internationale et l'accroissement de la qualité des pièces fabriquées, poussent à améliorer ces procédés. De plus, les recherches engagées dans ce domaine portent sur le triptyque indispensable en usinage : la pièce, l'outil, et la machine-outil. La pièce fait l'objet d'évolution continue importante notamment sur les géométries toujours de plus complexes à respecter, mais aussi avec les avancées métallurgiques portant sur les microstructures pour obtenir un matériau à usinabilité améliorée ou à forte caractéristiques mécaniques. Les outils, toujours en perpétuelle évolution, se composent de matériaux de plus en plus performants (allant des aciers rapides, des carbure, des céramiques, des Cbn, voire des diamants…), sur lesquels sont déposés des revêtements toujours plus performants, facilitant l'écoulement du copeau et/ou formant une protection thermique de l'outil (TiCN, TiAlN, Al2O3, HFN, CrN…). Les machines-outils, quant à elles ont considérablement évoluées en vue de répondre à des exigences telles que :

- un niveau de technicité important (du mono technique comme le tour ou fraiseuse à multi-technique centre de tournage fraisage), voire multi-procédés (laser et coupe ou encore usinage et rectification...)

- une forte productivité et une flexibilité accrue par la suppression des temps improductif comme le changement d'outils, l'ajout des systèmes de palettisation et de robotisation, ou encore par la réalisation d'enchaînement rapide des opérations (haute cadence de production), la réduction des pertes de temps de réglage d'avant série (mesures de pièces et outils in situ)…

- une plus grande automatisation intégrant les concepts de surveillance et de sûreté au quelle s'ajoute l'augmentation des performances dynamiques (une meilleure rigidité, de plus grandes vitesses et l'accélération lors des déplacements pour des précisions toujours plus faibles), une gestion de la complexité géométrique (machine-outil multiaxes), des puissances et couples accrus…

Cependant, l'utilisation rationnelle des procédés de coupe est encore fortement tributaire des connaissances tant au niveau microscopique, mésoscopique et macroscopique . Si bien que les connaissances en matière de coupe des matériaux gardent encore une grande part d'expérience et exigent de l'utilisateur un bon niveau de savoir faire pour exploiter au mieux les capacités des moyens de production.

Afin d'améliorer la compétitivité du procédé d'usinage face aux autres procédés dans le processus de fabrication, le développement de nouvelles technologies et techniques d'usinage doit être préparé avec attention et plus en amont des bureaux des méthodes et ateliers. Mais plus particulièrement, le fraisage est une opération d'usinage utilisée essentiellement pour les opérations d'ébauche voire de finition. Le principe de cette opération est fondé sur l'enlèvement de matière en ayant des avances selon la direction de l'axe de l'outil principalement.

Or, les industriels s'interrogent fréquemment sur l'intérêt que le fraisage peut présenter en termes de productivité lors d'opération d'ébauche et finition de pièces mécaniques. Ces interrogations portent sur le domaine d'emploi, les types et caractéristiques d'outils, les conditions opératoires (vitesse de coupe, d'avance, profondeur de coupe…), les qualités géométriques obtenues, les temps et coût d'usinage…

C'est dans ce cadre que nous voulons caractériser l'opération de fraisage en vue de fournir les paramètres clés permettant aux personnels des bureaux des méthodes métiers (gammiste, préparateurs…) les moyens proposer des gammes d'usinage utilisant l'opération de fraisage.

Notre approche est résolument orientée vers des outils méthodes permettant de prendre en compte les différents éléments concernés comme la machine, l'outil, la pièce, leur système de fixation, les matériaux, en vue de maîtriser puis d'optimiser l'opération selon des critères prédéfinis (la qualité des surfaces, les efforts mise en jeu, les coûts et les délais de fabrication) (Figure I. 1).



Figure I. 1: Eléments de fraisage.

Présentation de l'étude

En vue d'appréhender la maîtrise de l'opération de fraisage, le travail présenté dans ce mémoire s'articule de la façon suivante :

Le chapitre I porte sur une étude bibliographique. Dans un premier temps, il permet de rappeler les principes régissant le procédé d'usinage par enlèvement de matière, en particulier à l'outil coupant. De plus, un historique de l'usinage positionnera les principales approches et travaux en la matière. Nous voulons ensuite montrer les contraintes liées au fraisage et les données nécessaires à connaître avant de commencer l'usinage par fraisage. Dans un deuxième temps, cet état de l'art permet de faire les points sur les différents modèles en usinage. Dans ce cadre, nous présentons les différentes échelles de l'étude pour mieux choisir l'échelle d'étude de notre travail.

Puis, ce chapitre montre les connaissances de plus en plus précises dans le domaine de la coupe elle-même et permettent de mieux situer notre travail propre dans un domaine plus vaste où les contributions sont moins fréquentes .

Le chapitre II dans ce chapitre, sont représentés les moyens et l'équipement utilisés ainsi que la méthodologie entreprise pour la réalisation de la partie expérimentale.

Le chapitre III Ce chapitre contient les résultats expérimentaux qui traitent principalement le suivi de l'état de surface lors de l'usinage des deux aciers ISO : le C45 et le 100 Cr6 traités et non traités avec les différents matériaux à outils utilisés, ainsi que l'étude de l'usure en dépouille principale VB et en dépouille auxiliaire VS. Nous nous sommes également intéressés à l'étude de la morphologie du copeau produit lors de l'usinage.

Enfin, nous conclurons ce mémoire en analysant les principaux résultats de cette étude. Quelques perspectives sont proposées tant au niveau de l'application de ce travail, qu'aux compléments qui peuvent lui être apportés.

I.1 GENERALITES SUR LA COUPE DES METAUX

I.1.1 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 des dépenses faites aux U.S.A. pour l'usinage des métaux. Il représente 5% du produit national brut, ce qui est énorme pour une seule technique **[1] [2].**

La recherche d'une productivité toujours meilleure de la coupe des métaux est donc une préoccupation majeure. Cette amélioration permanente repose plus ou moins directement sur l'étude approfondie des mécanismes physiques et des lois régissant ce procédé. Celle-ci reste donc un objectif essentiel. Son intérêt ne peut être éclipsé par le développement de nouveaux moyens d'usinage ou de nouvelles techniques de commande et de programmation même si ces derniers points participent aussi au développement de la fabrication à grande vitesse.

La mise en œuvre rationnelle de ces techniques passe en effet par une connaissance approfondie du processus de coupe et une maîtrise des paramètres qui le contrôlent.

I.1.2 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. Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leur 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.

En résumé, l'usinage par enlèvement de copeaux désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de matière à l'aide d'un outil tranchant. Cette technique ancienne est souvent appelée coupe onéreuse dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux). Cependant, elle reste une technique de fabrication importante et répandue (Figure I.1).

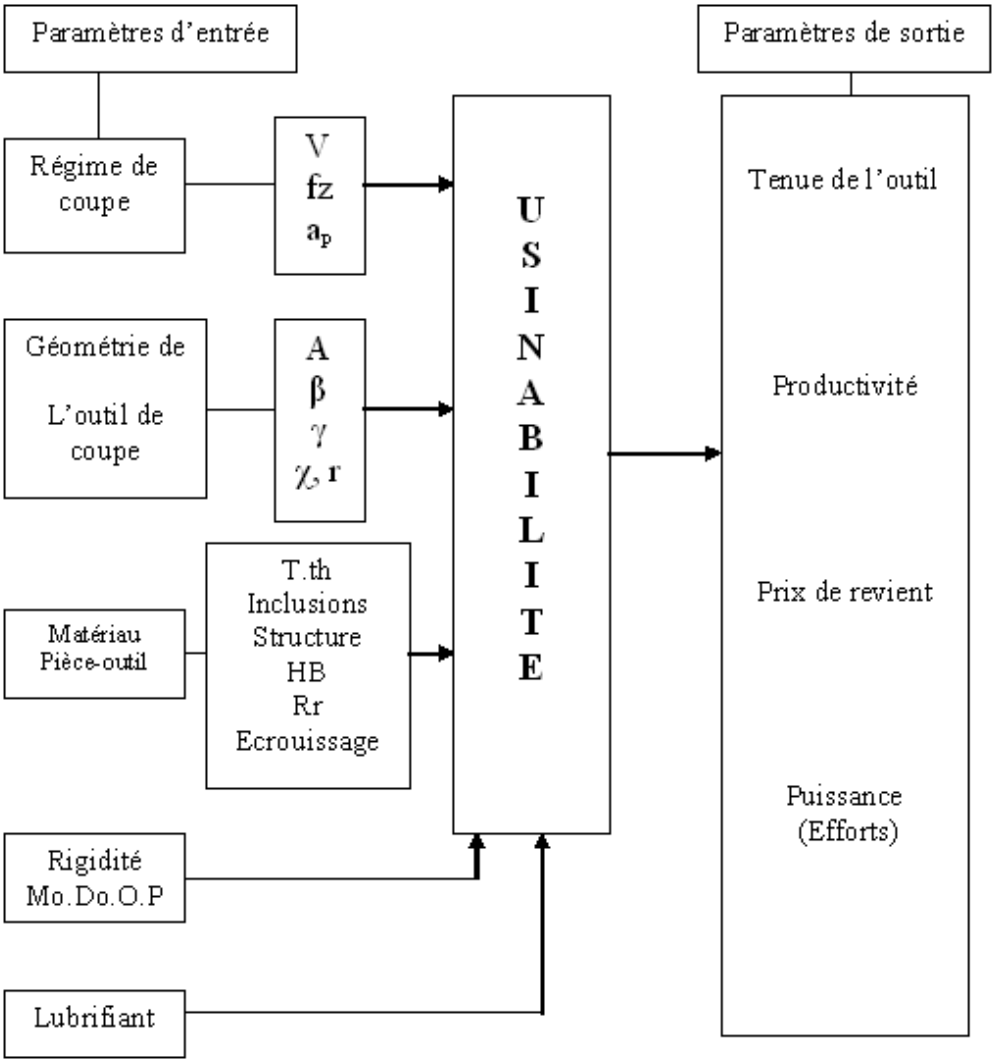


Figure. I.1. Schéma structural de l'usinabilité

I.1.3 L'étude des divers modes de mise en œuvre de la coupe des métaux :

A partir de la définition précédente plusieurs critères de mise en œuvre peuvent être dégagés **[3]**. Une classification peut être envisagée en fonction de :

a) la nature du mouvement relatif outil/pièce et accessoirement des mouvements outil/bâti de la machine (translation, rotation, mouvement hélicoïdal, ...),

b) la géométrie de la surface usinée : plane, de révolution concave ou convexe,

c) la géométrie de l'ensemble outil/pièce.

Cette classification suggère les différents cas que l'on peut rencontrer dans l'étude des phénomènes de coupe, ces divers cas se différencient par une complexité plus ou moins grande, suivant la nature des mouvements relatifs outil/pièce, la multiplicité des tranchants et la variabilité des profils d'arête et des conditions locales. Dans les études fondamentales, on s'efforce de définir de façon univoque et la plus simple possible un certain nombre de paramètres mesurables, en vue de conduire l'analyse et l'exploitation des résultats. Malgré le caractère restrictif de ces choix, la généralisation des résultats ainsi obtenus est recherchée ensuite. Elle est parfois difficile à établir.

Les autres cas que l'on peut rencontrer relèvent en effet des mêmes lois fondamentales. Ainsi dans le cas d'un outil dont le ou les tranchants travaillent dans des conditions variables suivant le point considéré de l'arête (forêt par exemple) on peut décomposer ce tranchant en plusieurs segments de petites dimensions opérant chacun dans des conditions déterminées (Vc, angles caractéristiques...) et constituant autant d'outils élémentaires assimilables à l'outil de base précédemment défini**[4] [5]**.

I.1.4 Définition de l'usinabilité

L'usinage est exclusivement une opération de mise en forme par outil coupant avec formation de copeaux. Il a pour but de fabriquer des pièces avec une précision macro géométrique et micro géométrique imposée. Pour un prix de revient minimal **[6]**, la solution adoptée en pratique, sera toujours une affaire de compromis car en dehors des progrès techniques, toute précision n'est accrue qu'en augmentant le prix de revient. Ceci permet de définir deux premiers critères caractérisant l'aptitude à l'usinage et qui seraient donc:

- La précision de cotes macro et micro géométriques,
- Le prix de revient.

D'autres facteurs qui définissent l'aptitude à l'usinage sont :

- La durée de vie de l'outil (endommagement des outils),
- L'état de surface,
- Les efforts de coupe,
- La morphologie du copeau.

Les mesures des cotes macro et micro géométriques et des efforts de coupe sont des mesures instantanées. Elles demandent un matériel adapté **[7]** qui est rarement mis en œuvre en permanence dans le cadre d'une production continue. En ce qui concerne les mesures relatives à la durée des outils, elles sont longues et délicates et demandent un temps considérable lorsqu'elles sont faites dans des conditions de production industrielles.

En pratique, les variations d'usinabilité sont telles que, malgré l'utilisation de notions telles que celles de vitesses de coupe minimales ou d'avances minimales, il arrive d'obtenir des temps de tenues d'outils pratiquement nuls ou même des casses d'outil, ce qui est particulièrement coûteux. Les avantages industriels du maintien dans les limites aussi étroites que possible de l'usinabilité sont donc certains. Ceci est valable quelle que soit le facteur d'aptitude à l'usinage considéré. Cependant l'usage fait apparaître que le facteur qui concerne la tenue des outils a une importance majeure (figure I.2).

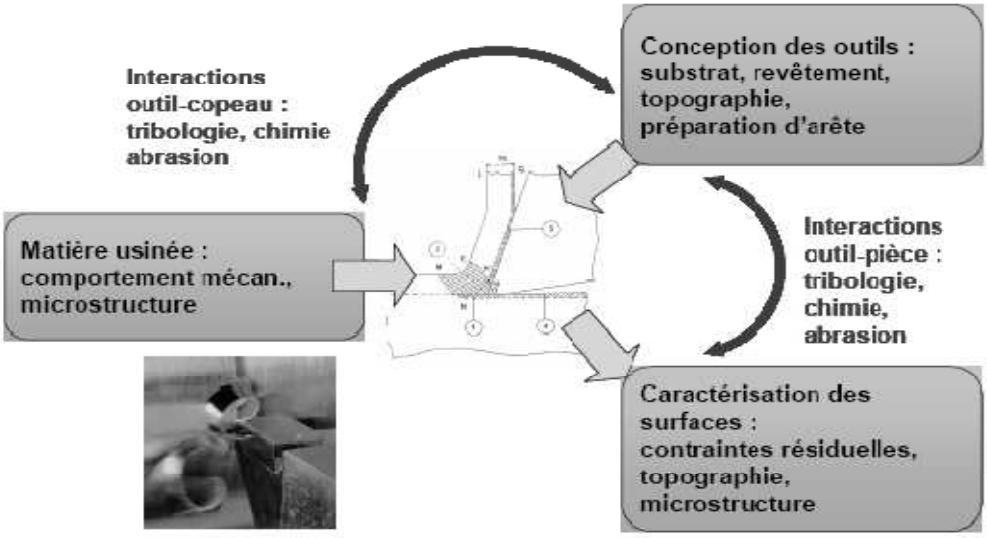


Figure I.2. Interactions Pièces-Outils-Matière en usinage. **[8]**

I.1.5 Usinage à sec

Les initiatives gouvernementales concernant la prévention de la pollution et le respect de l'environnement, de la sécurité et de la santé des populations exercent une pression croissante sur l'industrie afin qu'elle minimise ses rejets. Les industries du travail des métaux sont particulièrement concernées, notamment pour l'utilisation des fluides de coupe en usinage. L'usinage à sec est écologiquement souhaitable et devrait bientôt devenir incontournable.

L'usinage à sec des aciers et des alliages à hautes caractéristiques mécaniques passe par la réalisation de nouveaux revêtements d'outils et l'optimisation des conditions de coupe. Les revêtements doivent être suffisamment durs et résistants pour travailler ces matériaux et avoir des propriétés autolubrifiantes afin de remplacer les fluides de coupe. Certains sont déjà disponibles et d'autres sont à l'étude. **[9]**

I.2 Le fraisage

Le fraisage est, dans son principe, un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance). Aujourd'hui, toutefois, et on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction. L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux **[10,11].**

I.2.1 Paramètres de coupe

Pour configurer l'opération de fraisage, il faut commencer par établir certains paramètres (Figure I.3) définissant la dynamique de la fraise rotative, avec un diamètre spécifié (De), des

diamètres maximums (Dc2 ou D3), un déplacement par rapport à la pièce, et un diamètre de coupe effectif (De), base de la vitesse de coupe.

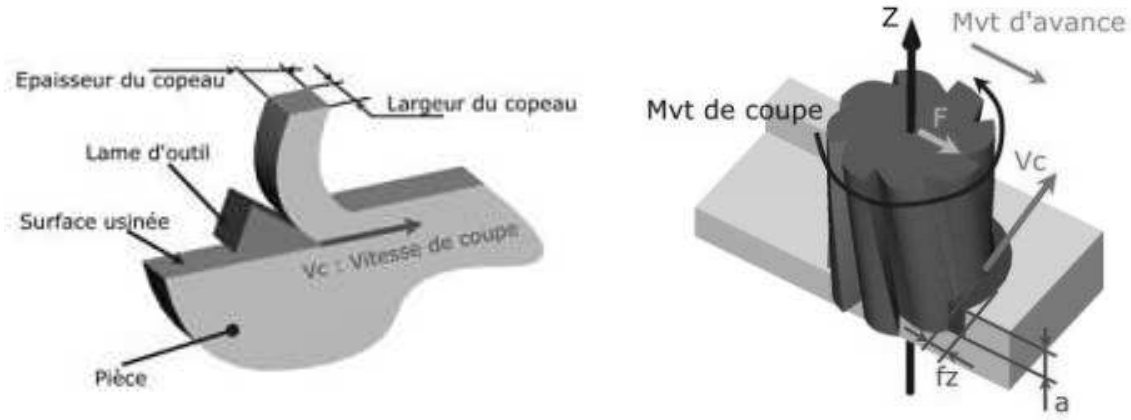


Figure I.3.Paramètres de coupe **[12]**

La **vitesse de coupe (v_c)** en m/min indique la vitesse de surface à laquelle l'arête de coupe usine la pièce. Il s'agit d'un paramètre d'outil faisant partie des conditions de coupe, qui garantit que l'opération est réalisée de manière efficace et dans le champ d'application recommandé du matériau de coupe.

La **vitesse de rotation (n)** en tr/min est le nombre de rotations par minute effectuées par la fraise sur la broche. Il s'agit d'un paramètre machine calculé à partir de la valeur recommandée de vitesse de coupe pour une opération donnée.

L'**avance par minute,** également appelée avance de table, avance machine ou vitesse d'avance (v/) en mm/min est l'avance de l'outil par rapport à la pièce en distance par unité de temps, liée à l'avance par dent et au nombre de dents de la fraise.

L'**épaisseur de copeaux maximale (h_{ex})** en mm est le facteur limitant le plus important d'un outil pour une opération. L'arête de coupe d'une fraise est conçue et testée pour une valeur de départ recommandée, ainsi que des valeurs minimales et maximales.

En fraisage, l'**avance par dent (f_z)** en mm/ dent est une valeur destinée à calculer l'avance de table. Etant donné que la fraise est un outil à plusieurs dents, il est nécessaire d'avoir un paramètre qui garantit que chaque dent usine sous des conditions satisfaisantes. L'avance par dent correspond à la distance linéaire

parcourue par l'outil lorsqu'une dent donnée est en prise. La valeur de l'avance par dent est calculée à partir de la valeur de l'épaisseur de copeau maximale recommandée.

Le **nombre de dents total de l'outil (z_n),** qui varie considérablement, est utilisé pour déterminer l'avance de table, tandis que le nombre effectif de dents (zc) est le nombre de dents en prise. Un certain nombre de facteurs influencent le nombre de dents qui convient le mieux : la matière et la largeur de la pièce, la stabilité, la puissance de la machine et l'état de surface.

L'**avance par tour (f_n)** en mm/tr est une valeur utilisée en particulier dans les calculs d'avance, souvent pour déterminer la capacité de finition d'une fraise. C'est un paramètre secondaire indiquant la distance parcourue par la fraise en un tour.

La **profondeur de coupe axiale (a_p)** en mm correspond à la quantité de métal que l'outil enlève sur la face de la pièce. Elle correspond à la distance à laquelle l'outil est réglé en dessous de la surface non usinée.

La **largeur de coupe radiale (aj)** en mm est la largeur sur laquelle le diamètre de la fraise est engagé en coupe. Il s'agit de la largeur de la surface usinée ou, si le diamètre d'outil est plus petit, de la largeur couverte par l'outil.

L'**épaisseur moyenne de copeau (hj)** est utile pour déterminer les forces de coupe spécifiques et effectuer des calculs de puissance. Elle est calculée par rapport au type d'engagement de la fraise.

L**e débit copeaux (Q)** est le volume de métal enlevé par unité de temps en mm3 et peut être déterminé à l'aide de la profondeur de coupe, de la largeur de coupe et de l'avance.

L**e temps d'usinage (Te)** ou période d'engagement de la fraise est la longueur d'usinage (Im) divisée par l'avance de table.

L**a force de coupe spécifique (ket)** est un facteur de calcul de puissance tenant compte de la matière en question, pour une certaine épaisseur de copeau. Elle est liée à l'usinabilité, ainsi qu'à l'avance et à la vitesse de coupe.

L**a puissance (Pc) et le rendement** (r)) sont des paramètres machine. La puissance nette peut être calculée pour s'assurer que la machine en question est adaptée à la fraise et à l'opération envisagée.

En ce qui concerne la géométrie de coupe en fraisage, **l'angle d'attaque (κ)** de la fraise est le principal facteur influençant la direction de la force de coupe et l'épaisseur de copeau **[13].**

I.2.2 Géométrie de l'outil de coupe

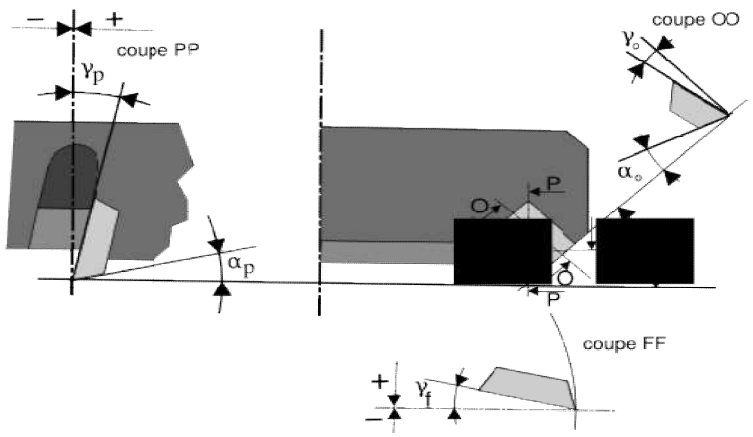


Figure I.4 .Géométrie de l'outil de coupe **[14]**

- **L'angle de dépouille α**

L'angle de dépouille dépend surtout de la matière usinée (la matière de la fraise), le diamètre, l'avance ayant aussi une influence.

- **L'angle de coupe γ**

L'angle de coupe γ permet le glissement du copeau, il donne aussi une plus ou moins grande résistance à l'arrête de coupe, il sera grand sur des matières tendres et il peut être négatif (réversibilité des plaquettes carbures).Il se divise en γ_p coupe vers l'arrière (axial) et γ_f coupe latéral (radial).

- **Les angles γ_f et γ_p (angles de coupe axial et radial)**
- **L'angle de direction d'arête Kr** [14]

I.2.3 Influence de la géométrie de l'outil en fraisage

a) Influence des angles des outils

Selon le point de vue interaction entre l'outil et la pièce, les travaux concernant l'amélioration de la géométrie des outils en fraisage, et en particulier sur l'angle de dépouille ont contribué à augmenter la durée de vie de l'outil et la qualité micro-géométrique de la surface. On propose une méthode d'optimisation des angles de coupe axiale et radiale à partir de l'étude dynamique de la fraise et de la pièce. Wertheim a développé une géométrie évolutive des plaquettes amovibles sur les fraises à surfacer et de bout. Cette nouvelle géométrie de plaquettes amovibles améliore la qualité macro-géométrique de la surface et diminue la composante d'effort tangentiel de coupe.

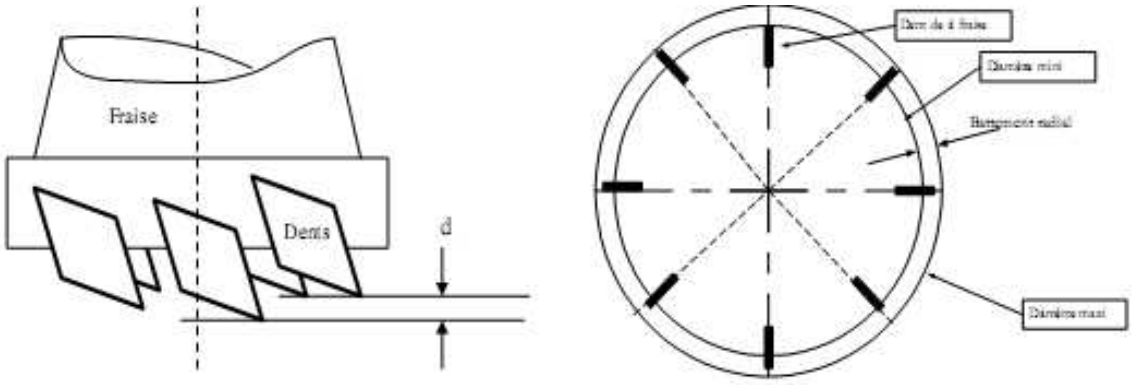
b) Influence de la géométrie du brise copeau

Conjointement à l'amélioration de la géométrie de coupe, Wertheim a développé une forme spécifique de brise copeau limitant l'usure des plaquettes amovibles. La brise copeau modifie ainsi la distribution des composantes de l'effort de coupe et réduit l'épaisseur du copeau. En fraisage combiné, cette géométrie améliore la précision dimensionnelle, géométrique et la rugosité des surfaces épaulées.

c) Influence de la position relative des parties actives de l'outil

La position des parties actives ou plaquettes amovibles ne sont pas sans défauts. Il existe des écarts entre la position réelle et théorique d'après Ber. Ces défauts liés au battement axial et radial modifient la section du copeau et la distribution des efforts de coupe indiqua Ber. Cela induit des écarts de géométrie et d'états de surfaces selon Kline.

L'espacement inégal entre les dents de la fraise génère des irrégularités de profil. Shirase et Altintas utilisent l'espacement ou le pas variable entre les dents en fraisage de bout. Ainsi, les efforts de coupe sont redistribués dynamiquement ce qui limite les nuisances vibratoires et réduit les écarts géométriques (figure I.5).



a) Axial **b)** Radial

Figure I.5. Battement axial et radial des dents de la fraise **[15]**

I.2.4 Influence de la géométrie de coupe

La géométrie de coupe et de l'outil bien que contenant des informations différentes sont dépendantes. En effet, les informations géométriques de l'outil caractérisent la géométrie de coupe tels que les engagements radial et axial, les angles d'entrée et de sortie et le nombre de dents en prise**.**

a) Angle d'engagement et angle de sortie

L'angle d'engagement permet de définir la position du centre de la fraise par rapport aux surfaces générées. La conséquence de l'engagement se traduit sur l'état de surface de la pièce(Figure I.6).

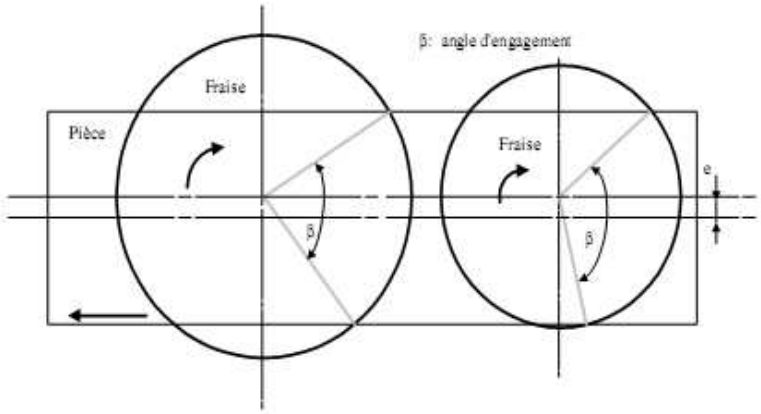


Figure I.6. Influence de la géométrie de coupe **[15]**

Pekelharing définit un angle de sortie de la fraise qui indique le seuil de dangerosité de la tenue de la fraise en surfaçage. L'angle fourni un indicateur qualitatif sur la forme du copeau proche de la surface de sortie.

Pekelharing reconstruit l'historique de la formation du copeau et propose une classification pour limiter les formations de bavures en sortie de surface. Ces travaux sont prolongés par Van Lutterwelt en réalisant des tests supplémentaires avec des plaquettes

amovibles de différentes géométries, avec des conditions de coupe et d'angle de sortie variant de -50 à 40 degrés(Figure I.7).

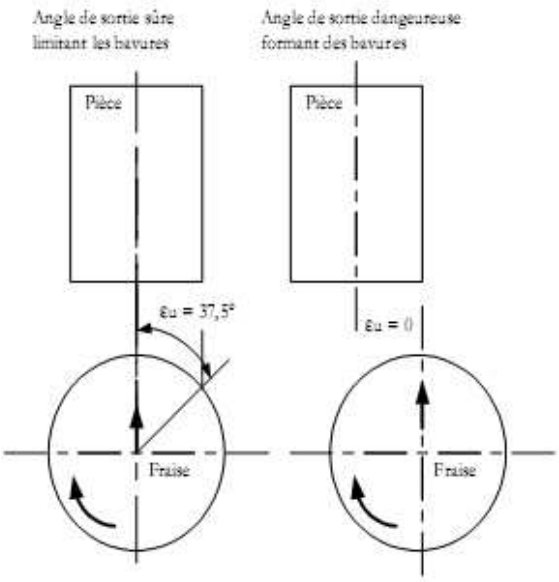


Figure I.7. Influence de l'angle de sortie sur la formation de bavures **[15]**

La formation de bavures n'est pas un problème anodin en finition des surfaces et génère de la non qualité et des procédés d'ébavurage coûteux.

b) Profondeur axiale de coupe

En fraisage combiné, la fraise subit une déformée dans l'espace (Figure I.8). Cette défection n'est pas constante dans l'espace et dans le temps car la section du copeau en fonction de la profondeur de passe varie au cours de l'usinage. Les effets portent sur les écarts de forme et de rugosité des deux surfaces.

c) Nombre de dents en prise

Le nombre de dents en prise modifie la fréquence d'excitation de la fraise et les sollicitations (efforts, moments de torsion et de flexion) qui lui sont appliquées. Or toutes variations en direction et en intensité des sollicitations conduisent lors de la génération des surfaces à des écarts de forme et des écarts de rugosité (Figure I.8).

Le problème relatif au nombre de dents en prise est connexe au problème de l'espacement des dentures et à la détermination des efforts de coupe.

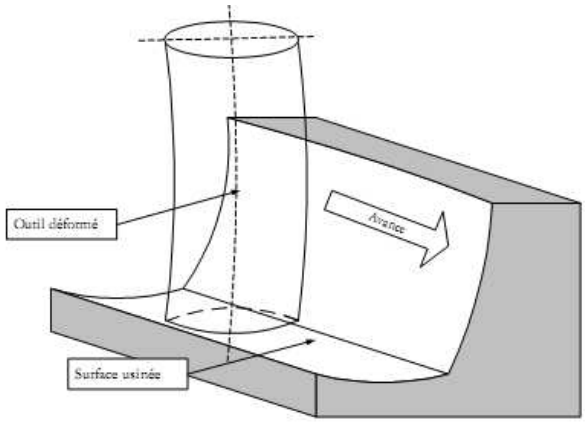


Figure I. 8. Déflexion de la fraise en fraisage de bout **[15]**

Le comportement vibratoire de l'outil isolément est une vue de l'esprit car la dynamique de l'outil est influencée par le comportement vibratoire de l'ensemble de la machine-outil, de la pièce et de la porte pièce. Tlusty et Ismail ont montré que le procédé de fraisage est un phénomène vibratoire et qu'il peut être modélisé par un système à 2 degrés de liberté en coupe orthogonale. Heisel propose une méthode d'analyse des surfaces (rugosité) pour identifier la dynamique de l'outil (mouvement relatif entre la pièce et l'outil) en fraisage en avalant. Il identifie les fréquences nuisibles à la génération de surface en fonction de l'engagement de la fraise, du nombre de dents en prise et de leur position au cours de l'usinage **[15]**

I.2.5 Domaines d'application

Le fraisage est employé pour diverses applications dans les domaines, aéronautiques, automobiles, énergétiques, moules et matrices… (Figure I.9).

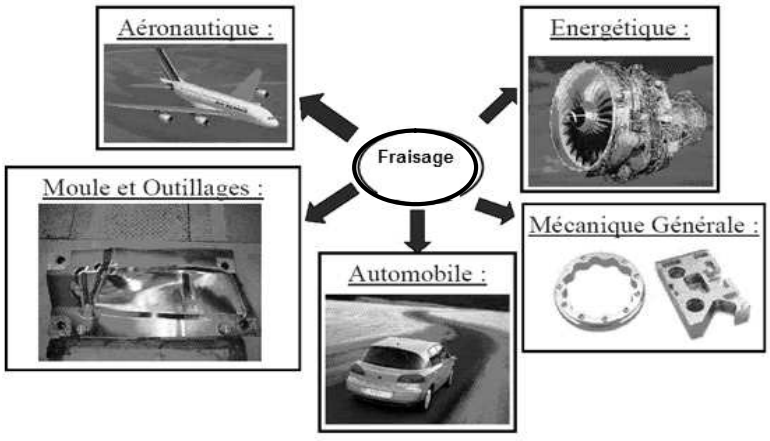


Figure I.9. Domaines d'application du fraisage **[15]**

I.3 MATERIAUX DE COUPE

I.3.1 Introduction

Les outils de coupe (Figure I.10), essentiellement destinés à l'usinage des métaux, sont également utilisés dans d'autres secteurs comme l'industrie minière, celle du bois ou celle du papier. Le marché mondial de l'outil en métal dur est ainsi immense. L'usinage des métaux concerne de nombreux secteurs comme l'industrie automobile, le domaine spatial ou l'aéronautique. Pour économiser du temps et donc de l'argent, on cherche à augmenter les vitesses de coupe et les épaisseurs enlevées à chaque passage, sans pour autant nuire à la précision ou à l'état de surface. Les enjeux financiers considérables guident ainsi la recherche vers de nouveaux outils de coupe plus performants afin de supporter des conditions de coupe plus sévères **[16]**.

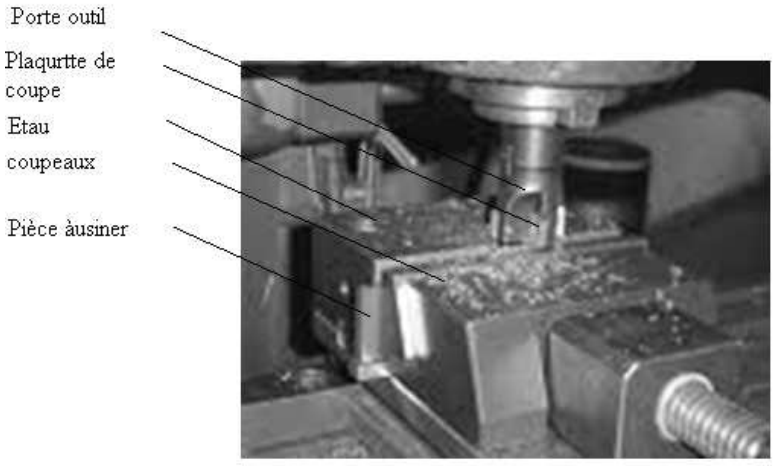


Figure I.10. Outil de coupe (plaquette) lors d'une opération de tournage **[16].**

En vue de satisfaire ces exigences, un outil de coupe doit être tenace pour résister aux chocs rencontrés lors de l'usinage, il ne doit pas se déformer plastiquement et sa déformation élastique doit être minimale afin de garantir une bonne précision de coupe, il doit être dur pour résister à l'usure et doit supporter les hautes températures atteintes durant les opérations de coupe. Malheureusement, ces propriétés ne vont en général pas de pair et l'amélioration de l'une d'entre elles se fait au détriment des autres. L'association de ces qualités au sein d'un seul matériau est ainsi difficile à obtenir.

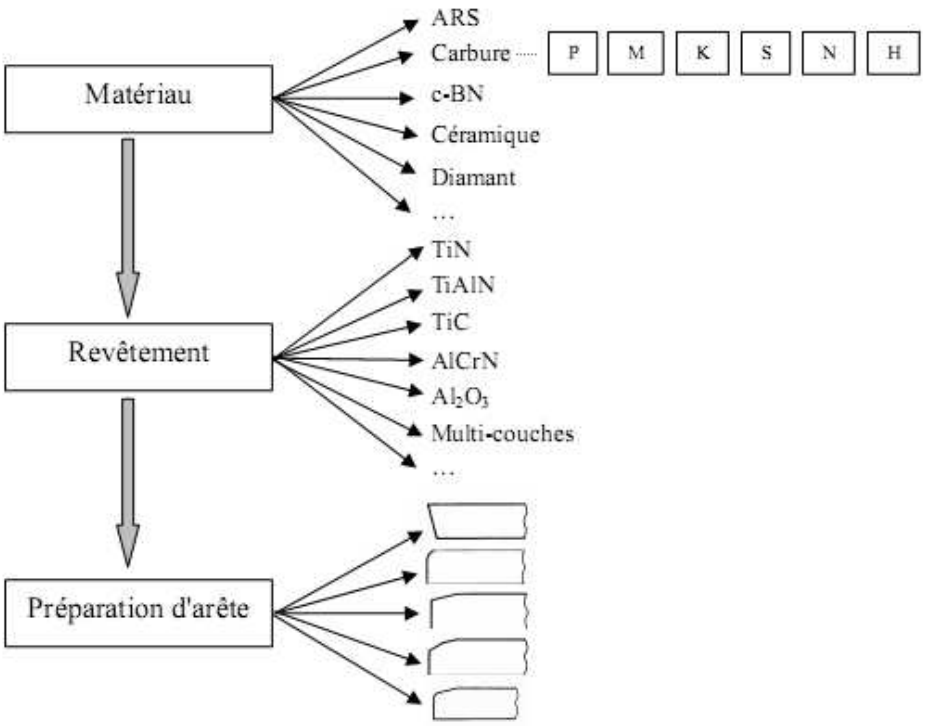


Figure I.11. Choix d'un type d'arête et définition d'une famille d'outil **[17]**

Ceux-ci se répartissent principalement en deux familles: les carbures à base de WC-Co et les cermets à base de TiCN-Mo-(Ni, Co). Les carbures présentent une dureté et une ténacité qui leur permettent une large plage d'utilisation. Toutefois, leur médiocre résistance à la déformation à haute température les destine plutôt à des applications d'ébauches. Les cermets présentent une meilleure résistance à la déformation à haute température que les carbures mais leur ténacité reste plus faible. Ces matériaux sont ainsi surtout utilisés dans des applications d'usinage de finition où les vitesses de coupe sont élevées et les chocs mécaniques faibles. La résistance des deux familles de matériaux à l'usure mécanique et chimique est améliorée par des procédés de recouvrement CVD permettant de protéger la surface des outils de coupe avec des couches céramiques **[16].**

I.3.2 Matériaux de coupe et revêtements

L'utilisation de différentes vitesses pour l'usinage d'aciers par exemple - n'a pu se faire sans l'évolution des matériaux d'outils. En effet, il faut garantir un très bon comportement de l'outil et une usure réduite, même lors d'usinages «difficiles». Pour les outils carbures, l'évolution des revêtements de surface apporte une solution au problème d'usure trop rapide.

Les dépôts durs réalisés par PVD (dépôt physique en phase vapeur) sont appliqués depuis quelques années pour améliorer la résistance à l'usure des outils de coupe en carbure. Les alliages à base nickel sont particulièrement difficiles à usiner à cause de leurs propriétés mécaniques élevées à haute température.

L'amélioration de la résistance à l'usure des outils revêtus utilisés est obtenue en améliorant les caractéristiques des dépôts et leur adhérence sur leur support. Les dépôts de TiN, CrN TiCN et AlTiN initialement déposés en monocouches sont aujourd'hui revêtues en architecture multicouche dans le but d'améliorer leurs propriétés tribologiques et mécaniques. Ces dépôts, appliqués à l'échelle nanométrique, aussi appelés nano couches ont récemment permis d'obtenir des couches minces avec des microduretés particulièrement élevées. La période de l'enchaînement des deux couches unitaires constituant cette architecture semble être le paramètre influençant la micro dureté de ces dépôts **[18].**

a) Les 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 **[19]**. 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 I.12.).Il est nécessaire de distinguer 4 zones sollicitant différemment l'outil.

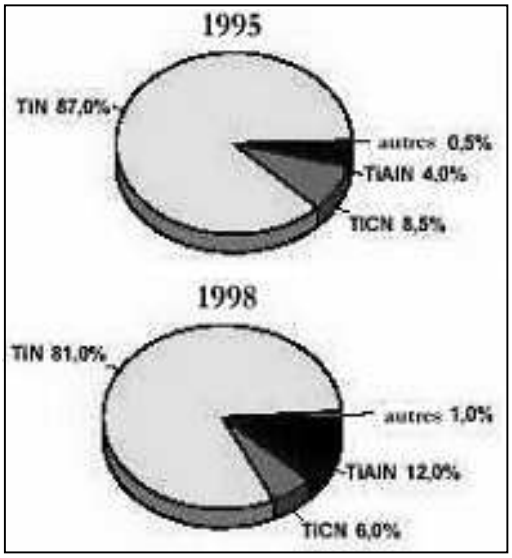


Figure I.12. Statistique sur l'évolution de l'utilisation relative des revêtements pour outils-coupants **[20].**

b) 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 (figureI.13):

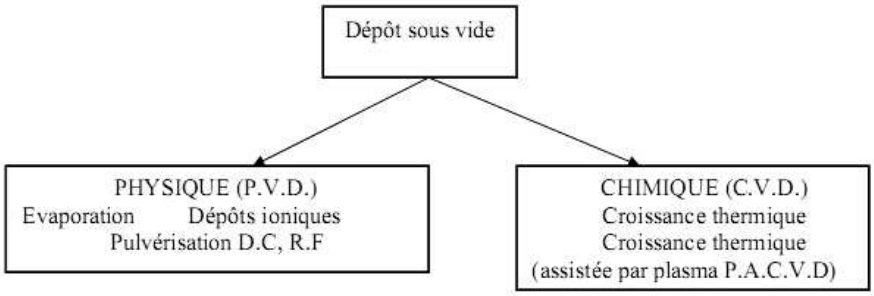


Figure I.13. Classification des techniques de dépôts **[21]**

c) 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 suivant (Figure I.14.):

- 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 **[21]**

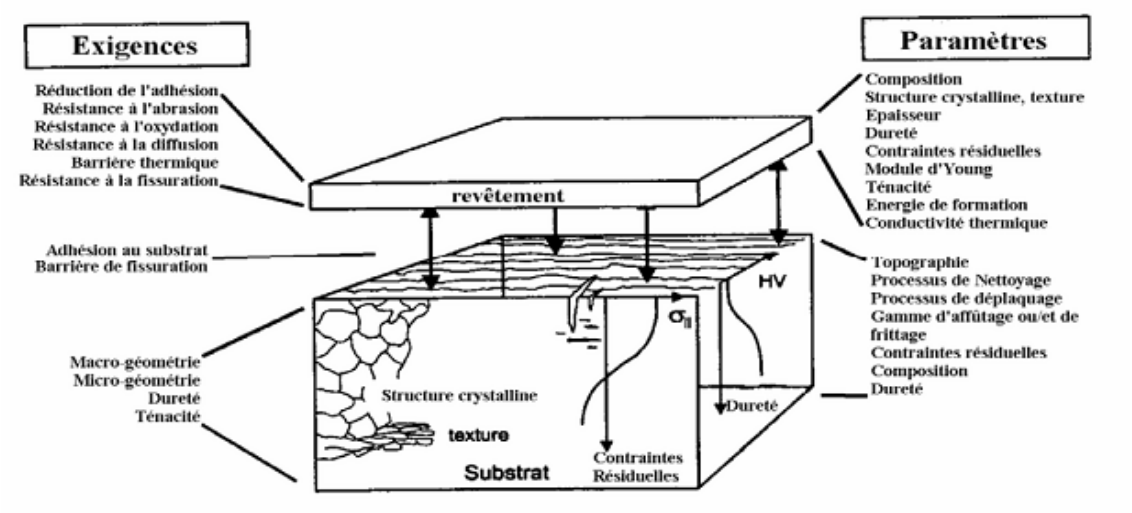


Figure I.14. Cahier des charges d'un revêtement **[22]**.

d) Intérêt d'un revêtement

L'intérêt de déposer un revêtement sur un outil va donc être de limiter l'influence des sollicitations suivantes : (figure I.15.)

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

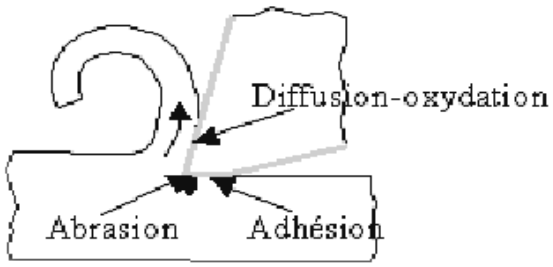


Figure I.15. Zone de sollicitations du couple outil/matière **[21]**

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 (figure I.16).

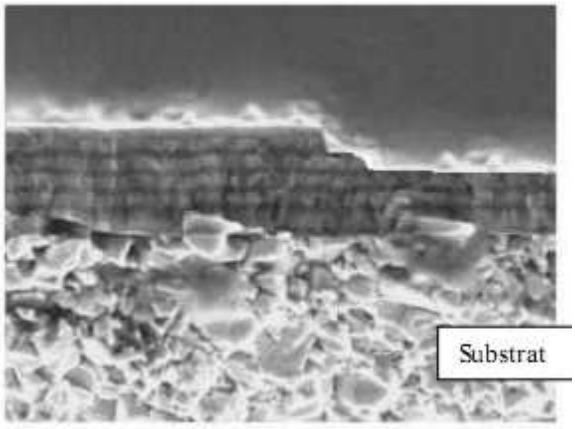


Figure I.16. Intérêt des revêtements multicouches dans la lutte contre la fissuration **[23]**

I.3.3 Matériaux de coupe

a) Les carbures

Les outils carbures de nuances ISO P et K revêtus peuvent être utilisés en usinage, surtout dans le cas de la réalisation d'outillages. En effet, à la différence des outils en acier rapide, le module d'Young élevé des carbures permet l'obtention d'une précision et d'un état de surface acceptables **[24]**. Cependant, l'utilisation d'outils monoblocs est recommandée du fait des forces centrifuges qui peuvent provoquer la rupture de la vis de fixation des plaquettes dans le cas d'outils combinés **[25]**. Mais le principal problème réside dans la tenue de l'arête de coupe à l'usure. En effet, les outils

carbures ont une durée de vie de 2 à 5 fois inférieure en UGV qu'en usinage conventionnel. Ceci incite donc à l'application de revêtements de surface ou à l'utilisation d'autres matériaux d'outils.

On trouve des revêtements de surface surtout sur les outils carbures. Ceci leur confère une meilleure tenue à l'usure. Dans ce domaine, seuls les procédés basse température et faible épaisseur de couche de type PVD (Physical Vapor Deposition) sont utilisés, ceux du type CVD (Chemical Vapor Deposition) étant moins tenaces **[24]**. En effet, le procédé PVD est un dépôt qui se réalise à basse température afin de fragiliser le moins possible le substrat carbure alors que le procédé CVD est un dépôt adhérent obtenu dans des fours entre 800 et 1100˚C.Parmi les revêtements de type PVD, on utilise presque exclusivement des couches à base de titane.

Le revêtement TiN est relativement peu utilisé car ses performances thermiques sont généralement trop faibles. Par contre, d'après le CETIM, le revêtement TiCN apporte une solution à l'usure rapide et progressive des outils non revêtus. En effet, les outils revêtus TiN ne présentent pas de phase d'usure stabilisée après le rodage de l'arête de coupe, alors que les outils revêtus TiCN ont des durées de vie très élevées grâce à une phase stable beaucoup plus importante (figure I.7).

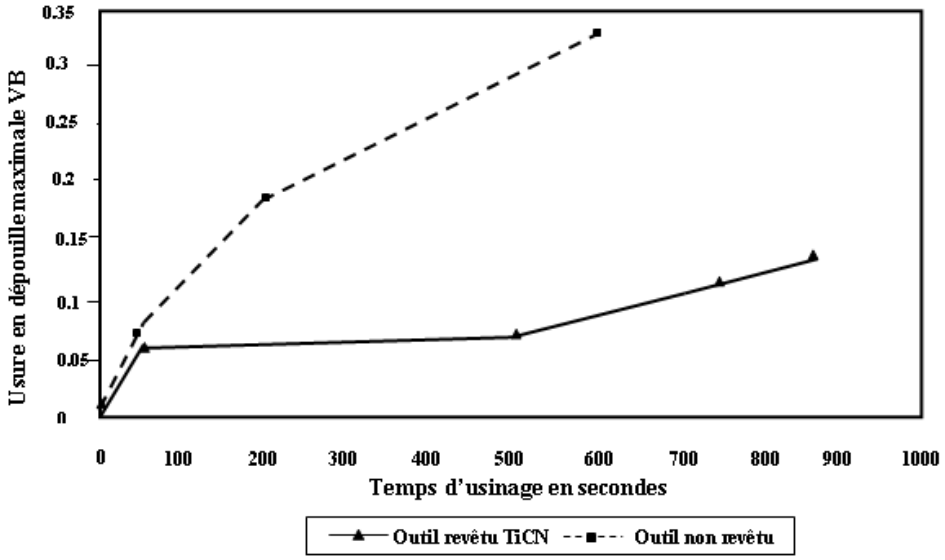


Figure I.17. Influence du revêtement TiCN **[19]**

Ainsi, on obtient avec ce revêtement, une qualité d'état de surface nettement supérieure. Il permet également l'utilisation d'outils carbure pour l'usinage grande vitesse d'aciers traités jusqu'à 55 HRC. Par ailleurs, on trouve également le revêtement TiAlN qui, malgré un comportement excellent aux vitesses de coupe et aux températures élevées, est moins performant que le revêtement TiCN. Ceci est dû en grande partie à son adhérence bien moins bonne sur les substrats que le TiCN. Lors de la coupe, une fois le revêtement décollé, on retrouve alors les propriétés des outils non revêtus.

b) Les cermets

Ce matériau possède une très bonne aptitude aux vitesses de coupe élevées **[24]**. De plus, étant chimiquement inerte dans les aciers, il élimine quasiment le phénomène d'arête rapportée, bien que la température de l'outil soit élevée. Par exemple, celle-ci peut dépasser 950˚C dans le cas de l'usinage avec un outil cermet, à 500 m/min, d'une pièce en 32 CDV 13.

Par contre, P. BAGARD affirme que ce matériau ne convient pas à la coupe en opposition (écaillage rapide et brutal de l'arête de coupe) et supporte mal les chocs et les vibrations (figure I.18).

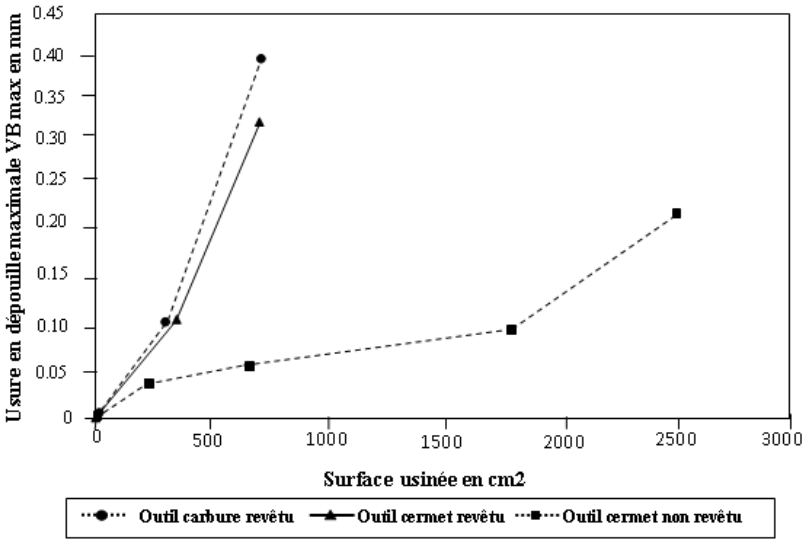


Figure I.18. Comparaison entre les outils en cermet et les outils en carbure **[24]**

Par ailleurs, le cermet est un matériau très difficile à affûter. Ceci augmente donc le coût des outils monoblocs. De plus, le manque de rigidité des outils cermet entraîne souvent des vibrations dans le cas des outils de petits diamètres. Ce comportement vibratoire accentue indéniablement la dégradation brutale de l'arête de coupe.

c) Les céramiques

La haute dureté à chaud est la principale cause de l'utilisation des céramiques, car elle permet une coupe homogène à des températures élevées. Mais pour la plupart, les caractéristiques mécaniques des outils en céramique les rendent inutilisables pour des opérations d'usinage à grande vitesse des aciers. Les propriétés des céramiques à oxyde d'alumine ou mixtes – noires (Al_2O_3+TiC) et blanches (Al $_2O_3$+ZrO_2) – leurs permettent de n'usiner que les fontes grises et les alliages légers à faible résistance mécanique, voire les fontes traitées thermiquement pour les céramiques mixtes (comprenant des matières dures), car elles supportent mal les chocs dus à une coupe discontinue. En comparaison, les céramiques sans oxyde d'alumine – base nitrure de silicium (Si_3N_4) et les sialons (SiAlON) possèdent une ténacité relativement élevée et conviennent bien pour la coupe interrompue. Les céramiques renforcées par fibres (Al_2O_3+SiC) ont des caractéristiques plus élevées à haute température **[24]**.

d) Les Poly cristallins de Nitrure de Bore Cubique

Pour toutes les autres applications, on trouve usuellement des outils poly cristallins. Ils sont de deux types : les Poly cristallins de Nitrure de Bore Cubique (PCBN) et les Poly cristallins de Diamant (PCD). D'après **[26]**, leurs propriétés physiques de dureté, de résistance à la compression et de conductivité thermique leur confèrent une résistance à l'abrasion qui leur permet surtout d'usiner avec des vitesses de coupe plus importantes qu'avec des outils carbures, tout en assurant des états de surface excellents pour des durées de vie plus élevées.

Le nitrure de Bore est un produit de synthèse, que l'on peut obtenir sous deux formes:

- à structure hexagonale (comme le graphite), il est de faible dureté
- à structure cubique (comme le diamant) qui est sa forme la plus dure (il est alors le matériau le plus dur connu après le diamant), dureté qui se maintient jusqu'à 1000˚C.

Les outils PCBN sont fabriqués par frittage de cristaux de synthèse pour obtenir un compact poly cristallin à matrice céramique ou métallique, éventuellement lié à un substrat en carbure de tungstène (figure I.19) **[27]**.

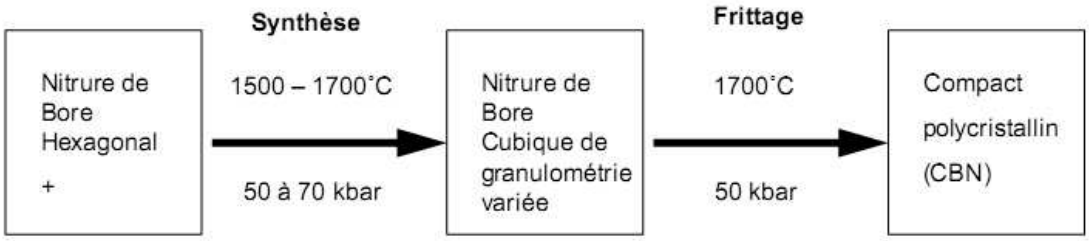


Figure I.19. Obtention de PCBN

Les PCBN sont surtout utilisés sur des aciers et des fontes, pour des duretés allant de 30 à 65 HRC **[24]**. Des essais ont montré que l'usinage à grande vitesse d'une fonte coulée perlitique avec un outil PCBN donnait de meilleurs résultats qu'avec un outil céramique (SiAlON) **[28]**.D'une manière générale, si le matériau de coupe contient plus de 75% de CBN, il est plutôt utilisé pour des opérations d'ébauche. Dans le cas contraire, il est réservé au travail de finition.

e) Les Poly cristallins de Diamant

Le diamant est le matériau le plus dur qui soit connu. On le trouve sous forme naturelle ou synthétique. Le PCD est obtenu par frittage de cristaux de diamant synthétique de granulométries différentes (figure I.20) **[27]**.

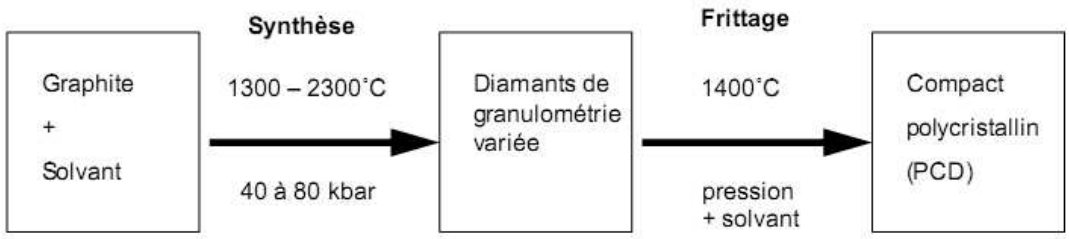


Figure I.20. Obtention de PCD

Contrairement au diamant naturel, le PCD est isotrope, donc plus résilient et plus résistant aux chocs mécaniques. D'autre part, il est, comme le diamant naturel, bon conducteur thermique, ce qui lui permet de réagir chimiquement avec certains métaux. Ainsi, les PCD ne sont pas utilisés pour les mêmes opérations que les PCBN. Ils ne sont performants que sur des matériaux sans carbone puisque le diamant réagit chimiquement avec celui-ci **[24]**.

I.3.4 Coût

De manière générale, le "coût outil" dépend essentiellement de l'application envisagée. En effet, suivant le matériau de l'outil, sa géométrie, le type de lubrification envisagé et les méthodes de production (préréglages hors sites ou non, type de machine, etc.), les coûts peuvent être très différents. Par exemple, si l'utilisation d'outils poly cristallins est souvent recommandée, leur prix est beaucoup plus élevé par rapport aux autres matériaux d'outils : un outil PCBN coûte encore de 5 à 10 fois plus cher que le même outil en céramique.

Enfin, on a vu que les constructeurs cherchent à répondre au problème de dévissage des plaquettes en développant des nouvelles technologies de fixation. Ceci illustre donc le fait que l'on cherche toujours à diminuer le coût outil en proposant des outils combinés. En effet, ceux-ci permettent un changement d'arête de coupe peu coûteux par rapport à l'affûtage d'un outil monobloc.

I.4 USURE DES OUTILS

I.4.1.Introduction

L'analyse de la morphologie de l'usure est une technique d'investigations qui est devenue très employée dans la recherche de la coupe des métaux **[29].**

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 **[30]**. 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 **[31] [32]**.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

une tâche d'une grande importance économique et technologique en productique mécanique **[33] [34]**

La qualité des surfaces usinées dépend directement du degré d'usure de l'outil utilisé.

La norme NF E66 505 définit l'usure de l'outil comme le changement, lors de la coupe, de la forme de l'outil par rapport à sa forme initiale et résultant de la perte progressive de matière de l'outil.

L'usure de l'outil conduit à la destruction complète de l'arête de coupe. Dans ce cas, il est nécessaire de remplacer l'outil après avoir stoppé la coupe. Dans le cadre d'une bonne gestion de fabrication, ceci conduit à bien maîtriser l'usure des outils utilisés et donc, dans la mesure du possible, à connaître :

_ Le volume de copeaux produit entre deux changements d'arête,

_ Le nombre de pièces usinées entre deux changements d'arête,

_ La longueur d'usinage réalisée entre deux changements d'arête

I.4.2 Définition de l'usure

L'usure des outils est un processus de destruction de couches superficielles, qui conduit à la modification progressive de la forme et l'état de surface des pièces usinées. Elle affecte également la géométrie de l'outil, la température, les efforts de coupe, la précision d'usinage et la rugosité de la surface usinée. Elle se traduit avant tout par un arrachement de petites particules de métal des surfaces d'attaque et de dépouille principale et auxiliaire.

Il est à noter que l'usure des outils de coupe se manifeste dans des conditions de travail beaucoup plus difficiles que celles des pièces de machines. En effet la pression spécifique dans les surfaces de contact de pièces de machines ne dépasse pas quelque MPa et la température d'échauffement est inférieure à 100°C alors que la pression spécifique dans les surfaces de contact de la partie active d'un outil est de l'ordre de 1000 à 2000 MPa et la température d'échauffement est de 100°C à 1000°C et plus **[29] [35]**

1.4.3 Les principaux modes d'usure des outils de coupe.

Les différents modes d'usure identifiés dans la littérature sont : l'usure par adhésion, l'usure par abrasion, l'usure par diffusion et l'usure par fatigue. Il faut noter que l'usure par déformation plastique peut être associée à l'usure par abrasion.

1.4.3.1 Usure par abrasion

L'abrasion constitue le mode d'usure le plus répandu dans le domaine industriel notamment en usinage **[36].** L'action des aspérités des corps en contact se fait par déformation plastique ou par micro-coupe. L'abrasion se caractérise par la présence de rayures, de griffures, d'arrachements de petites particules, de polissage, etc… Ces endommagements sont souvent observables sur le

matériau le plus tendre. Par contre, ils peuvent être également observés sur les surfaces dites dures du fait d'inclusions dures dans le corps tendre ou de particules dures issues du corps dur. En effet, les particules arrachées peuvent être évacuées hors du contact, être incrustées dans un des deux corps ou être à l'interface des deux corps pour former un troisième corps et participer au mécanisme d'usure (figure I.21).

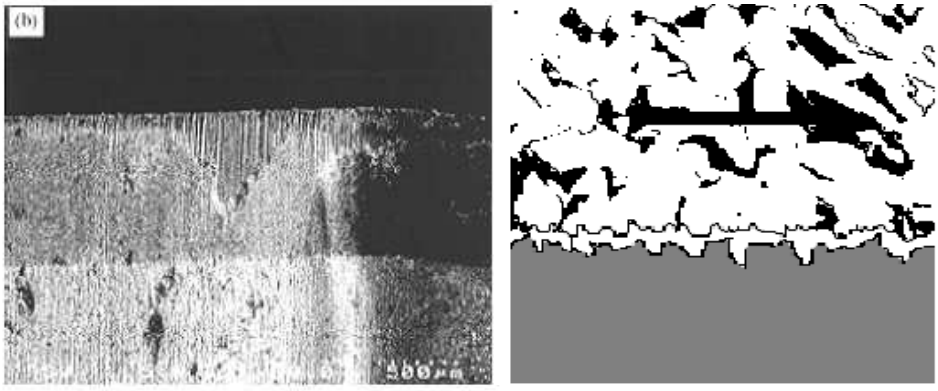


Figure I.21. Processus d'usure par abrasion **[21]**

1.4.3.2 Usure par adhésion

L'usure par adhésion (figure I.22) constitue le deuxième mode de dégradation rencontré en usinage. Sous l'effet de la déformation et des effets de micro-coupe, présentés dans le cas de l'abrasion, de nouvelles surfaces en contact se forment et ces surfaces sont très réactives. S'il y a une affinité entre les éléments chimiques des corps en contact, il y a adsorption (soudure froide) ou solubilité (soudure chaude). L'adhésion est favorisée par des températures localement très élevées (températures flash) induites par le contact répété entre les aspérités. Le résultat de l'adhésion est le transfert de la matière du corps qui présente l'énergie de cohésion la plus faible sur son antagoniste. L'arête rapportée, généralement observée dans le cas de l'usinage des matériaux écrouissables à faible vitesse de coupe, est une forme d'usure par adhésion. Ce mode d'usure a été observé par Han **[37]** lors de l'usinage des aciers 100Cr6 (AISI 52100), C45 (AISI 1045) et 42CrMo4 (AISI 4140).

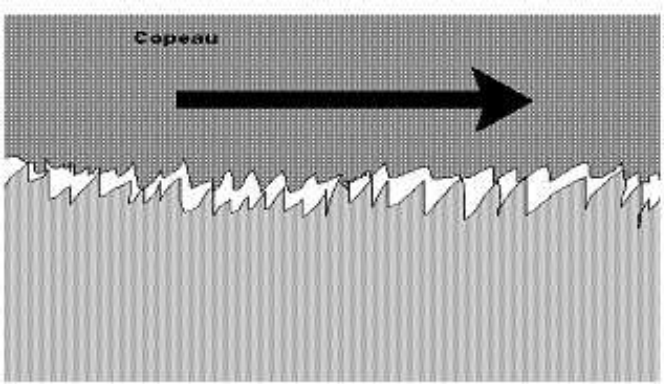


Figure I.22. Processus d'usure par adhésion mécanique **[21]**

1.4.3.3 Usure par diffusion

La diffusion est un mécanisme de solubilité et de migration des atomes d'un corps à l'autre, dans le cas des corps solides. Il faut donc une affinité entre les éléments de la matière usinée et ceux de l'outil. La diffusion apparaît aux grandes vitesses de coupe et dans le cas où la température de l'outil de coupe est très élevée **[38].** C'est un phénomène physico-chimique thermiquement activé, sous fortes pressions de contact. La diffusion est mise en évidence par la présence de nouveaux composés aux dépens des composés initiaux.

Des travaux restent à faire pour la mise en évidence et la compréhension des mécanismes de diffusion. Cela demande des moyens d'analyse adaptés et présente de réelles difficultés. En particulier, l'observation des mécanismes de diffusion se fait en post-usinage. Il faut donc arriver à quantifier la part d'une formation probable de ces composés dans le cas statique (intervalle de temps qui sépare l'opération d'usinage et l'analyse chimique) et la part de ces composés formés dans le cas dynamique (pendant l'usinage).

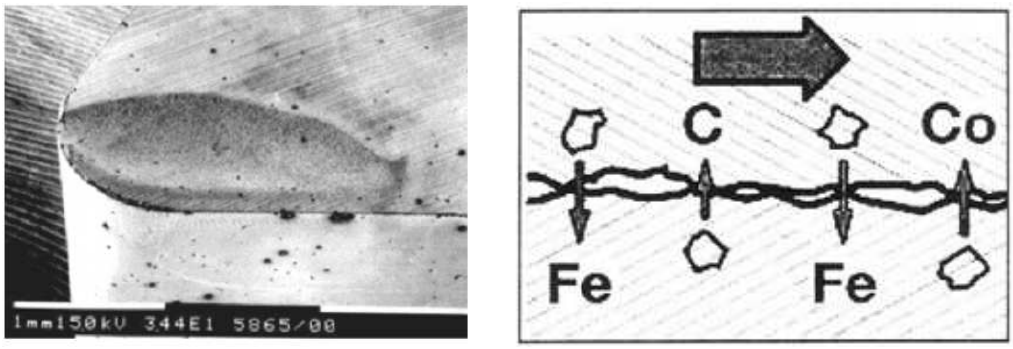


Figure I.23. Processus d'usure par diffusion **[21]**

1.4.3.4 Usure par fatigue thermomécanique

Le phénomène de fatigue est généralement dû à deux types de sollicitations : mécanique et thermique. La fatigue thermique est provoquée par la variation périodique de la température imposée à l'outil dont la dilatation est empêchée. Dans ces conditions, les contraintes créées par les gradients thermiques entre la couche superficielle et celles sous-jacentes, provoquent des fissurations et des écaillages. La fatigue mécanique est due aux vibrations, au frottement, et sollicite l'outil en compression et traction alternées.

L'ensemble des modes de dégradation est influencé par la température. Une cartographie des modes d'usure en fonction de la température établie par Opitz et König **[3]** est illustrée sur la Figure I.24. Selon ce schéma, les modes d'usure observés à toute température sont l'adhésion et l'abrasion. L'abrasion induisant des volumes de matière enlevée plus importants que l'adhésion aux faibles

températures ; la tendance est inversée aux températures moyennes. Aux hautes températures apparaissent l'usure par fatigue ou affaiblissement plastique et la diffusion.

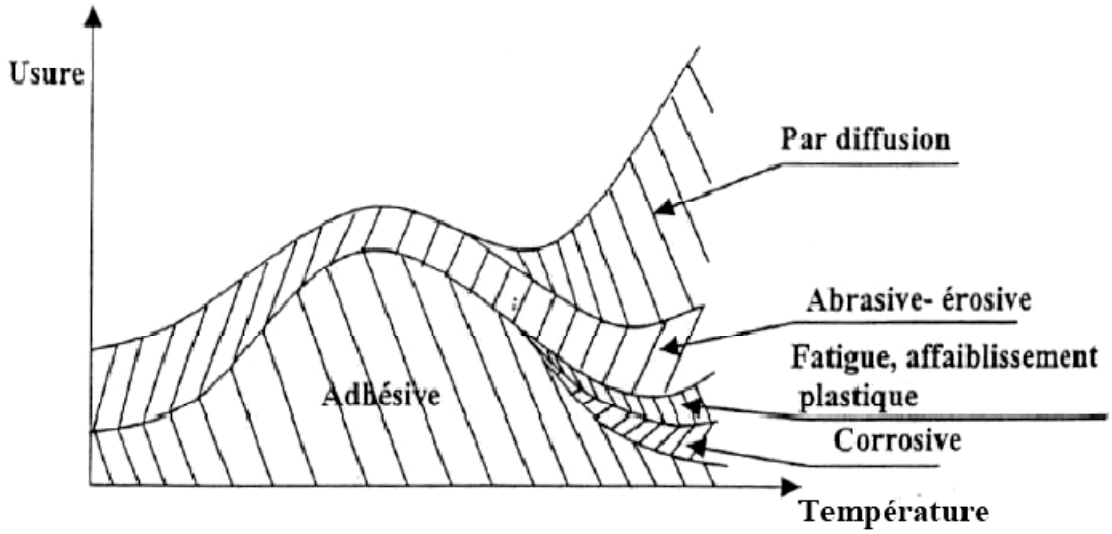


Figure I.24. Types ou modes d'usures selon H. OPITZ et W. KÖNIG

Les différents modes d'usure présentés sont responsables de différentes formes d'usure des outils de coupe qui sont présentées dans le paragraphe suivant.

1.4.4 Les principales formes d'usure des outils de coupe

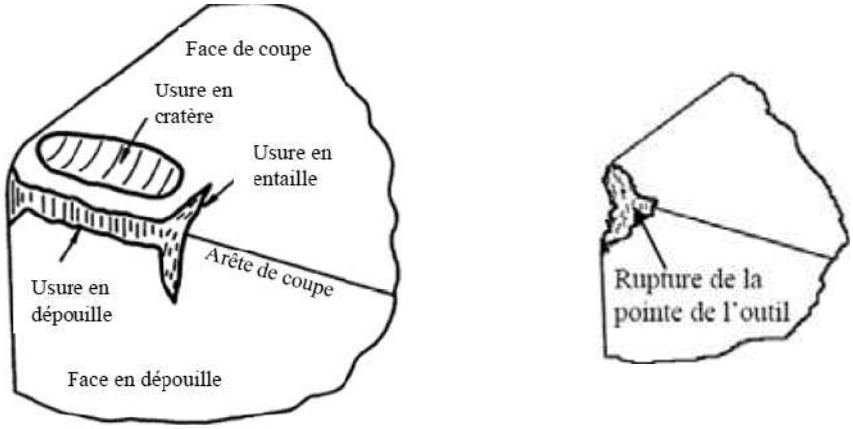


Figure I. 25. Différentes formes d'usures observées sur une plaquette de coupe **[39].**

1.4.4.1 Usure en dépouille

L'usure en dépouille se manifeste sur la face en dépouille et sur le rayon de bec de l'outil. Elle est due au frottement de la pièce sur l'outil. C'est une forme d'usure fortement abrasive. L'adhésion peut apparaître également dans le cas de l'usinage de matériaux ductiles. L'abrasion est due à la présence d'inclusions dures dans la matière usinée et aussi à des particules provenant de l'outil qui peuvent s'incruster à l'interface outil/pièce. La Figure I.26 illustre un exemple d'usure par abrasion sur la face en dépouille d'un outil de coupe en WC-Co de grade K313. Cette observation est obtenue par Liu et Altintas **[40]** lors de l'usinage d'aluminium A390 avec une vitesse de coupe de 300 m/min.

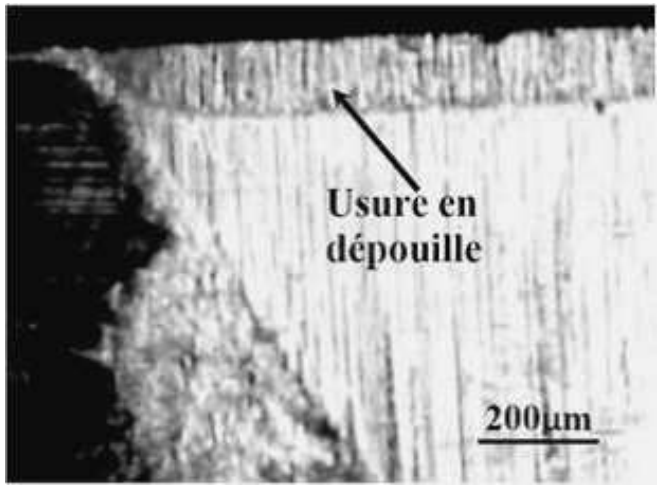


Figure I.26. Exemple d'usure par abrasion sur la face en dépouille **[40].**

Le mode d'usure par abrasion a également été observé sur les outils en carbure (WC-Co) par Cho et Komvopoulos **[41]** lors d'une étude comparative de l'usure des outils en carbure avec ou sans revêtement (TiC/Al2O3) et (TiC/Al2O3/TiN). Cette étude concerne l'usinage de l'acier 34NiCrMo6 (AISI 4340) avec une vitesse de coupe de 240 m/min. Les auteurs indiquent qu'une faible température à l'interface outil/pièce et qu'une prédominance de la déformation de l'interface de contact outil/pièce due au frottement entre deux corps massifs justifient l'absence de diffusion sur la face en dépouille. La même observation est faite par plusieurs autres auteurs **[42,44].**

1.4.4.2 Arête rapportée et entaille

L'arête rapportée se manifeste par un dépôt de la matière usinée sur l'arête de coupe. C'est une sorte de soudure qui se produit entre deux matériaux. Elle se localise préférentiellement sur la face de coupe, mais apparaît dans certains cas sur la face en dépouille. La Figure I.27 illustre un exemple d'arête rapportée obtenue par Li et Liang **[45]** pendant l'usinage de l'acier C45 (AISI 1045) avec un outil en WC-Co. L'usinage a été réalisé avec une vitesse de coupe de 45,75 m/min. Cette arête rapportée, observée à faible vitesse, confirme les résultats généralement obtenus en usinage **[43].** L'adhésion apparaît généralement pour de faibles vitesses de coupe et pour des matériaux ductiles ou fortement écrouissables comme le cas des alliages d'aluminium. List **[43]** a ainsi constaté la formation d'une arête rapportée importante pendant la coupe orthogonale de l'alliage d'aluminium 2024–T351 avec un outil WC-Co (K20) en utilisant une vitesse de coupe de 60 m/min.

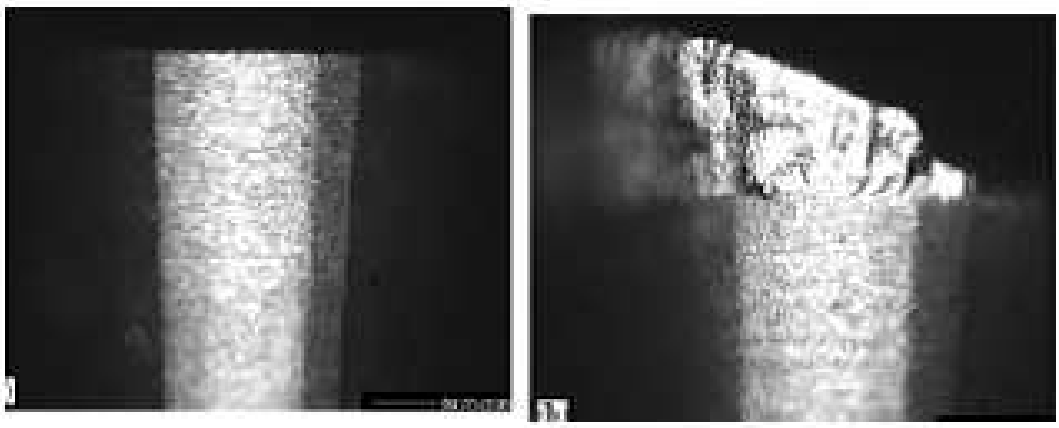


Figure I.27. Exemple d'arête rapportée dans le cas de l'usinage de l'acier C45 **[45]**

L'entaille est une forme d'usure sévère localisée sur l'arête de coupe. Elle est due généralement à la sollicitation combinée (traction-compression) de la partie active de l'outil lors de l'usinage de surfaces très dures. Dans certains cas d'usinage où la température devient importante, l'entaille peut provenir d'un écaillage et donc d'un phénomène de fatigue thermomécanique. Ebrahimi et Moshksar **[46]** ont montré tout récemment que l'apparition de l'entaille dépend de la microstructure de la matière usinée. En effet, ils observent que pour deux matériaux de même dureté et de microstructures différentes, l'entaille sur l'outil est plus importante dans le cas de l'usinage du matériau dont la microstructure contient des inclusions dures. Les matières usinées dans leur étude sont des aciers C45 (AISI 1045), 42Cr4 (AISI 5140) (contenant des inclusions dures) et 27MnSiVS6 (contenant des inclusions de MnS). Leurs résultats ont montré également que l'usure par abrasion est plus importante sur la face en dépouille dans le cas de l'usinage des aciers C45 (AISI 1045) et 42Cr4 (AISI 5140).

1.4.4.3 Usure en cratère

L'usure en cratère est localisée sur la face de coupe d'un outil. Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe. Lorsqu'il y a affinité chimique, il y a dissolution ou diffusion des éléments de l'outil vers la pièce et vice-versa. Il semble que ces mécanismes soient responsables de la formation d'un cratère comme le montre la Figure I.28 **[47].** D'autres mécanismes peuvent être également à l'origine de l'apparition du cratère.

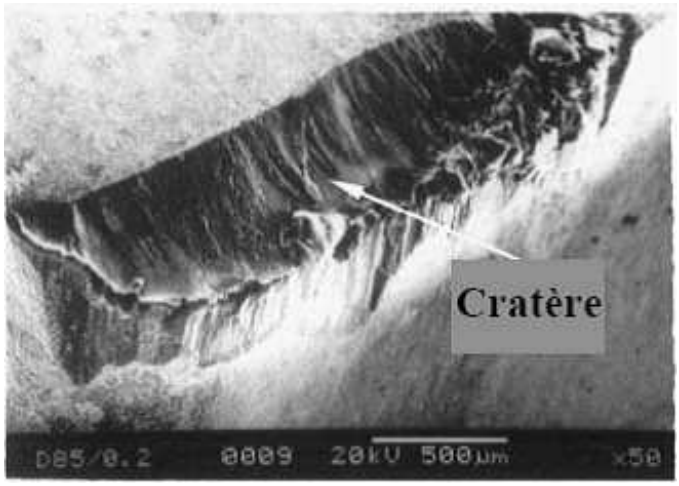


Figure I.28. Exemple d'usure en cratère **[47].**

Pour vérifier ces mécanismes, des modèles phénoménologiques de diffusion dynamique et quasi-statique ont été proposés par Trent **[48]** (Figure I.29) et Qi et al. **[49]** (Figure I.30). Dans le cas du modèle de diffusion dynamique, Trent **[48]** a mis en évidence ces mécanismes lors de l'usinage de l'acier avec des outils en carbure WC-TiC-Co. Par contre, le modèle de Qi et al**. [49]** a été proposé suite à une étude statique, c'est-à-dire maintien en contact permanent sous une pression et une température fixées, d'un échantillon de carbure WC-TiC-Co et d'un échantillon d'acier. Une investigation similaire à celle de Trent a été menée par List **[50]** pour analyser les mécanismes de diffusion à l'interface d'une arête rapportée et de la face de coupe. Cette étude a montré la diffusion d'atomes d'aluminium dans l'outil de coupe. Cette diffusion est possible en raison de l'affinité qui existe entre l'aluminium et le cobalt. Les études de List **[50]** ont été confirmées par celles de Jianxina et al. **[51]** qui ont mis en évidence la présence du cobalt et du tungstène cette fois dans l'alliage de titane Ti6Al4V par une expérience de diffusion quasi-statique similaire à celle de Qi et al. **[49].** Il faut préciser que ces techniques, qui confirment l'affinité chimique qui peut exister entre certains éléments des matériaux en contact, se font sur des temps relativement longs.

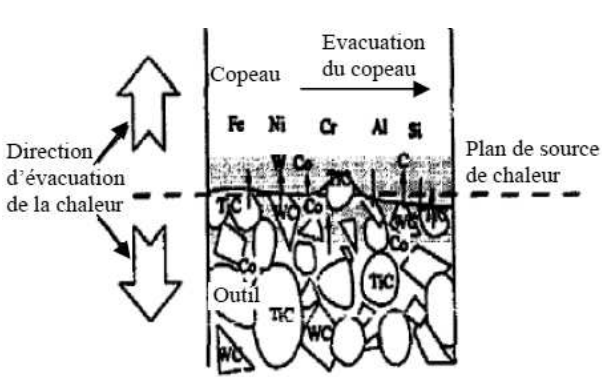


Figure I.29. Modèle de diffusion dynamique entre l'outil et le copeau proposé par Trent : diffusion de W, Co et C dans le copeau et faible solubilité de TiC, **[48].**

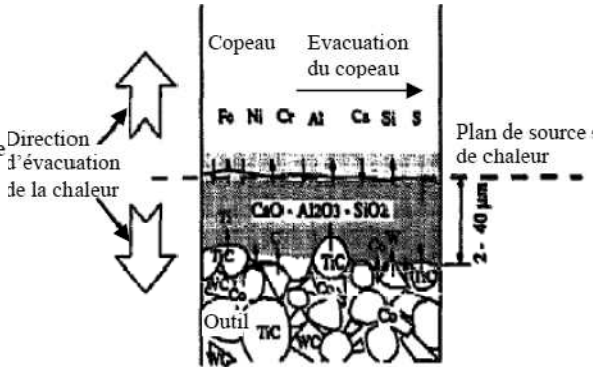


Figure I.30. Modèle de diffusion quasi-statique de diffusion entre l'outil et le copeau proposé par Qi et al. : diffusion de W, Co et C dans la couche de gehlenite (Ca2Al(AlSi) O7) **[49].**

Les travaux de Giménez et al. **[52]** illustrés par les Figure I.31 montrent le phénomène de diffusion des éléments chimiques du WC-Co dans l'acier et réciproquement. Giménez et al. ont montré par cette étude de diffusion statique que le cobalt (Co) diffuse dans l'acier qui est caractérisé par une zone pauvre en perlite (zone désignée par « 1 »). Cette diffusion est observable pour les trois cas de températures considérées (900, 1100 et 1300°C), alors que la diffusion du tungstène (W) dans le fer n'est observable qu'à 1100°C et 1300°C.

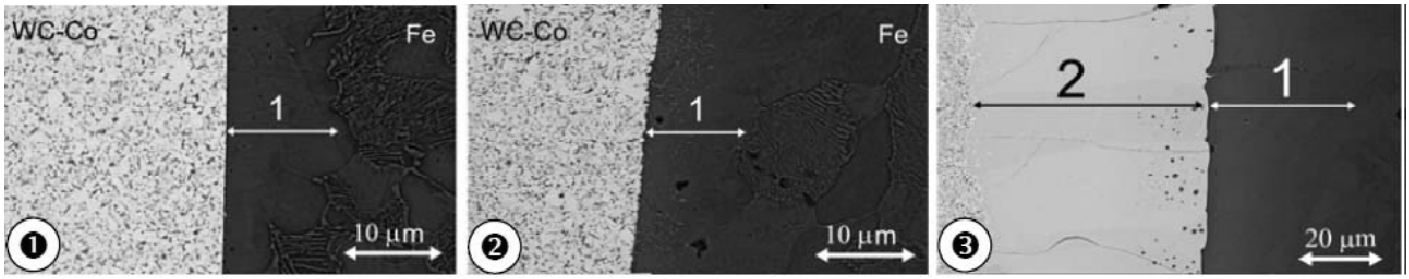


Figure I.31. Micrographies illustrant l'interaction entre le WC-Co et l'acier E24-2 après 1h de maintien sous vide à une pression de 2,5 MPa à température constante : - 900°C, - 1100°C, - 1300°C **[52].**

En revanche les auteurs indiquent que la diffusion du fer (Fe) dans le carbure de tungstène fritté n'est identifiable qu'à 1300°C. Cette diffusion peut fragiliser la matrice du carbure fritté WC-Co. L'étude de Giménez et al. **[52]** est conforme aux analyses de Trent **[53]** et de Gekonde et Subramanian **[54].**

Les travaux de Kudou et al. **[55]** étudient la diffusion des atomes de fer dans des outils de coupe en WC-Co ISO P10. Pour certains outils, les auteurs ont eu l'idée de réaliser un dépôt de fer par procédé plasma sur la face de coupe puis de soumettre l'ensemble à une température de 800°C pendant dix minutes pour permettre la diffusion du fer dans le carbure (Figure I.32). Les différents outils (traités et non traités) ont ensuite été utilisés pour usiner de l'acier C45 (AISI 1045). La comparaison entre la profondeur du cratère obtenu sur des outils de coupe non traités et celle obtenue sur les outils traités a montré que le premier cas donne des profondeurs du cratère plus importantes pour de faibles vitesses de coupe : le dépôt de fer joue le rôle de protection (lubrification solide). En grande vitesse de coupe, pendant laquelle il y a une grande élévation de la température, la barrière constituée par la première diffusion des atomes de fer dans l'outil (diffusion en statique) ne joue plus le rôle de protection : le cratère devient plus important dans le cas des outils traités.

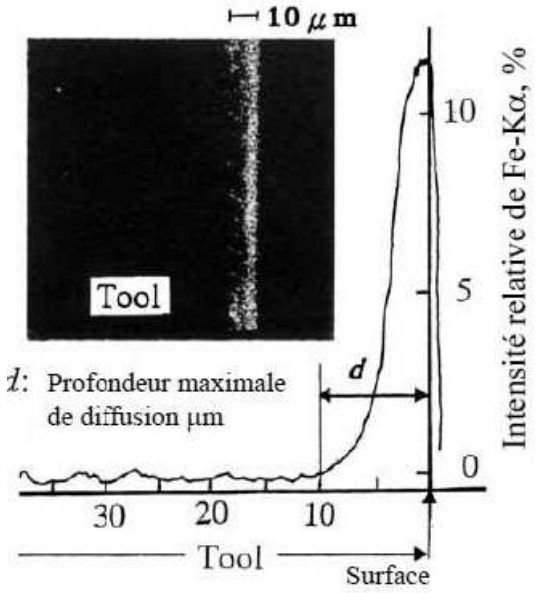


Figure I.32. Phénomène de diffusion du fer dans l'outil de coupe en carbure de tungstène P10 **[55].**

Les auteurs ont également démontré l'influence des conditions de diffusion du fer dans la plaquette sur la profondeur du cratère. Ainsi, en comparant l'usure d'un outil de coupe dans lequel la diffusion de fer a été réalisée à 800°C et celle d'un outil de coupe dont la diffusion de fer est réalisée à 900°C pendant un même temps de 10 min, les résultats montrent que le premier a une meilleure résistance à l'usure en cratère.

Récemment Avila et al. **[56]** ont étudié le mécanisme de formation du cratère dans le cas d'un outil en WC-6%Co ISO K10 non revêtu lors de l'usinage d'un acier 34CrNiMo6 (AISI 4340) Les auteurs indiquent que l'usure en cratère est due à une usure mécanique (abrasion et adhésion). Par contre, Devillez et al **[57]** indiquent que l'usure en cratère sur un outil en WC-6Co non revêtu est causée par la diffusion.

Bien que les aciers usinés soient légèrement différents, la différence des mécanismes d'usure en cratère identifiés par Avila et al**. [56]** d'une part et par Devillez et al **[57]** d'autre part s'expliquent par la différence de niveau de vitesse de coupe.

1.4.4.4 Autres formes d'usure des outils

La déformation plastique : La déformation plastique caractérisée par une modification géométrique de l'arête de coupe apparaît sur la pointe et/ou sur l'arête de coupe de l'outil. Des sollicitations sévères, notamment les pressions de contact et la température, sont des causes propices pour cette forme d'usure. Ainsi elle se produit en usinage en grande vitesse ou lors de l'usinage des matériaux durs.

Fissuration, ébréchure ou rupture de la pointe de l'arête : Ces différentes formes d'usure se produisent le plus souvent sur la pointe et/ou sur l'arête de coupe. Elles ont pour point de départ la fissuration qui a elle-même pour origine des chocs mécaniques ou thermiques. Les chocs mécaniques produisent des vibrations qui induisent des phénomènes de fatigue responsables de la fissuration. Les phénomènes de fatigue peuvent également provenir des sollicitations thermiques cycliques. La fatigue thermique est plus fréquente dans les procédés de coupe interrompue comme le fraisage.

1.4.5 Conséquence de l'endommagement sur la qualité de la pièce

Ce sont les travaux de Taylor qui permettent de traduire l'usure de l'outil à partir de critères d'usure (l'usure en dépouille Vb et en cratère : Kt), en loi de durée de vie de l'outil. La loi d'usure de Taylor est généralisée par Gilbert avec pour paramètres, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe, dont les coefficients sont déterminées expérimentalement. Les conséquences de l'usure de l'outil se manifestent sur les écarts de géométrie et de rugosité, allant jusqu'à la détérioration de la pièce lors de défaillance brutale de l'outil. L'amélioration des matériaux outils (traitement de surfaces : PVD, CVD et matériaux céramiques) ont permis de réduire l'usure. Le suivi de l'usure permet de surveiller le processus d'usinage **[15].**

I.4.6 Modèles de lois d'usure

I.4.6.1 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 **[3, 42, 58].**

$$T = C.V^n \qquad \textbf{(I.1)}$$

V : Vitesse de coupe,
T : Durée de vie de l'outil,
n : Exposant de TAYLOR,
C : Constante dépendant du couple outil/matière.
Ce modèle est représenté par une droite dans un graphe à coordonnées logarithmiques :

$$\log T = n.\log V + \log C \qquad \textbf{(I.2)}$$

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

$$T = K.\, ax.\, f y\, .Vn \qquad \textbf{(I.3)}$$

K : dépend de la nature de l'outil et du matériau usiné,
a : Profondeur de passe,
f : Avance,
x, y : Exposants dépendant de la nuance de l'outil.

I.4.6.2 Modèle de COLDING

Ce modèle (1958-1960) tient compte de la courbure négative de la courbe (figure I.33). Ce sont des polynômes de la forme :

$$K+ a.X +C.Y –Z+ K.X.Z =0 \quad \textbf{(I.4)}$$

Où :

$$K+ a.X + b.X_2+ c.Y+ d.Y_2+ e.Z_2–Z+ f.X.Y+ g.Y.Z+ h.X.Z =0 \quad \textbf{(I.5)}$$

Avec

$$X = log\ F,\ Y = logV\ et\ Z = logT \quad \textbf{(I.6)}$$

La complexité de ce modèle et la difficulté d'obtenir toutes les constantes a, b, c, d, e, f, g et 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 laisse pas apparaître **[3, 42, 58].**

I.4.6.3 Modèle de KONING-DEPIEREUX (1969)

La durée de vie de l'outil est calculée à partir de la formule suivante :

$$T = \exp(-\alpha.V^{\gamma} - \gamma.a\mu - \sigma.f^2) \quad \textbf{(I.7)}$$

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 **[3, 42, 58].**

I.4.6.4 Bilan des modèles d'usure

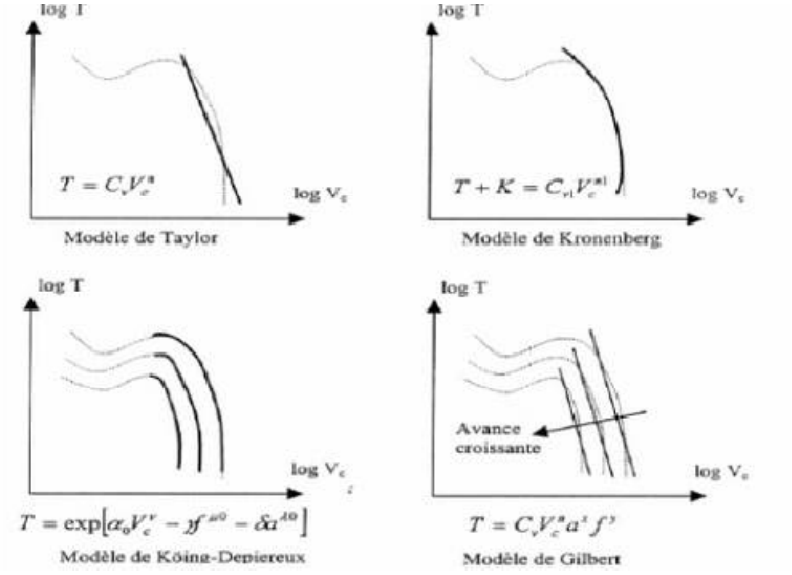


Figure I.33. Représentation graphique des différents modèles.

I.5 CARACTERISTIQUES DES SURFACES USINEES

I.5.1 Introduction

Les pièces mécaniques produites par les différents procédés présentent des nuances distinctes dans l'état de leurs surfaces. Ces différences rendent les surfaces obtenues par les différents procédés faciles à être identifiées. Grâce à son caractère unique, l'état de surface obtenu par un procédé quelconque peut être dors et déjà comparé à d'autres surfaces obtenues par le même procédé à travers des moyens simples tels que la mesure de la taille moyenne de ses irrégularités en utilisant les normes en vigueur et les techniques modernes de mesure **[59]**.

Les processus de formation de copeau consistent à enlever de la pièce la matière sous forme de copeau, pour former une nouvelle surface. Ces processus produisent des surfaces de nature différente de celle du métal de base. Plusieurs travaux **[60] [11]** ont étudié l'influence des opérations d'usinage sur la surface des pièces de différents matériaux.

Pour caractériser les états des surfaces obtenues, la rugosité est retenue comme paramètre géométrique. Ce paramètre peut être varié indépendamment dans un domaine restreint, par un choix judicieux des conditions d'usinage **[59]**.

I.5.2 Analyse d'une surface

Si on coupe normalement une surface par un plan, on obtient une courbe appelée « profil de surface ».C'est à partir de ce profil que l'on analyse les différents défauts de la surface.

On classe les défauts géométriques en quatre ordres de grandeur (figure I.34):

- ***Dé fauts du premier ordre***

Ce sont des défauts de forme, par exemple : écarts de rectitude, écarts de circularité, etc.

- ***Défauts du deuxième ordre***

C'est une ligne ondulée. Elle est caractérisée par une ligne enveloppe supérieure. La distance d'irrégularité entre deux sommets est comprise entre 0,5 et 2,5 mm environ.

- ***Défauts du troisième et du quatrième ordre***

Ils caractérisent la rugosité de la surface. Les défauts du troisième ordre sont constitués par des stries ou sillons. La distance entre deux sillons est comprise entre 0,02 et 0,5 mm environ.
Les défauts du quatrième ordre sont des défauts apériodiques constitues par des arrachements, fentes, etc. La distance entre deux pics de ces irrégularités est inférieure ou égale à 20 µm **[62]**

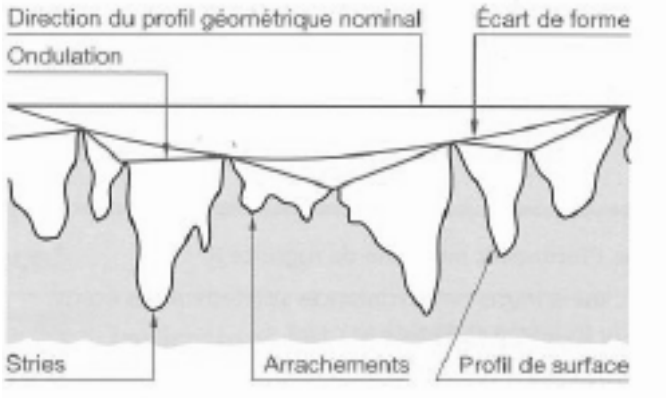


Figure I.34. Les différents défauts de surface **[62]**

I.5.3. Texture de la surface

a) Définitions des critères de rugosité (norme NF E 05-015)

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux Sillons d'usinage (figure I.35) :

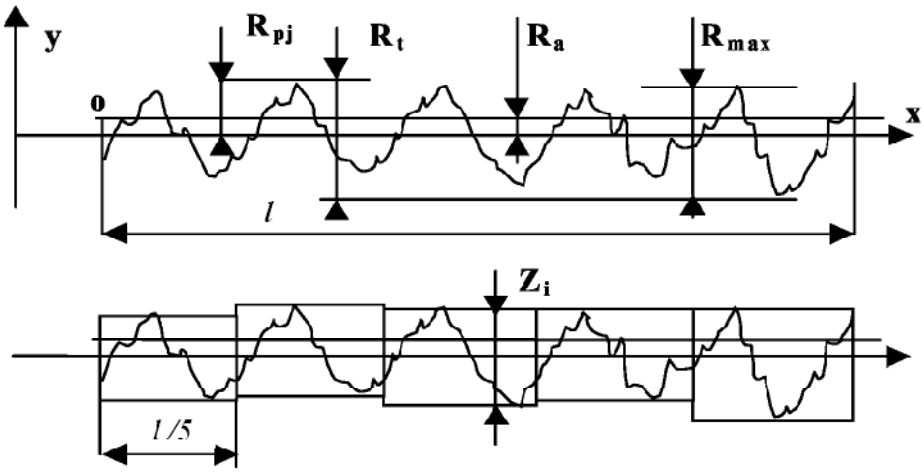


Figure I.35. Paramètres de rugosité

Soit OX la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^l y dx = 0 \qquad \text{(I.8)}$$

Où *l* est la longueur de palpage.

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

Rugosité moyenne arithmétique Ra dite C.L.A. (Center Line Average), Ra représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à ox :

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |y|\, dx \qquad \text{(I.9)}$$

Rugosité moyenne quadratique Rq. dite R.M.S (Root Mean Square). Ce critère (non normalisé en France) représente l'écart moyen quadratique par rapport à ox :

$$Rq=\left[\frac{1}{l}\int_0^l y^2 dx\right]^{1/2} \quad (I.10)$$

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 palpage *l.*

Rugosité RZ, représente la rugosité totale moyenne.

$$R_z = \frac{1}{5}\sum_1^5 Z_i \quad (I.11)$$

Ligne moyenne : C'est une droite ayant la direction générale du profil et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base, la somme des carrés des écarts à partir de cette ligne soit minimale « ligne des moindres carrés » (figure I.36) **[62]**.

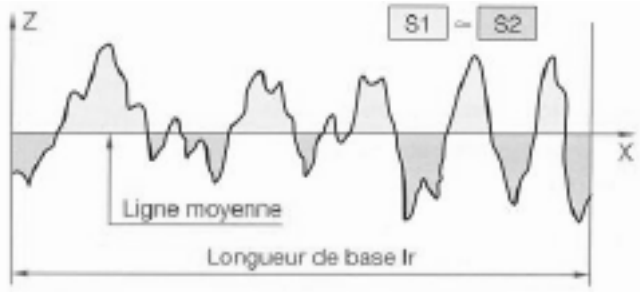


Figure I.36. Schéma de la ligne moyenne **[62]**

b) Facteurs conditionnant l'état des surfaces

On peut classer les facteurs conditionnant l'état des surfaces usinées d'après **[63]** comme suit:

a) Propriétés physico-mécaniques du matériau travaillé;

b) Paramètres définissant le régime de coupe;

c) Paramètres géométriques liés à la partie active de l'outil;

d) Micro géométrie et usure de l'outil;

e) Fluides de refroidissement et de lubrification

I.5.4 Effet du régime de coupe sur la rugosité

Pour des vitesses de coupe importantes (figure I.37), le profil de la pièce est très voisin de l'enveloppe théorique de l'outil. L'état de surface s'améliore avec une augmentation de la vitesse de coupe. On observe une vitesse optimale pour divers couples outils matériau travaillé **[63].** Pour des vitesses inférieures, il se produit des adhérences de copeaux, le détachement se produit de façon irrégulière et diminue la qualité de la surface obtenue **[64].**

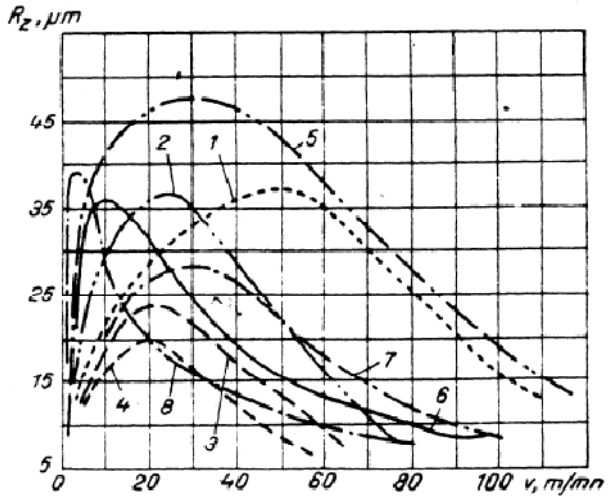


Figure I.37. Variation des hauteurs d'aspérités avec la vitesse de coupe pour des aciers à diverses teneurs en carbone **[63]**

Aciers à teneur moyenne en carbone: 1) ferrite et perlite lamellaire;

2) perlite globulaire; 3) sorbite très dure; 4) troostite et sorbite.

Aciers à faible teneur en carbone; 5) ferrite et perlite lamellaire

6) ferrite et perlite globulaire.

Aciers à forte teneur en carbone; 7) perlite lamellaire; 8) perlite, globulaire.

Tous les rapports d'expériences montrent que l'état de la surface usiné s'améliore avec la vitesse de coupe. La figure I.38 illustre ces observations pour différentes vitesses de coupe. Les états pratiques mesurés sont très voisins de la rugosité théorique calculée avec la géométrie de l'outil et de l'avance **[65] [3]**.

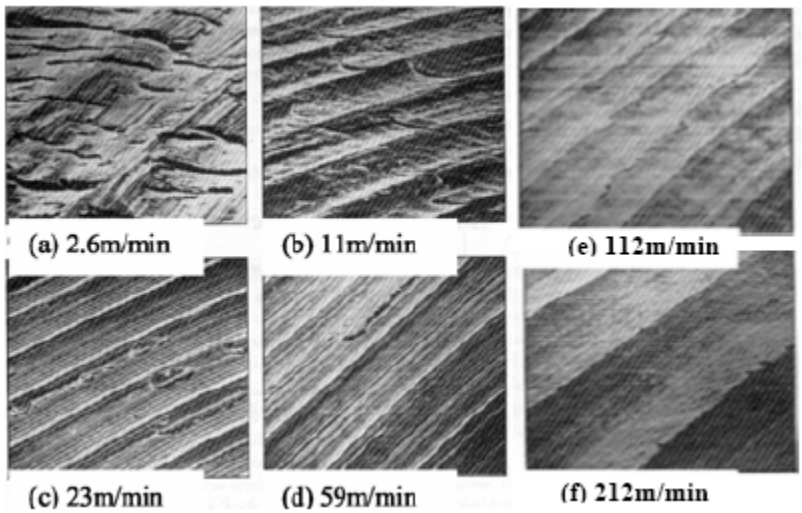


Figure I.38. Micro géométrie de surface pour diverses vitesses de coupe **[3]**

I.5.4.1 Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants

L'influence des fluides réfrigérants se traduit par une diminution de la rugosité de la surface accompagnée d'un écrouissage supplémentaire des couches superficielles du matériau travaillé. La figure I.39 nous mène à formuler les commentaires suivants:

1. Il y'a une diminution nette de la rugosité par rapport à l'usinage à « sec », tout particulièrement avec des fluides activés maintenant les déformations plastiques à des niveaux relativement bas, réduisant les efforts de coupe et de frottement, la température, et prévenant la formation du copeau adhérent **[63].**

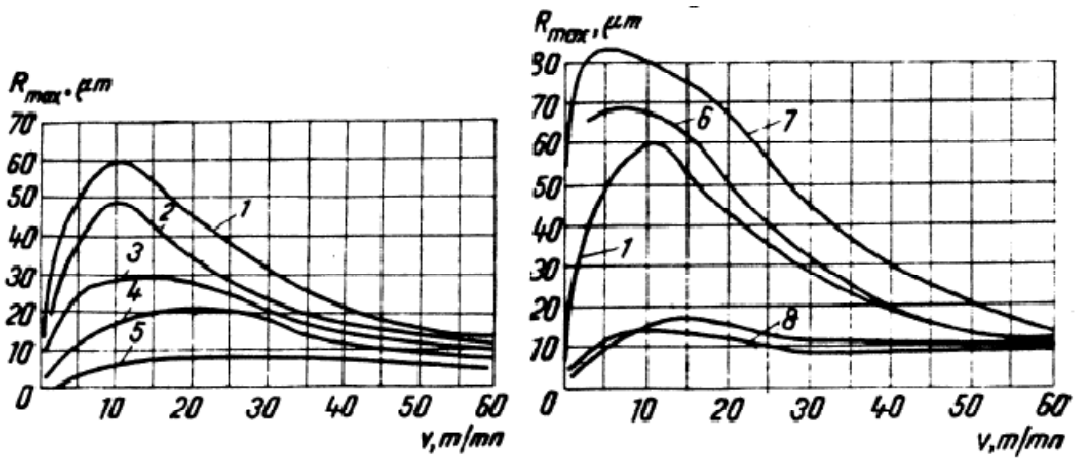


Figure I.39. Influence des fluides réfrigérants et lubrifiants sur les états de surfaces usinées en tournage **[63]**

1) air, 2) huile légère ; 3) pétrole sulfoné ; 4) pétrole lampant;

5) tétrachlorure de carbone CCl .6) hydrogène ;

7) azote ; 8) oxygène

2. Si l'on crée une atmosphère neutre autour de la coupe (azote liquide, hydrogène gazeux), la rugosité augmente **[63]**. Ce mode de travail favorise considérablement la formation du copeau adhérent. Des états de surface remarquables ont été obtenus par refroidissement à l'oxygène; la formation de pellicules d'oxydes métalliques entraîne une diminution spectaculaire des frottements et des déformations plastiques. C'est par cet artifice que l'on obtient les rugosités les plus faibles.

I.5.4.2 Effet de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité

L'épaisseur de copeau non déformé influe considérablement sur la rugosité des surfaces usinées avec de faible vitesse de coupe comme il est montré sur la figure I.40. Dans cette figure la rugosité augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de copeau non déformé. Alors que, relative à l'influence de l'épaisseur du coupeau non déformé sur la rugosité montrent que la rugosité parallèle à la direction de la coupe diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de copeau non déformé, alors que la rugosité normale varie dans l'autre sens **[66]**. Lés résultats expérimentaux **[68]** permettent de

considérer que la profondeur de passe n'influe pas sur la rugosité et que le taux et la profondeur d'écrouissage ne changent pas avec la profondeur de coupe.

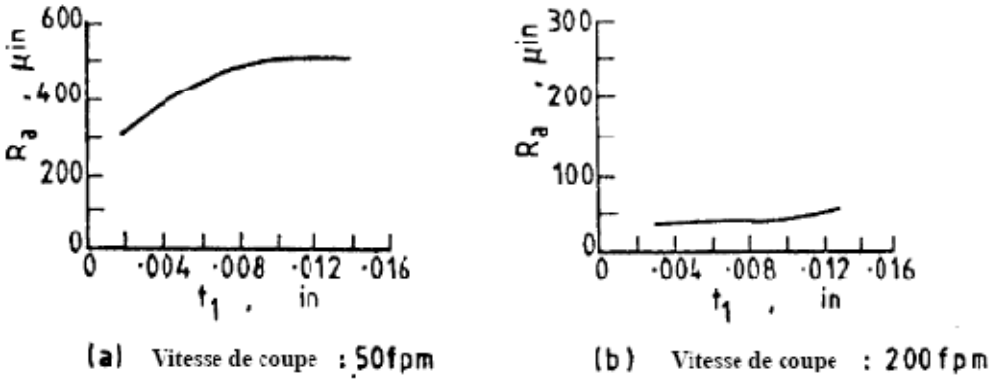


Figure I.40. Effet de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité **[66]**

I.5.4.3 Effet de l'angle de coupe sur la rugosité

La rugosité des surfaces usinées diminue avec l'augmentation de l'angle de coupe durant l'usinage du cuivre **[66].** Les défauts de surface sont les plus nombreux pour l'alliage d'Aluminium 7075 usiné après revenu avec un angle de coupe +30°, mais la rugosité est inférieure à celle obtenue avec un angle de coupe -8° et il est de même pour l'alliage d'Aluminium 2024 **[67]**

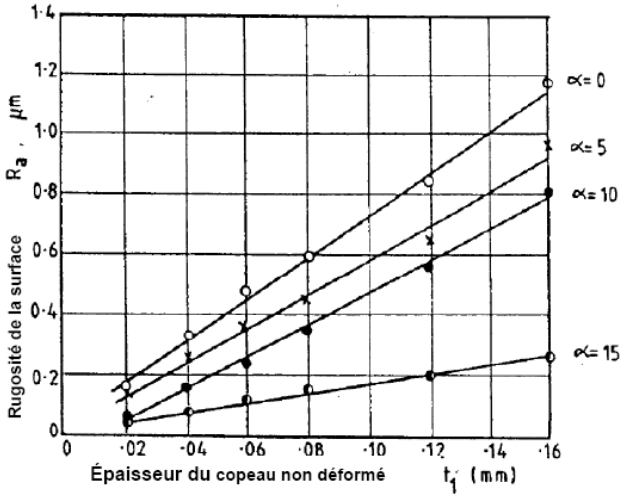


Figure I.41 . Effet de l'angle de coupe et de l'épaisseur de copeau non déformé sur la rugosité **[66]**

Les résultats présentés sur la figure I.41 montrent la diminution de la rugosité avec l'augmentation de l'angle de coupe, cet effet est beaucoup plus accentué pour des grandes valeurs de l'épaisseur du copeau non déformé.

I.5.4.4 Influence du régime de coupe sur l'écrouissage superficiel

Dans la plus part des opérations d'usinage, la couche superficielle de la pièce subit des changements de la dureté, mesurée par les techniques de dureté (e.g. Vickers, Knoop**)** **[69].**

En fonction des conditions de coupe et de la matière d'œuvre, la couche superficielle est soit durcie soit adoucie **[66].** Le durcissement est associé avec les déformations plastiques et/ou les

transformations de phase **[63].** L'adoucissement est associé avec les transformations de phase et/ou avec le vieillissement.

Plusieurs travaux **[65] [63]** ont étudié l'influence de l'usinage sur le phénomène d'écrouissage, ces travaux ont montrés que la dureté maximale se trouve à la surface et diminue rapidement avec la profondeur au dessous de la surface. L'écrouissage de la surface durant l'usinage augmente avec:

- L'augmentation de l'épaisseur de copeau non déformé,
- La diminution de l'angle de coupe,
- La diminution de l'angle de dépouille,
- L'augmentation de l'usure de la surface de dépouille,
- La diminution de la vitesse de coupe.

Sur la figure I.42 apparaît la profondeur d'écrouissage *h*, en fonction de la vitesse de coupe, pour l'acier XC45 travaillé à sec.

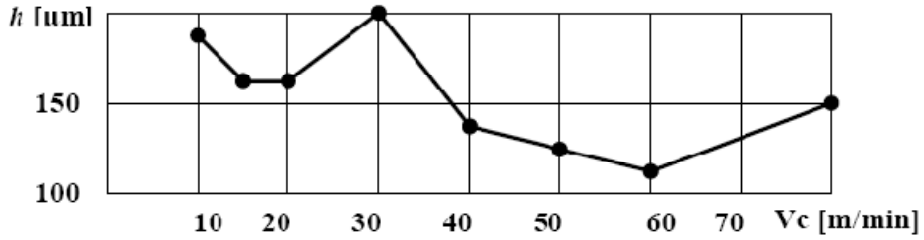


Figure I.42. Profondeur écrouie en fonction de la vitesse de coupe d'un acier XC45 **[63]**

La figure I.43 traduit la variation d'épaisseur écrouie en fonction du régime de coupe pour l'acier XC45.

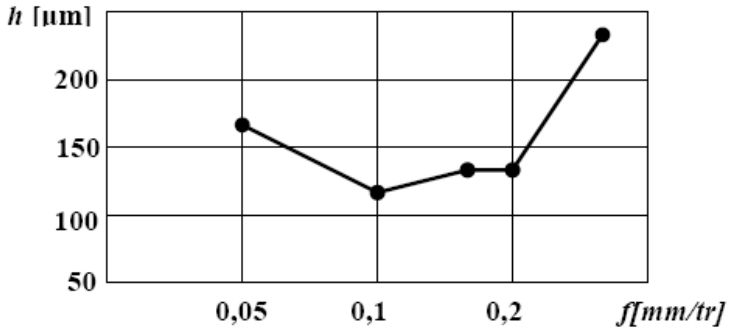


Figure I.43. Variation du taux et de la profondeur d'écrouissage superficiel en fonction de l'avance de l'acier XC 45 **[63]**

La profondeur de passe (ou profondeur de coupe) est de peu d'importance pour l'écrouissage de la surface usinée; celui-ci est engendré par la pointe de l'outil, et l'on conçoit qu'augmenter la profondeur de passe ne puisse agir directement sur lui.

I.5.4.5. Influence de la machine

Une grande rigidité de la machine-outil est evidement une condition indispensable pour l'obtention d'une qualité de surface des pièces satisfaisante. Les vibrations éventuelles et le broutage vont se traduire essentiellement par des défauts du second ordre (ondulations) **[70].**

I.6 EFFORTS DE COUPE

I.6.1 Introduction

L'opération de fraisage est une opération d'usinage fondamentale dans l'industrie pour la production des pièces mécaniques. La productivité et la précision géométrique de la pièce fabriquée diminuent par les vibrations dues à la discontinuité du contact outil pièce et à la variation de la passe radiale provoquée par le choix de la stratégie d'usinage **[71]**.

Durant l'usinage, le parcours de l'outil, couplé à la géométrie de l'outil et aux conditions de coupe influent sur les efforts de coupe mis en jeu ainsi que la puissance consommée **[12].**

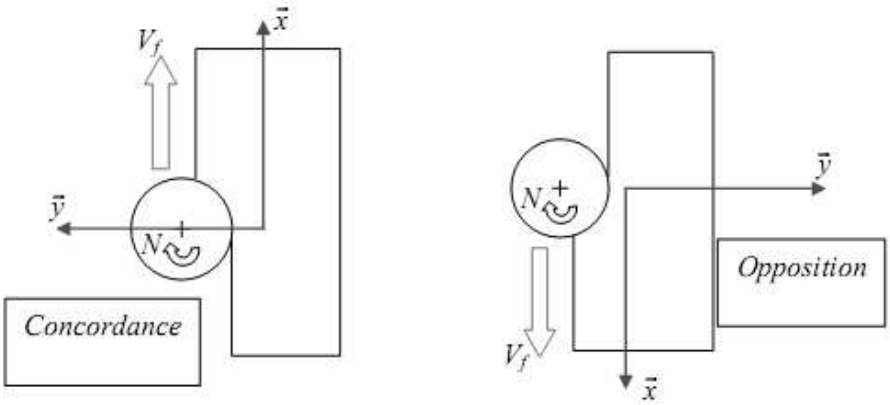


Figure I.44. Configurations de fraisage en concordance et en opposition **[72]**

I.6.2 Intérêt de leur mesure:

Le fraisage donne naissance a un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées (figure I.45) peut servir de base a la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage.

F_v (ou **Fy**): composante dans le sens de rotation de la fraise appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. Elle a la plus grande valeur absolue.

F_a (ou **Fx**): composante dans le sens de 1'avance, appelée effort d'avance, ou effort axial.

F_r (ou **Fz**): composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres (suivant 1'axe de la Fraise), appelée effort de refoulement ou effort radial.

F: La résultante de coupe - peu utilisée en pratique - représente la diagonale d'un parallélépipède. Elle est égale à la somme vectorielle des trois composantes ou a :

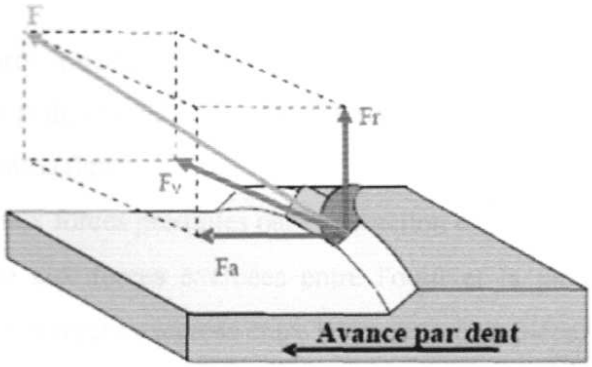


Figure I.45. Composantes de 1'effort de coupe **[12]**

La connaissance des efforts de coupe est à la base de 1'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand, on veut connaitre le rendement mécanique d'une machine outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à 1'outil et d'avoir les renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage dans les conditions de 1'apparaissions des vibrations auto excitées ou broutage et indirectement, dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur le matériau de coupe **[73].**

I.6.3 Génération des efforts de coupe:

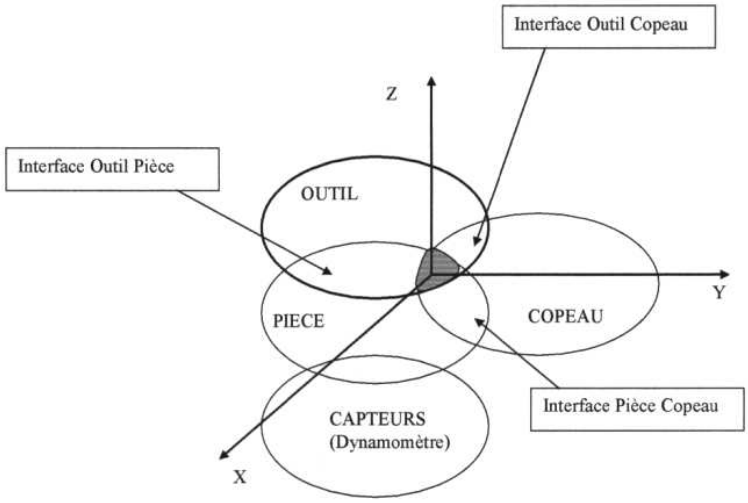


Figure I.46. Structure des efforts de coupe **[74]**

La génération des efforts a lieu pendant 1'opération d'usinage. Les efforts produits par la coupe sont le résultat de forces de cisaillement et de frottement exercées par 1'outil sur la pièce. On peut différencier trois zones (figure I-46).

• **Zone 1:** est associée aux forces produites par 1'interaction entre 1'outil et le copeau.

• **Zone 2:** est associée aux forces exercées entre 1'outil et la pièce usinée.

• **Zone 3:** est associée aux forces exercées entre le coupeau et la pièce.

I.7 ETUDE DE LA FORMATION DU COPEAU

I.7.1 Introduction

L'étude de la formation du copeau est assez délicate car la zone d'étude est très petite (quelques dizaines de millimètres carré) et les phénomènes thermomécaniques sont extrêmement violents, et localisés sur des bandes de quelques micromètres (figure I.47). B. Changeux **[75]** estime le taux de déformation dans la zone primaire (I) supérieur à 2 unités avec des vitesses de déformation de 104 à 106 s-1. Il estime à plus de 400 °C l'échauffement dans cette zone dû au cisaillement intense de la matière et à plus de 800 °C l'échauffement de la zone secondaire (II) dû au frottement outil / copeau. Ces conditions extrêmes rendent donc les mesures extrêmement délicates à réaliser et beaucoup d'inconnues persistent.

Pendant la coupe, seules des valeurs macroscopiques comme les trois composantes de l'effort de coupe, la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance par dent peuvent être mesurées assez simplement. L'aspect thermique peut être estimé en mesurant le flux thermique dans l'outil **[75]** [76] et en utilisant des caméras thermiques proches infrarouges qui permettent d'estimer le champ de température de la zone de coupe **[77] [75] [78].** Pour compléter les mesures effectuées pendant la coupe, d'autres mesures sont effectuées post-mortem sur la pièce, le copeau et l'outil. L'étude de l'intégrité de surface de la pièce (rugosité, contraintes résiduelles, écrouissage…), du copeau (morphologie, transformations microstructurales…) et l'outil (usure, dépôt métallique…) donne des indications supplémentaires sur la formation du copeau.

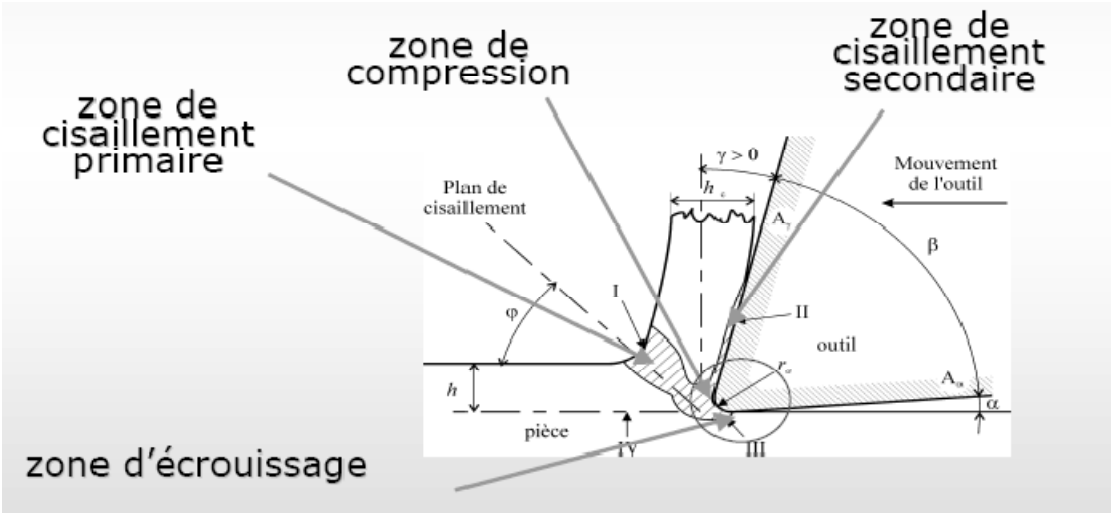


Figure I.47.Zones de copeaux **[79]**

I.7.2 Formation du copeau

Différents procédés ont été mis en place afin d'étudier la formation et l'écoulement du copeau. Doyle et al. (1979), puis Wright (1981) ont analysé l'écoulement du copeau en utilisant des outils

en saphir transparents. Néanmoins, les interactions à l'interface outil-copeau observées alors, ne peuvent être généralisées aux outils à base métallique ou céramique **[80].**

Trent et Wright (2000) ont mis en place le procédé de Quick-stop permettant d'obtenir une photo instantanée de la formation du copeau pendant la coupe. A l'aide d'une très faible décharge explosive ou d'un impact, l'outil est retiré brusquement ; dans le meilleur des cas, le copeau, alors formé, reste accroché à la matière, et son étude à l'aide d'observations microscopiques peut être faite **[80].**

Il a été observé que le copeau se forme par un cisaillement intense dans la zone primaire de cisaillement (1). Il est soumis à des niveaux de déformation et de température très élevée du fait du changement brutal de direction d'écoulement de la matière dans un temps très court. Le copeau s'écoulant le long de la face de coupe est soumis à un second cisaillement (2). Gilormini (1982, 1994), puis Oxley (1989), définissent une zone d'influence dans laquelle la matière est cisaillée. Dans la zone secondaire de cisaillement, la vitesse d'écoulement, quasiment nulle au contact de l'outil, croit rapidement pour atteindre la valeur de la vitesse du copeau en dehors de la zone (2). Les pressions et températures à l'interface outil-copeau sont très importantes. Elles peuvent atteindre respectivement des valeurs de l'ordre du GPa à la pointe de l'outil et de la température de fusion du matériau usine. La zone en dépouille (3) correspond à la zone de contact entre l'outil et la pièce usinée. Il est extrêmement difficile de quantifier les pressions et températures régnant dans la zone tertiaire de cisaillement. Néanmoins, il a été montré que leur valeur est sensiblement plus faible que dans la zone secondaire. Il est à noter que la qualité de surface de la pièce finale est fortement influencée par le contact dans cette zone (Figure I.47) **[80].**

I.7.2.1 Généralités sur la formation du copeau

L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil coupant. Dans le cas de la coupe orthogonale en régime stationnaire, la force exercée par l'outil lors de son engagement dans la matière provoque, à l'échelle mésoscopique, une forte compression de la matière (une déformation plastique et un échauffement considérable) et engendre des zones de cisaillement entre les faces de l'outil et la matière. La compréhension de ces phénomènes n'est pas aisée parce qu'il s'agit d'un problème pluridisciplinaire (Figure I.48) faisant intervenir les sciences telles que : **[81]**

– La métallurgie (transformations structurales, dislocations, fissuration.) ;

– La thermodynamique (l'échauffement, écoulement) ;

– La tribologie (frottement, contact, usure. . .) ;

– La métrologie (dimensionnelle, macro et micro géométrique, intégrité des surfaces)

– La mécanique des matériaux (loi de comportements de type viscoplastique à des températures et des vitesses de déformation importantes) ;

– La mécanique des milieux continus (contraintes résiduelles, déformations, vitesse de déformation. .) ;

– La mécanique des solides (efforts, dynamique, vibrations. . .).

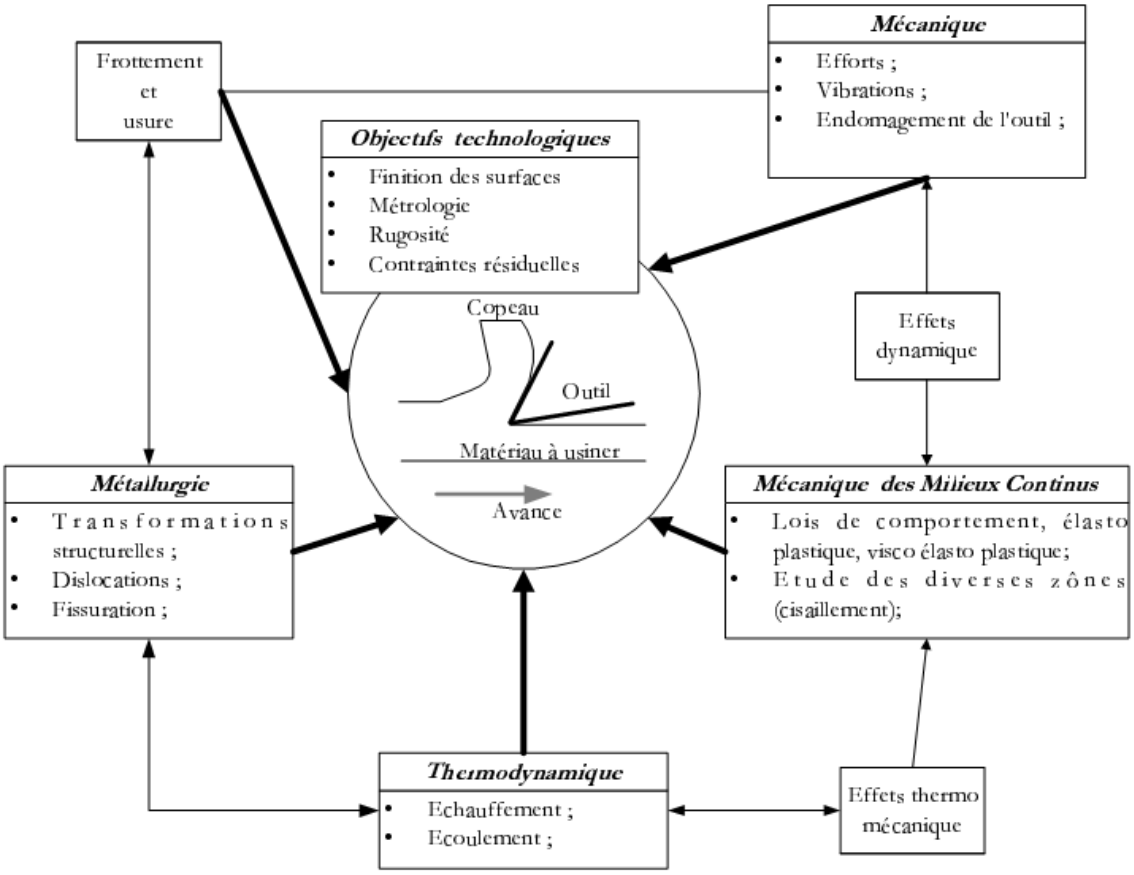


Figure I.48. La coupe des matériaux à l'échelle mésoscopique (arête/matière) **[81]**

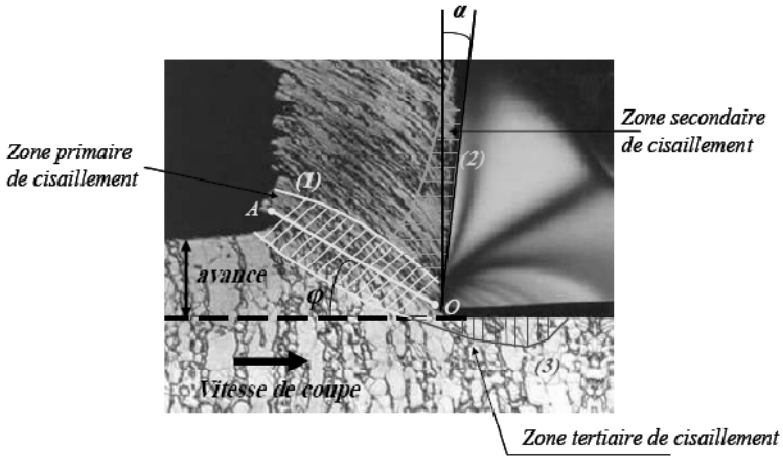


Figure I.49. Zones de cisaillement en usinage, image réalisée par Trent et Wright (2000) **[82]**

Dans le modèle de MERCHANT, le mouvement relatif outil-matière provoque une compression entre la face de coupe de l'outil et la pièce usinée, au voisinage de l'arête de coupe. Pour encaisser cette compression, quelque part, en avant de l'outil, la matière s'étire jusqu'à sa rupture, d'où la naissance du copeau.

D'autres études et modèles ont permis de discuter et de faire évoluer le modèle de MERCHANT. Entre autres celles de COOK, FINNIE et SHAW quelques années plus tard et, plus récemment de SHAW, LEMAIRE, KOMANDURI, pour ne citer que les plus connues. Ont été ainsi introduits, dans la réflexion et l'analyse :

- les caractéristiques métallurgiques des matériaux,
- les conditions de coupe,
- la composition chimique des matériaux,
- les structures particulières des phases en présence,
- le comportement thermique des phases du matériau,
- les phénomènes thermodynamiques (apparitions des couches blanches),
- les phénomènes de cisaillement,
- les conditions de frottement.

Certaines de ces études ont été faites avec des aciers doux (KOMANDURI déjà cité), des alliages mi-durs (MATSUMOTO) et des alliages durs (KONIG).

Il ressort de ces études que les modes de formation du copeau sont très différents suivant les conditions d'usinage mais aussi les caractéristiques des matériaux usinés :

- dureté du matériau
- conditions de coupe : vitesse, avance et profondeur de coupe
- efforts résultants des conditions de coupe
- comportement dynamique du matériau à l'effort
- géométrie de l'outil

De nombreuses études analytiques ont été faites pour décrire la formation des copeaux comme celles menées par KOMANDURI, KONIG, NAKAYAMA, SCHULTZ et WINKLER pour ne citer que les plus connues.

On peut donc affirmer que la formation du copeau implique la compréhension de phénomènes se rattachant à plusieurs disciplines (thermodynamique, métallurgie, tribologie, physique de la matière condensée) ce qui complique leur analyse **[83].**

Une augmentation de la vitesse de coupe lors de l'usinage provoque une modification morphologique du copeau. Celui-ci tend à se fragmenter de plus en plus et devient pulvérulent à très haute vitesse de coupe. En usinage grande vitesse, le copeau prend une allure festonnée s'expliquant par un phénomène de cisaillement adiabatique. Ce dernier est la cause de la chute rapide de la durée de vie d'outil, d'après Hamann et Le-Maître 1998 **[84]**.

I.7.2.2 Intérêt du contrôle de la formation du copeau

Le respect des trois critères Coût, Qualité, et Délai impose l'utilisation de moyens de production plus performants et plus flexibles. La formation du copeau en usinage à grande vitesse

est un phénomène micro-géométrique influant sur plusieurs grandeurs macro-géométriques à surveiller sur un centre d'usinage. Sa maîtrise contribue à :

- fiabiliser le processus d'usinage,
- garantir la qualité géométrique des surfaces usinées (état de surface et précision dimensionnelle),
- assurer la productivité,
- renforcer la sécurité des opérateurs et de la cellule d'usinage **[85]**.

L'optimisation du choix des conditions de coupe est de plus en plus assistée, grâce au développement.

Actuellement, les essais de coupe brusquement interrompus, appelés aussi essais QST (Quick Stop Test) couplés avec des analyses analytiques sont très utilisés pour analyser la coupe des métaux. Cette technique consiste à éjecter l'outil de la pièce avec une vitesse supérieure à la vitesse de coupe pour garder la racine du copeau attachée à la pièce. Il est possible par la suite de visualiser, à des échelles microscopiques, l'influence des conditions de coupe sur l'écoulement de la matière et sur la morphologie du copeau. L'épaisseur de copeau, le rayon de courbure, la longueur de contact entre l'outil et le copeau sont les principales données fournies par cette méthode pour alimenter les modèles analytiques. Elle permet, également, de déterminer les phénomènes tribologiques aux interfaces outil copeau et outil-pièce (adhésion, arêtes rapportées) **[86].** La figure I.50 présente le principe de la technique de la coupe brusquement interrompue.

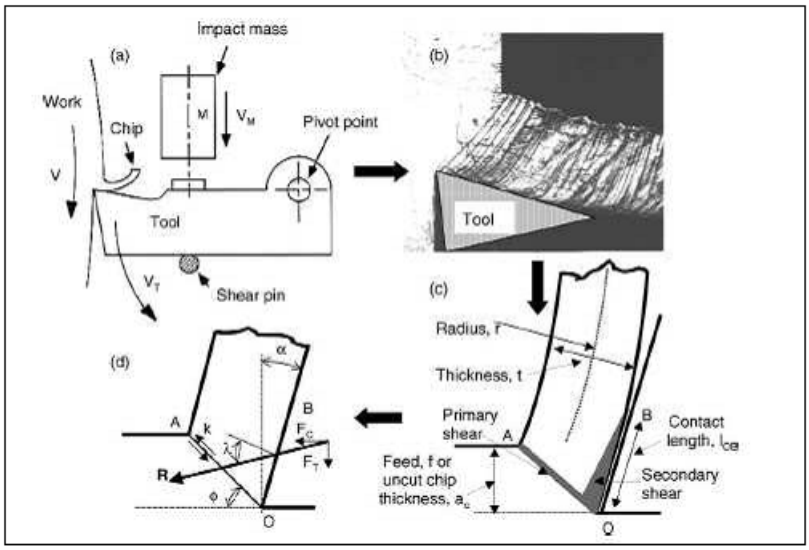


Figure I.50. Analyse de la coupe par des essais de QST **[87]**

I.7.3 Types de copeaux rencontrés

Pour les métaux, le processus de formation du copeau est principalement basé sur des déformations plastiques. Selon les conditions de coupe, on rencontre trois familles de copeaux (figure I.51):

- Le copeau continu : la continuité du matériau y est préservée, et les déformations plastiques dans les zones de cisaillement sont quasi stationnaires.
- Le copeau segmenté : il est composé d'éléments plus ou moins connectés entre eux, résultant de variations périodiques de la couche superficielle ; ce qui conduit à des zones alternées de déformations locales très peu cisaillées.
- Le copeau élémentaire : il est en majorité formé d'éléments séparés, dus plutôt à une rupture du matériau qu'à un cisaillement de celui-ci **[88].**

Le copeau créé à plusieurs formes possibles qui sont classées en familles non normalisées à ce jour.

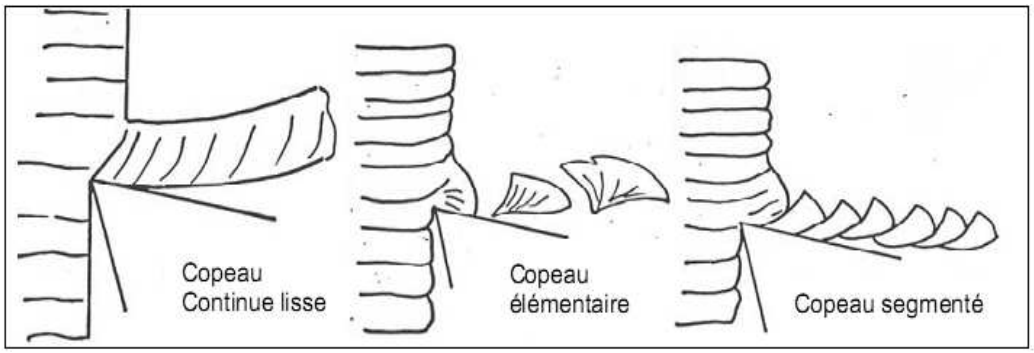


Figure I.51. Exemple de 3 formes différentes de copeau **[83]**

En pratique, des obstacles tels que la pièce produite, le brise-copeau de l'outil ou des éléments de la machine-outil gênent l'écoulement du copeau. Ces obstacles exercent des actions mécaniques qui astreignent la forme du copeau et son mode de formation. Ainsi, tous les copeaux "industriellement produits" sont appelés copeaux contraints.

I.7.3.1 Les différents types de copeaux

Une norme existe pour classifier les copeaux obtenus en usinage (NFE 66 505).

1 : copeau ruban	2 : copeau tubulaire	3 : copeau en spirale	4 : copeau hélicoïdal en rondelle	5 : copeau hélicoïdal conique	6 : copeau élémentaire	7 : copeau aiguille	8 : copeau en arc
11 : Long	21 : Long	32 : plat	41 : Long	51 : Long	61 : Enchevétré		
12 : Court	22 : Court	32 : Conique	42 : Court	52 : Court	62 : détaché		
13: Enchevétré	23: Enchevétré		43: Enchevétré	53: Enchevétré			

Figure I.52. Les différents types de copeaux **[89]**

I.8 TRAITEMENTS THERMIQUES ET TREMPABILITÉ DES ACIERS

I.8.1 Introduction

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud et destinée à modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Pour les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, certains traitements sont quasi obligatoires pour obtenir une performance optimale. Ces traitements sont la trempe et le revenu. Ils permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques de l'acier: limite d'élasticité, résistance à la traction, ténacité, dureté et résilience aux besoins de l'utilisation. D'autres traitements, normalement désignés comme recuits, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. Ils ont donc pour but de faire disparaître les états hors équilibre résultant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques **[90].**

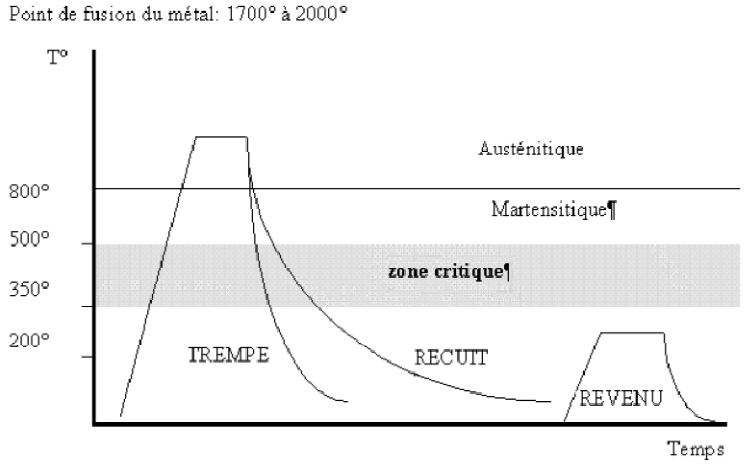


Figure I.53. Graphe des traitements thermiques **[91]**

La zone comprise entre 350° et 500° est à éviter pour des raisons de corrosion.

Le recuit d'homogénéisation s'applique aux aciers bruts de coulée pour lesquels le refroidissement a entraîné l'hétérogénéité de composition chimique (ségrégation) de l'austénite. Il s'obtient en maintenant l'acier dans le domaine austénitique à une température aussi élevée que possible afin d'accélérer la diffusion du carbone et celle des autres éléments d'alliage.

Le recuit de régénération ou normalisation sert à affiner le grain (le rendre plus petit) pour les pièces qui ont subi un grossissement de grain parce qu'ils étaient exposés à une température élevée lors d'une opération de forgeage, moulage ou soudage. Le traitement s'effectue, pour une durée de quelques minutes, entre 50 à 100°C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique (figure I.53). Le refroidissement (normalement à l'air) ne doit pas être trop lent pour éviter un grossissement de grain de la ferrite **[90].**

Le recuit de détente remet l'alliage en équilibre mécanique en diminuant les contraintes résiduelles (contraintes internes) résultant d'un travail à froid ou d'une opération de soudage. La température du traitement n'est pas liée à la transformation mais dépend fortement de l'acier.

Le recuit de recristallisation sert à diminuer la fragilité d'un métal écroui et de lui redonner sa capacité de déformation. Pour un acier ordinaire, ce traitement s'effectue au-dessus de 600°C.Il est clair qu'un de ces traitements mentionnés peut remédier à plusieurs défauts à la fois. Ceci est évident puisque les domaines de température des différents traitements se recouvrent partiellement (figure I.54).

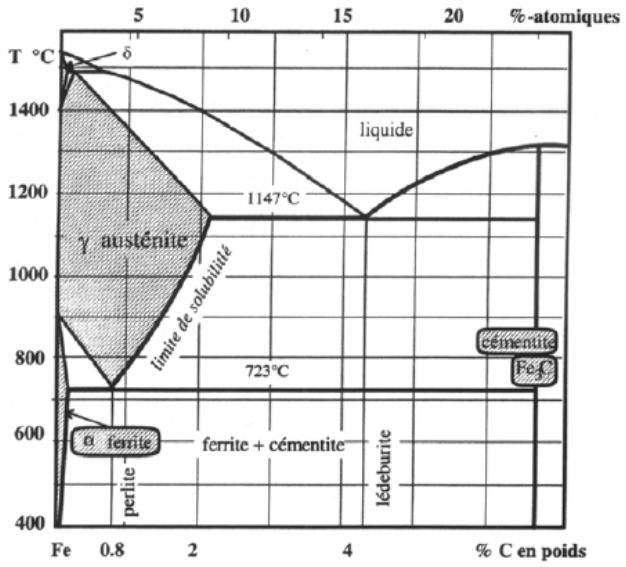


Figure I.54. Diagramme d'équilibre des aciers au carbone **[92]**

I.8.2 Le durcissement par trempe des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés

Le durcissement par trempe se déroule en trois étapes : l'austénitisation, la trempe et le revenu.

I.8.2.1 L'austénitisation

L'austénitisation consiste d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation. Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques (cc) en austénite (cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite (figure I.55) **[92].**

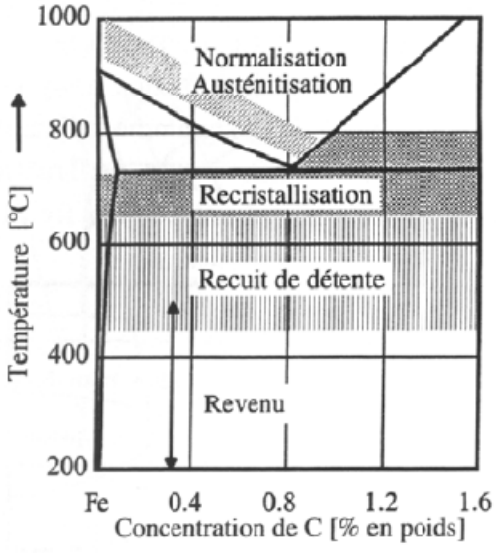


Figure I.55. Domaines de températures d'austénitisation et d'autres traitements thermiques des aciers au carbone **[92]**

a)Temps de maintien à la température d'austénitisation

Le temps de maintien à la température d'austénitisation dépend de la de la taille et de la forme des pièces métalliques, de la composition chimique de l'acier utilisé et de la température de traitement. Le temps de maintien doit assurer une homogénéité de la température d'austénitisation dans la totalité du volume de la pièce et une remise en solution suffisante des carbures **[93].**

I.8.2.2 Trempe

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine. La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C.

La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier. Pour les aciers au carbone, la trempe se fait dans l'eau de 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérant à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse

de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente. Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit. Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion **[94].**

L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation .Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en conditions isothermes, Température - Temps - taux de Transformation, figure I.58) et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, voir figure I.56) dans le cas des trempes **[92].**

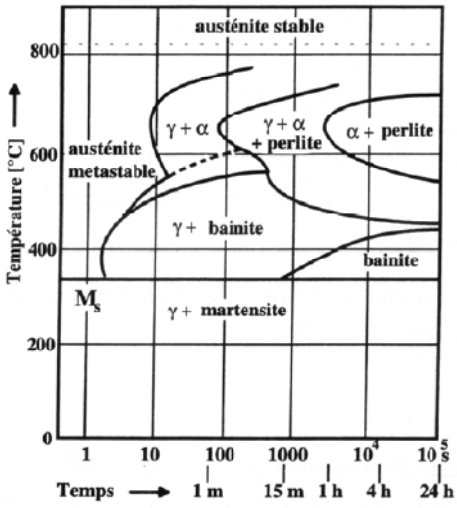


Figure I.56. Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C) : Ce diagramme se lit en suivant une isotherme **[92]**

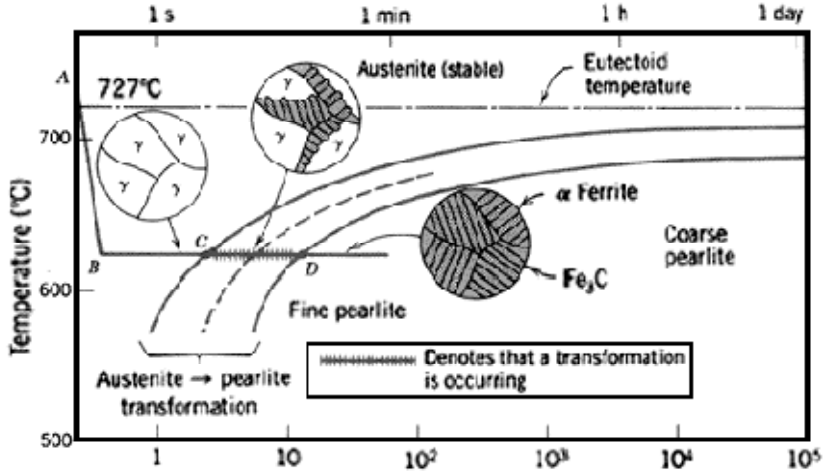


Figure I.57.TTT des aciers et microstructure **[96]**

a) Influence du temps de transition entre mise en solution et trempe

Lorsqu'on trempe des produits de faible épaisseur, il y'a lieu de tenir compte du temps de transition qui s'écoule entre la sortie du four de mise en solution et 1'immersion dans le fluide de trempe (1'eau ou 1'huile). Pendant ce temps de transition, les produits refroidissent généralement à faible vitesse.

Si le temps de transition est assez long pour que la température des produits pénètre dans 1'intervalle critique, une partie au moins de cet intervalle est parcourue a faible vitesse. Les effets du temps de transition sont similaires à ceux de la vitesse de refroidissement. Les spécifications de Renouard **[95]** stipulent que le temps de transition doit être inférieur à une durée variant de 5 à 15 secondes dans le cas des tôles dont 1'épaisseur varie de 0.4 a 2.3 mm.

I.8.2.3 Revenu

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité. Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe)**[92].**

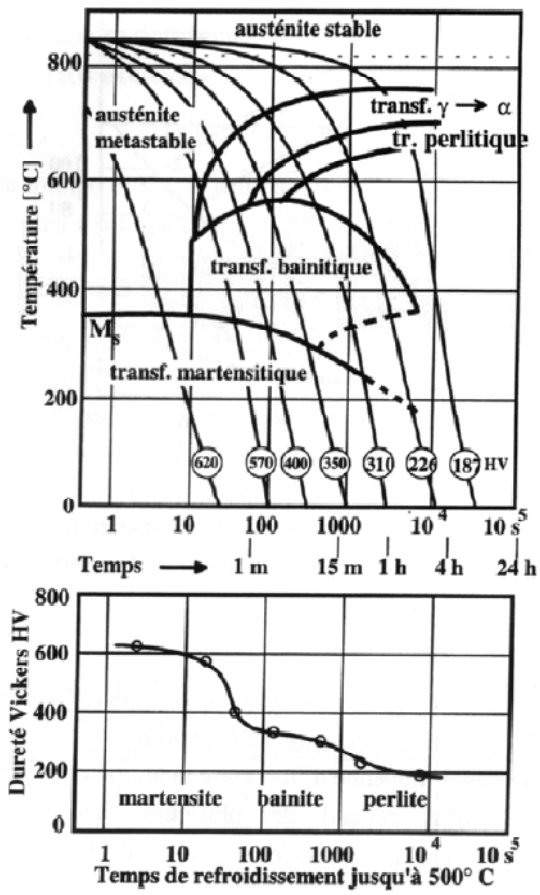
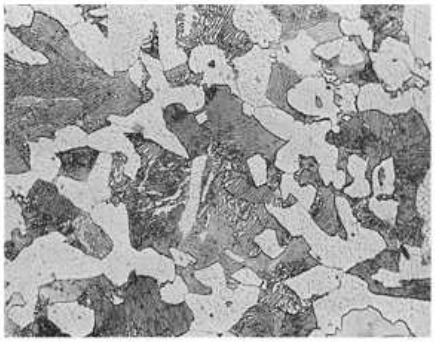


Figure I.58. Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement **[92]**

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite.

I.8.3 Structures de différents aciers après traitement par trempe :



Acier à 0,4 % C - 0,68 % Mn - 0,12 % Si
Traitement : 850 °C (30 min) - four
Attaque Nital (3 %)
Zones sombres : perlite (lamellaire ou fine)
Zones blanches : ferrite

Grossissement : 900

FigI.59. Structure ferrito-perlitique



Acier à 1 % C - 4,1 % Ni - 1,6 % Cr - 0,4 % Mo
Traitement : surchauffe puis trempe à l'eau
Attaque Nital (3 %)
Zones sombres : martensite
Plages blanches : austénite résiduelle

Grossissement : 900

FigI.60.Structure mixte martensite + austénite **[97]**

I.8.4 Relations entre les traitements thermiques et les procédés de fabrication

Les traitements thermiques sont souvent liés aux procédés de fabrication, soit que ceux-ci imposent certaines précautions de traitement avant ou après fabrication, soit qu'ils puissent être étroitement associés, voire simultanés.

I.8.5 Traitements thermiques et usinage

Il est souvent nécessaire, pour faciliter l'usinage, d'effectuer des traitements thermiques sur certains alliages. Il s'agit en général soit d'un adoucissement, soit d'un recuit ayant pour but la disparition des phases dures et fragiles (redissolution des carbures grossiers dans certains aciers très chargés en carbone ou graphitisation des fontes contenant des carbures). Des traitements de relaxation des contraintes résiduelles permettent de limiter les déformations indésirables à l'usinage, ou les criques superficielles à la rectification.

Parfois il est indispensable, au contraire, d'éviter un traitement thermique pour conserver une structure écrouie, plus résistante, sans qu'elle ne soit trop dure (bronze, laiton de décolletage). La présence de phases fusibles aux joints de grains dans les alliages à usinabilité améliorée est ici particulièrement favorable **[98].**

I.9 LA DURETE DES ACIERS

I.9.1 Introduction

La dureté est définie comme étant la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. Elle dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration. La dureté permet d'apprécier, dans une certaine mesure, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la difficulté d'usinage,….D'une façon synthétique, la dureté H d'un matériau est définie comme sa résistance à la déformation plastique créée par un indenteur et elle s'exprime par la formule suivante :

$$\mathbf{H} = \frac{\boldsymbol{Pmax}}{\boldsymbol{A}}$$

Où : - **Pmax** : force maximale appliquée par l'indenteur,

- **A** : surface calculée à partir de la mesure de la déformation résiduelle après pénétration.

Usuellement et selon la forme de l'indenteur, on répertorie trois différents types d'essais : essai Rockwell 'R', Brinell 'B' et Vickers 'HV'. Chaque géométrie des indenteurs induit une différente déformation plastique du matériau et de ce fait, les résultats de ces diverses méthodes peuvent difficilement être comparés. Il est donc important de noter que la dureté n'est pas une propriété intrinsèque du matériau mais sa résistance à un test mécanique normalisé. Bien souvent, ces trois méthodes sont réalisées sur des matériaux massifs **[21].**

I.9.2 Capacité de durcissement

Elle correspond, selon la norme NF EN 10052, à la définition suivante :

La capacité de durcissement est la valeur maximale de la dureté que l'on peut obtenir par un traitement de durcissement par trempe dans des conditions idéales.

Ces conditions idéales sont telles qu'elles permettent l'obtention d'une structure totalement martensitique (donc sans ferrite, perlite, bainite, mais aussi sans austénite résiduelle). Cette capacité de durcissement ne dépend, pratiquement, que de la teneur en carbone de l'acier et, si l'on a recours à la nitruration ou à la carbonitruration, de sa teneur en azote. En dehors de tout apport volontaire d'azote, elle est quantitativement définie par la courbe 100 % martensite à l'état brut de trempe de la figure 2, dans la mesure où tout le carbone de l'acier a été mis en solution dans l'austénite avant la trempe. Il s'agit d'une caractéristique intrinsèque de l'acier dont la valeur est connue dès qu'est précisée la teneur en carbone soluble.

La figure I.61 montre, par ailleurs, que l'influence de la capacité de durcissement se fait encore sentir après revenu.

La capacité de durcissement est la valeur maximale de la dureté que l'on peut obtenir par un traitement de durcissement par trempe dans des conditions idéales.

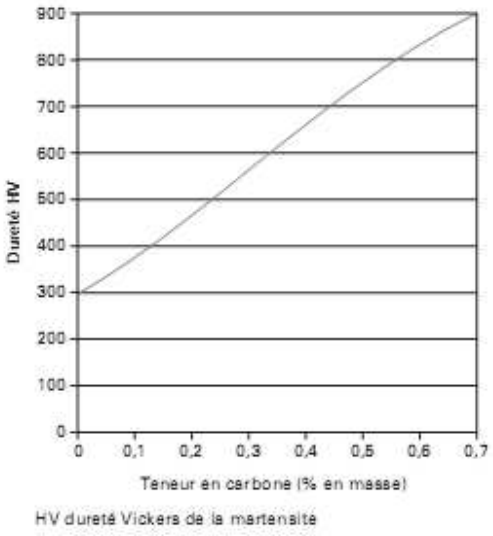


Figure I.61. Dureté des martensites en fonction de leur teneur en carbone **[99]**

On peut noter au passage qu'une opération de cémentation, qui consiste à augmenter la teneur en carbone au voisinage de la surface des pièces, accroît dans cette zone la capacité de durcissement de l'acier **[99].**

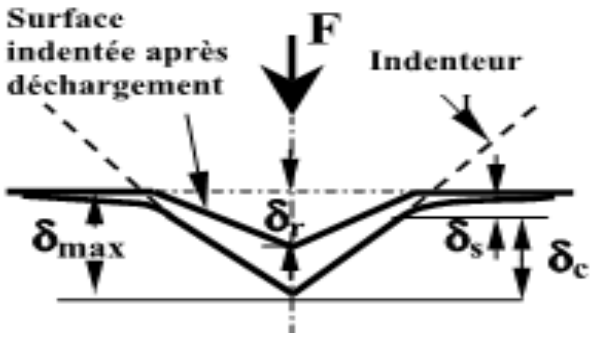


Figure I.62. Représentation schématique d'une section sous indentation **[90]**

A tout moment durant le chargement, le déplacement total δ de l'indenteur est donné par:

$$\delta = \delta c + \delta s \quad (9)$$

Où δc est la hauteur de la surface de contact entre l'indenteur et la matière et δs est le déplacement de la surface au périmètre de contact (Figure I.62).Après déchargement et retrait de l'indenteur, les déplacements élastiques étant restaurés, il ne subsiste alors que l'enfoncement rémanent représenté par δr **[100].**

I.10 Conclusion

Dans ce premier chapitre, une présentation générale sur le procédé de coupe a été réalisée. Elle rend compte de la complexité de l'usinage par enlèvement de copeaux. Cette complexité s'explique par l'interaction entre de nombreux phénomènes notamment le comportement de la matière à usiner, la chaleur générée et l'usure des outils de coupe. La Figure I.63 représente un récapitulatif des interactions entre les principaux aspects et phénomènes qui apparaissent dans un procédé d'usinage.

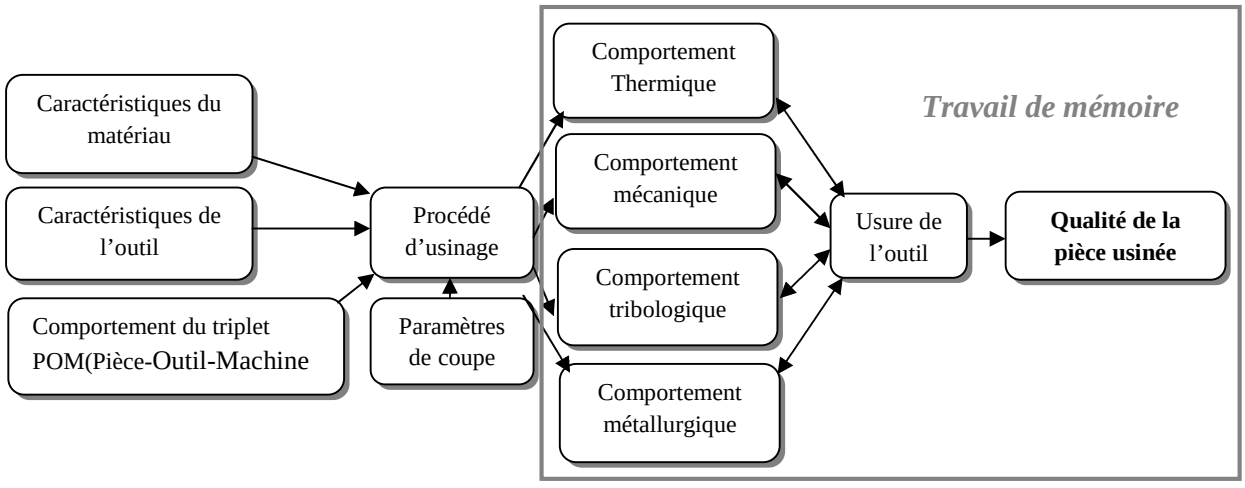


Figure I.63. Exemple schématique d'interactions multidisciplinaires d'un processus d'usinage et positionnement du présent travail

Le cadre mis en relief sur la Figure I.63 regroupe les différents comportements qui sont pris en compte dans l'analyse des mécanismes d'usure des plaquettes de coupe en fraisage et l'état de surface des pièces usinées, dans le cadre du présent travail. L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence l'intérêt des travaux réalisés dans chaque domaine ainsi que les avantages et les limites des différents moyens utilisés pour mener les études.

Problématique

Aujourd'hui, en raison des contraintes environnementales et économiques, l'usinage fait parti des domaines en plein développement. Le fraisage est un procédé récent qui permet d'usiner des aciers traités avec des duretés élevées supérieures à 45 HRc. Il permet en particulier d'obtenir, sans lubrification, des pièces avec un état de surface et une précision proche de ceux issus de la rectification. La maîtrise du procédé d'usinage nécessite la compréhension des mécanismes intervenant dans la zone de coupe. Ces derniers dépendent d'une part de la nature de l'outil utilisé et d'autre part du matériau.

Ces matériaux d'outils se caractérisent par des propriétés physico-mécaniques très différentes. Cette variabilité de capacité et de performance de coupe leur permet de générer des qualités micro-géométriques diverses sur les surfaces des pièces usinées. Ceci se répercute sur le comportement de la pièce durant son cycle de vie. En effet la rugosité de la surface est génératrice de plusieurs mécanismes d'endommagement, tels que la rupture par fatigue, la propagation de fissures, la concentration de contraintes, l'usure et la corrosion. Le sujet présenté s'inscrit dans ce cadre et vise à quantifier l'effet du matériau à outils en fraisage sur l'état de surface des pièces usinées.

II.1 EQUIPEMENTS UTILISES

II.1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique qui à servi à l'étude de l'évolution de la rugosité et de l'usure afin de caractériser le comportement de nouveaux outils.

Les expériences nécessaires à notre étude ont été effectuées dans les laboratoires technologiques de base et au laboratoire LR3MI au sein du département de génie mécanique de l'université de Annaba.

II.1.2 Machine-outil

Nous avons réalisé les opérations d'usinage des ébauches sur une fraiseuse verticale de type 6H11 de grande rigidité et de puissance sur la broche de 4.5 KW (figure II.1).

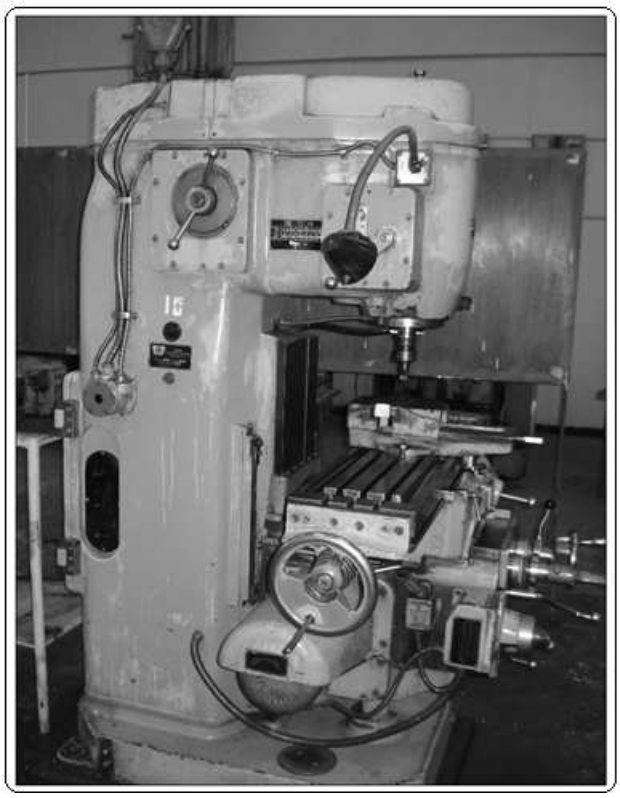


Figure II.1 : Fraiseuse verticale (Modèle 6H11) utilisée pour les essais

II.1.3 Matière à usiner :

Deux matériaux métalliques bien distincts sont utilisés pour l'étude expérimentale : un acier au chrome (100Cr6) et un acier non allié (C45) de dimensions (176×56×40) mm présentées par les figures (figure II.2) et (figure II.3), Le 100Cr6 est un acier faiblement allié souvent utilisé pour la fabrication de roulements à billes. Les éprouvettes sont extraites de barres de diamètre 60 mm

découpées à partir de barres laminées et que nous avons rendues prismatiques en l'usinant avec une fraise à surfacer. Le matériau considéré ici est dans son état recuit, avec une structure de base globulaire (figure II.14).

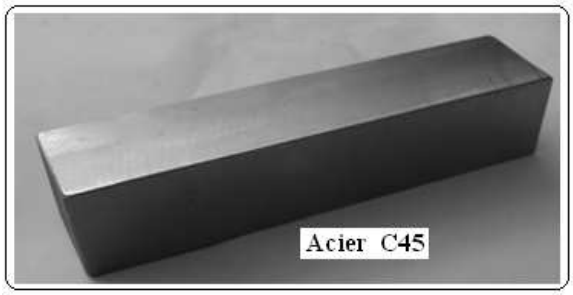


Figure II.2 : Eprouvette d'essai en acier C45

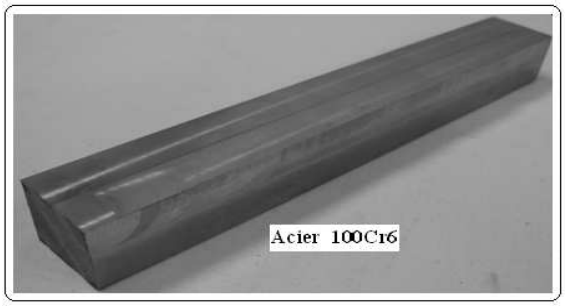


Figure II.3 : Eprouvette d'essai en acier 100Cr6.

La composition chimique et les caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

Tableaux II.1 : Composition chimique

Pour l'acier C45

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Va	Al	Cu	Sn	Ti
045	0.29	0.77	0.002	0.012	0.18	0.051	0.017	0.015	0.017	0.035	0.06	0.002

Pour l'acier 100Cr6

C	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**V**	**Cu**
1.082	0.252	0.35	<0.000	<0.000	1.382	0.077	0.017	0.005	0.150

Caractéristiques mécaniques : C45

Dureté HB=180 avec une dureté HRC= 12

Résistance maximale Rm=600 N/mm^2

Allongement 17%

Caractéristiques mécaniques : 100Cr6

Dureté HB=230 avec une dureté HRC= 20

Résistance maximale Rm=770 N/mm^2

Allongement 10%

Montage de la pièce :

La mise en position de l'éprouvette ainsi que son maintient sont assuré par un étau à mors parallèles réglés préalablement et fixés à la table de la fraiseuse.

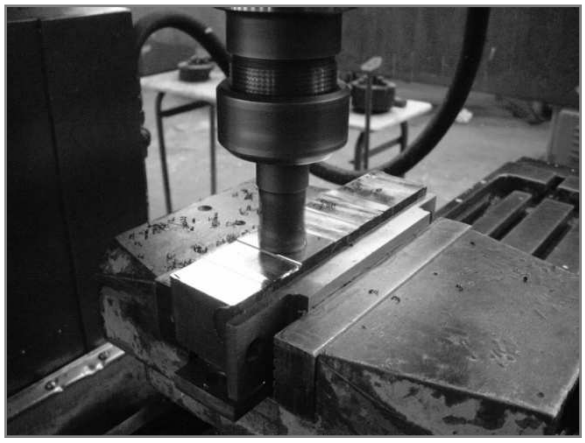


Figure II.4 : Montage d'essai

II.1.4 Plaquettes et porte plaquettes

- **Plaquettes**

Les plaquettes (figure II.5) choisies sont dites « plaquettes à rayon »en carbure métallique avec ou sans revêtements, de marque SANDVIK comportant 2 arêtes de coupe par plaquette. Leurs caractéristiques sont représentées par le tableau II.2.

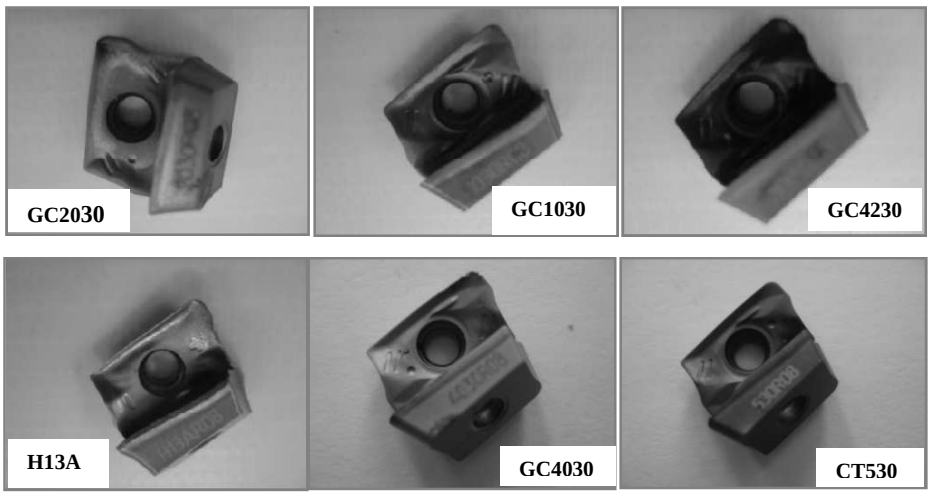
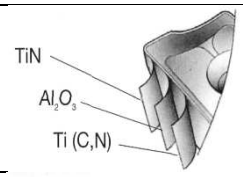
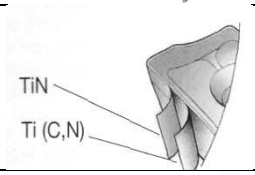
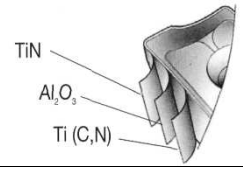
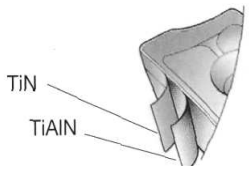
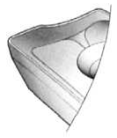
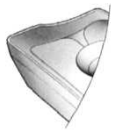


Figure II.5: Plaquettes de coupe utilisées dans les essais

Tableau II.2: Caractérisations et désignation des plaquettes utilisées

Plaquettes	Composition des couches des revêtements	Désignation (SANDVIK)	Observations
Carbure revêtu multi-couche	**Revêt MT CVD** **[TiN + Al_2O_3 + Ti(C, N]**	R390 11T3 GC 4030	
Carbure revêtu bicouche	**Revêt PVD** **[TiN + Ti(C, N]**	R390 11T3 GC 1030	
Carbure revêtu multi-couche	**Revêt MT CVD** **[TiN + Al_2O_3 + Ti(C, N]**	R390 11T3 GC 4230	
Carbure revêtu bicouche	**Revêt PVD** **[TiN + TiAIN]**	R390 11T3 GC 2030	
Carbure non revêtu	**Non revêtu**	R390 11T3 CT 530	
Carbure revêtu	**Revêt PVD** **nanocristallin**	R390 11T3 H13A	

- **Porte-plaquettes**

C'est une fraise à surfacer de 25 mm de diamètre, ayant trois dents à plaquettes amovibles. Elle a respectivement la géométrie et la désignation suivante: *l*a=11mm, *iW*=6.8mm, *S*=3.59mm, *bs*=1.5mm, r_ε=0.8mm, (figure II.5 et II.6)

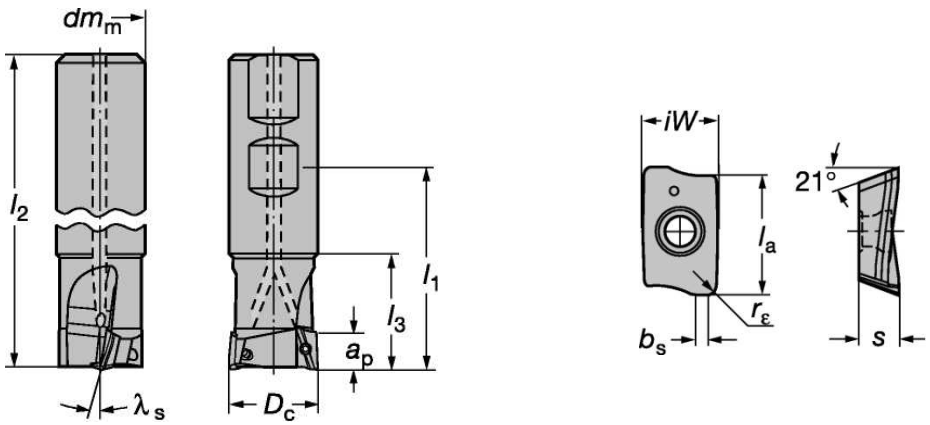


Figure II.6 : Géométrie de l'outil fraise et de la plaquette.



Figure II.7 : Fraise à surfacer à plaquettes amovibles

II.1.5 Appareils de mesure et de contrôle

II.1.5.1 Microscope pour la mesure de l'usure

Pour suivre l'évolution de l'usure sur les différentes plaquettes de l'outil-fraise en fonction du temps et des conditions de travail choisies, nous avons utilisé pour la mesure et le contrôle, le microscope d'atelier modèle [MMN-2] (figure II.7) ayant une précision de l'ordre 5 µm. L'appareil est équipé d'un dispositif porte fraise permettant le contrôle des plaquettes de la fraise sans nécessité de démontage c'est à dire mesurer les largeurs et les longueurs de toutes les bandes d'usure que ce soit sur les surfaces en dépouille ou d'attaque **[35].**

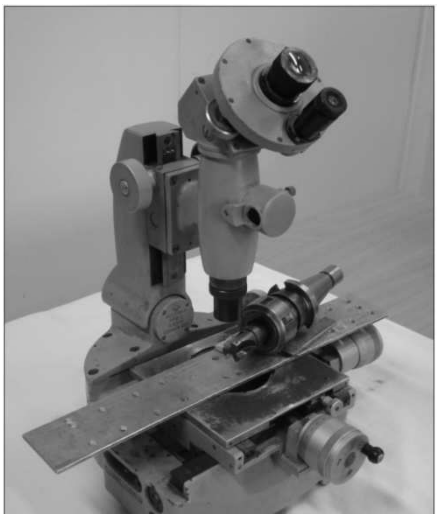


Figure II.8: Microscope optique modèle MMN-2.

Méthode de mesure et de contrôle :

Le principe de mesure consiste à présenter la zone d'usure de la plaquette face à l'objectif du microscope. La mise en position de la zone d'usure des plaquettes est déterminée grâce a un cadran mobile muni d'un repérage de coordonnées X, Y.

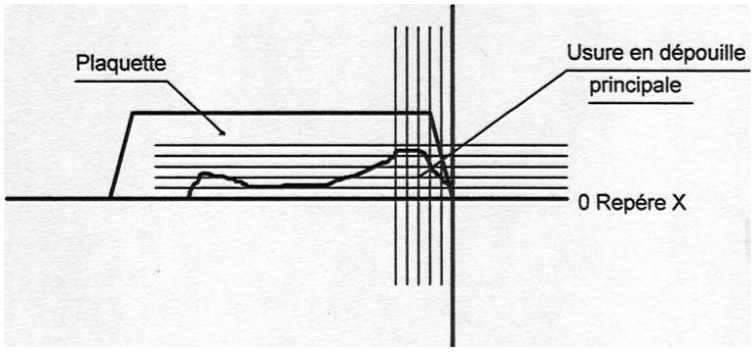


Figure II.9: Mise en coordonnées de la plaquette.

II.1.5.2 Microscope optique

Pour avoir des mesures plus approfondies et photographier les micrographies des plaquettes ainsi que celles des coupeaux, nous avons utilisé un microscope optique (Motic) équipé d'une caméra. L'acquisition des données se fait à l'aide d'un logiciel Motic Images 2000(figure II.10).Ce dernier permet de mesurer les grandeurs de l'usure sur la surface en dépouille principale, la surface en dépouille auxiliaire et l'usure en cratère sur la surface d'attaque. Les agrandissements possibles sont : G/4, G/10, G/40, G/100.



Figure II.10: Microscope optique

II.1.5.3 Rugosimètre

La rugosité de la surface usinée a été mesurée avec un rugosimètre du type Mitutoyo SJ 201.M ayant deux vitesses de déplacement 2mm/sec et 6mm/sec et doté d'un système à palpeur inductif.



Figure II.11: Rugosimètre Mitutoyo SJ 201.M

II.1.5.4 Duromètre

Pour mesurer la dureté des deux matériaux (le C45 et le 100Cr6), on a utilisé un duromètre figure (II.12).



Figure II.12: Duromètre pour la mesure de la dureté

II.1.6 Four

Afin d'augmenter la dureté des matériaux, on a appliqué une trempe dans un four de modèle Barnstead/Thermolyne Benchtop Muffle Furnaces, Type 48000, Thermo Scientific (figure II.13).C'est un four à moufle compacts de table de fonctions avancées de contrôle électronique. L'isolant en céramique offre efficacité énergétique maximale. La température maximale est de 1200°C (2192°F). Il offre une protection de surchauffe et affichage numérique, ou de l'économie numérique de contrôle avec la protection de rupture du capteur seulement. De dimensions : 34W x 49H x 49.5D cm ($13^1/_4$ x 19 x 19.5")

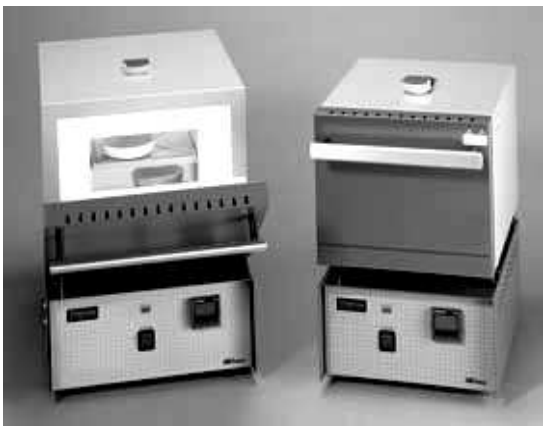


Figure II.13: Four Furnaces 48000

Tests d'essais de trempe

L'eau est classée parmi les milieux de trempe les plus utilisés lors de la pratique de la trempe, dans notre cas, nous utilisons l'eau comme liquide de refroidissement dans la partie des traitements thermiques de ce travail.

Lors des expériences, nous avons tenu à respecter les conditions de travail suivantes :

- Eprouvette de faible dimensions pour avoir une uniformité de la température au cours du refroidissement (prismatiques en aciers 100 Cr6 et C45 de dimensions 174x 40)
- La température du fluide de trempe est constante et uniforme.
- La température de l'éprouvette est uniforme avant l'immersion.

Les conditions du traitement thermique des éprouvettes des aciers : C45 et 100 Cr6 sont données dans les tableaux (II.3a, b), leurs duretés avant trempe sont respectivement 55 HRA et 68,4HRA.

Tableau II.3.a) Conditions de la trempe des éprouvettes

Nature du traitement	**Nuance du Matériau**	**Chauffage**		**Temps de Maintien (min)**	**Type de refroidissement**
		Temps (min)	**Température (°c)**		
Trempe	100 Cr6	45	850	60	à l'eau
	C45	40	850	60	

Tableau II.3.b) Conditions du revenu des éprouvettes

Nature du traitement	**Nuance du matériau**	**Chauffage**		**refroidissement**	**Dureté *HRC***
		Temps (min)	**Température (°c)**		
Revenu	100 Cr6	30	200	à l'air libre	62
	C45	30	200		39.8

Structure des éprouvettes

Afin de mieux caractériser les deux aciers ISO utilisés dans notre étude, on a procédé à la réalisation de la microstructure à leur état de livraison et après traitement de trempe à 850°C et un revenu à 200°C. Ces micrographies ont été réalisées au laboratoire LM2PM du département de métallurgie Université de Annaba.

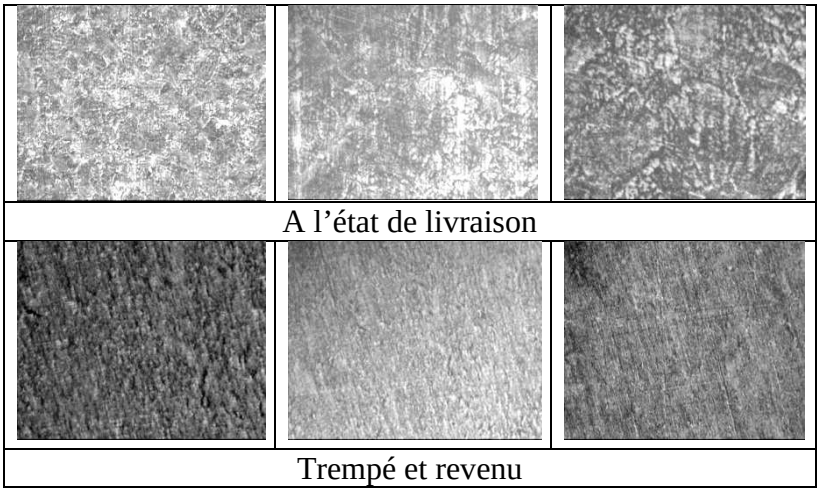


Figure II.14: Structure de l'acier 100Cr6 **a)**X220 PP ;**b)** X600PP ;**c)** X1200PP

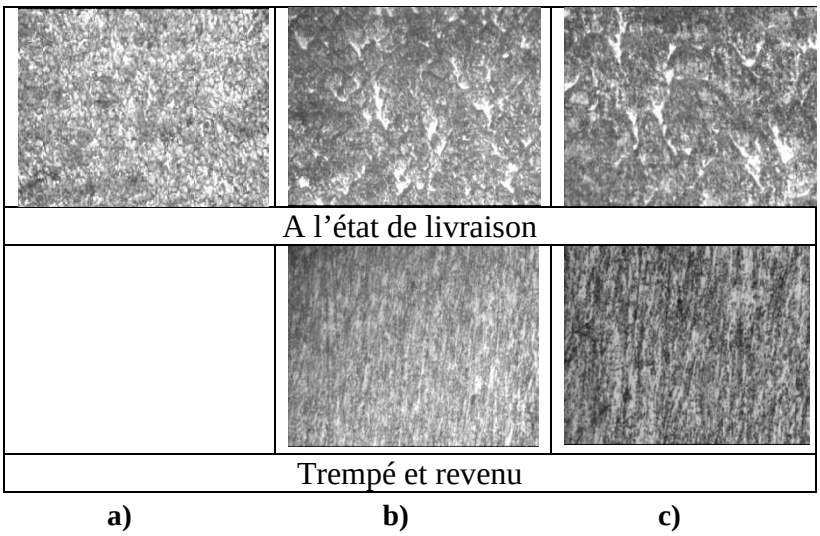


Figure II.15: Structure de l'acier C45 **a)**X220 G ;**b)** X600G ;**c)** X1200G

II.1.7 Machine à polissage

Des échantillons ont été découpés des deux matériaux (le C45 et 100Cr6) avant et après traitement par une tronçonneuse électrique d'une puissance de 1500watt. Le polissage à été fait sur une polisseuse mécanique à 600,800 et 1000 (Figure II.13) de vitesse de rotation variant jusqu'au 800 tr/mn (refroidissement à l'eau).On a utilisé une série de papiers abrasive de 240 à 1200.



Figure II.16: Machine de polissage

II.1.8 Microscope pour micrographie

Après avoir préparés les échantillons sur la machine à polissage, l'attaque chimique par nital à 4% est faite afin de révéler la microstructure entière .Leurs micrographies sont prises sur un microscope **LIECA DM.LM** équipé d'une caméra numérique, possédant une tourelle rotative munie de trois objectifs, qui permettent des grossissements qui peuvent aller jusqu'à 1200 fois. L'observation de la structure s'effectue par le biais d'un binoculaire.

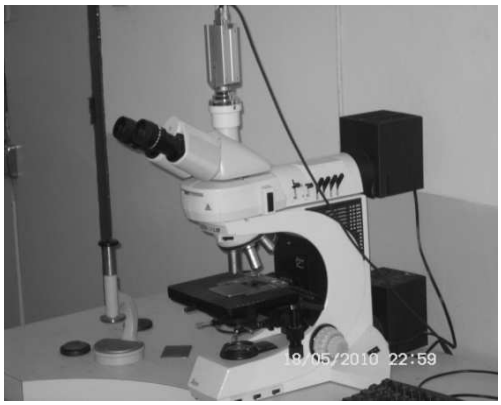


Figure II.17: Microscope pour micrographie

II.1.10 Conditions de coupe

Pour quantifier l'effet des conditions de travail sur les paramètres technologiques étudiés nous avons varié les éléments du régime de coupe dans les intervalles présentés par dans les tableaux II.4.

Tableaux II.4: Présentation du régime de coupe

- Série 1

Vitesse de coupe (mm/min)	Avance (mm/dent)	Profondeur de passe (mm)	Plaquettes de coupe utilisées
80 ; 120	0.02	1	GC4030 ; CT530

- Série 2

Vitesse de coupe Vc (mm/min)	Avance f_z (mm/dent)	Profondeur de passe a_p (mm)	Plaquettes de coupe utilisées
80 ; 120	0.018	0.5	H13A ; GC1030 ; GC4230 ; GC2030

Les essais ont été effectués à sec.

II.2 Méthodologie de réalisation des expériences

Les expériences ont été réalisées selon la méthode suivante :

II.2.1 Méthode unifactorielle

La conduite des essais selon cette méthode est basée sur le principe de la variation d'un seul facteur, alors que tous les autres facteurs influant sur le processus de coupe sont maintenus constants. On donne une série de valeurs discrètes au facteur variable X($X=X_i$…….. X_n). On réalise un essai et on mesure la réponse Y_i. Chaque résultat de mesure individuel est noté $Y_{ij.}$ Le premier indice, i, est celui qui identifie le numéro d'essai. Le second indice, j, est le numéro de résultat de mesure de l'essai répété où (j=1…..k), tableau II.5.

Tableau II.5:Réalisation des essais d'après la méthode unifactorielle

№ d'essai	facteur variable (X)	Paramètre de sortie (Y)				
1	X_1	Y_{11}	Y_{12}	-	Y_{1K}	Y_{moy1}
2	X_2	Y_{21}	Y_{22}	-	Y_{2k}	Y_{moy2}
3	X_3	Y_{31}	Y_{32}	-	Y_{3k}	Y_{moy3}
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
N	X_N	Y_{N1}	-	Y	Y_{Nk}	Y_{moyN}

Cette méthode nous permet de déterminer un modèle mathématique exprimant la relation entre le paramètre d'optimisation étudié Y et le facteur variable X.

La forme générale du modèle mathématique la plus utilisée est :

$$Y= CX^n \qquad \text{(II.1)}$$

Où **C** : est une constante qui tient compte de l'influence de tous les autres facteurs qui ne figurent pas dans le modèle.

N : est un exposant indiquant le degré d'influence du facteur X sur le paramètre Y.

La détermination de ce modèle revient à déterminer ses constantes C et n par la méthode des moindres carrés. L'estimation sera faite sur la base des données expérimentale. Notre objectif donc

est de rechercher une fonction linéaire qui décrit la tendance des points expérimentaux figure ( ). En prenant les logarithmes des deux parties de l'équation (II.1), on obtient la formule suivante :

$$Ln(Y)= Ln(C) +nLn(X) \quad \text{(II.2)}$$

$$Y'=B+AX' \quad \text{(II.3)}$$

$$Y'=LnY \quad \text{(II.4)}$$

$$X'=LnX \quad \text{(II.5)}$$

Après un calcule élémentaire on obtient les expressions suivantes permettant la détermination respectivement la constante B=LnC et la pente A=n.

$$B = Ln\ C = \frac{1}{N}\left[\sum_{i=1}^{N} Yi - n\sum_{i=1}^{N} Xi\right] \quad \text{(II.6)}$$

$$A = n = \frac{N\sum_{i=1}^{N} YiXi - \sum_{i=1}^{N} Yi \sum_{i=1}^{N} Xi}{\sum_{i=1} Xi^2 - \left[\sum_{i=1}^{N} Xi\right]^2} \quad \text{(II.7)}$$

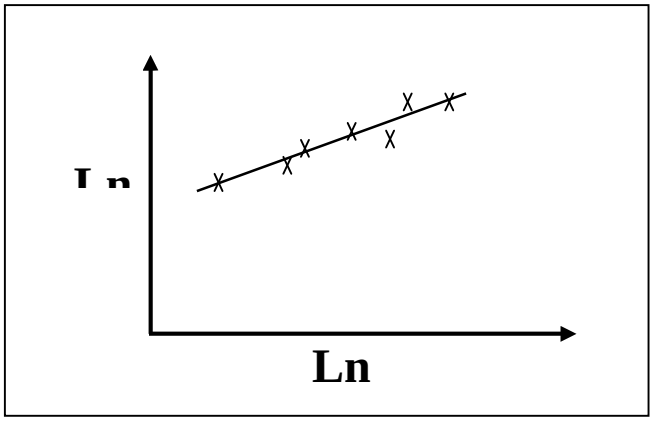


Figure II.18: Représentation graphique de la droite de régression

- **Constatations**

Lors des essais, on a noté :

1- Présence d'étincelles au début de l'usinage de l'acier 100 Cr6 avec les plaquettes non revêtues H13A.

2- Durant tout l'usinage de l'acier 100 Cr6 avec les plaquettes GC1030 il ya eu des copeaux rougeâtres associé à des projections d'étincelles.

3- Présence de croute sur la surface traitée qu'on a enlevée par papier vert avant de mesurer la dureté pour préparer la pièce à l'usinage.

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats. Il concerne l'étude de l'effet de plusieurs types de matériaux à outil citées dans le tableau II.2 sur l'usure, la rugosité et la morphologie du copeau lors de l'usinage des deux aciers ISO C45 et 100Cr6. L'analyse de l'étude du contact "Outil-Pièce" a donc été faite à travers les plans d'expériences en suivant l'évolution des paramètres de sortie (rugosité ,usure et morphologie du copeau) en fonction des paramètres d'entrée (Vc, f_z et a_p). Ces expériences ont été réalisées au niveau du laboratoire LR3MI du département de Génie-Mécanique de l'Université Badji Mokhtar-Annaba.

III.2 Résultats et analyses des essais de la série 1

Les essais ont été menés conformément à la méthode unifactorielle, lors de l'usinage des deux aciers C45 et 100 Cr6 effectués au moyen de six différents matériaux de coupe (GC4030, GC1030, GC2030, GC4230, CT530 et H13A).

III.2.1 Résultats de l'usure

Le suivi de l'évolution de l'usure a été effectué pour l'usure en dépouille principale (VB), l'usure en dépouille auxiliaire (VS) et l'usure au sommet des différentes plaquettes. L'usure admissible retenue est [VB] = 0,3 mm (ISO 3685).

Les résultats obtenus sont donnés à l'annexe I (tableaux I.1 à I.8). Les conditions du régime de coupe utilisées (variables d'entrée) des deux séries lors de l'usinage à sec des aciers C45 et 100 Cr6 sont présentées dans le tableau II.4.

Les figures III.1 jusqu'à III.4 illustrent l'évolution de l'usure en dépouille principale VB et l'usure en dépouille auxiliaire VS en fonction du temps pour les plaquettes (GC4030 et Cermet530) lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 à Vc=80 et 120 m/min.

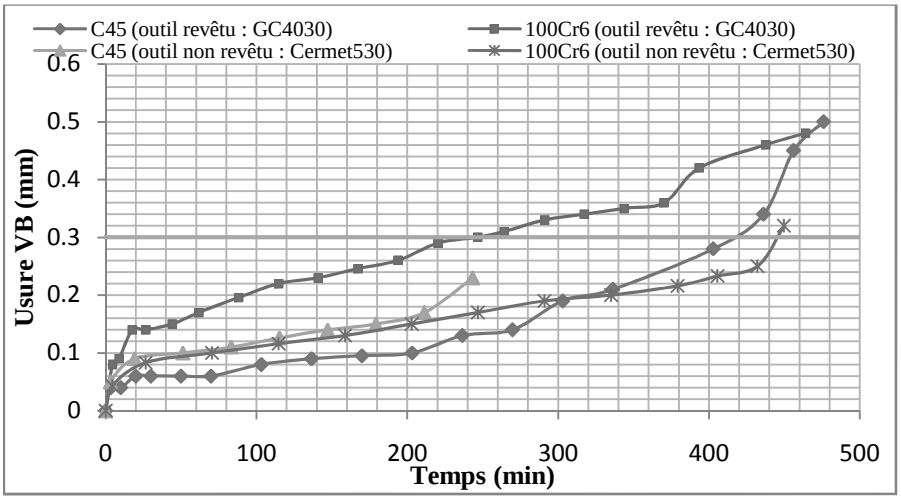


Figure III.1. Evolution de l'usure en dépouille principale VB en fonction du temps
Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

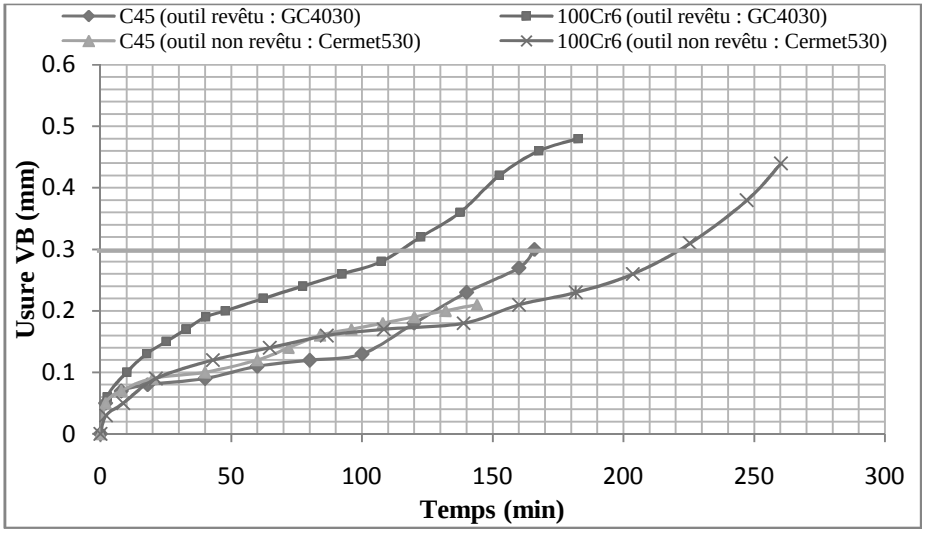


Figure III.2. Evolution de l'usure en dépouille principale VB en fonction du temps Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

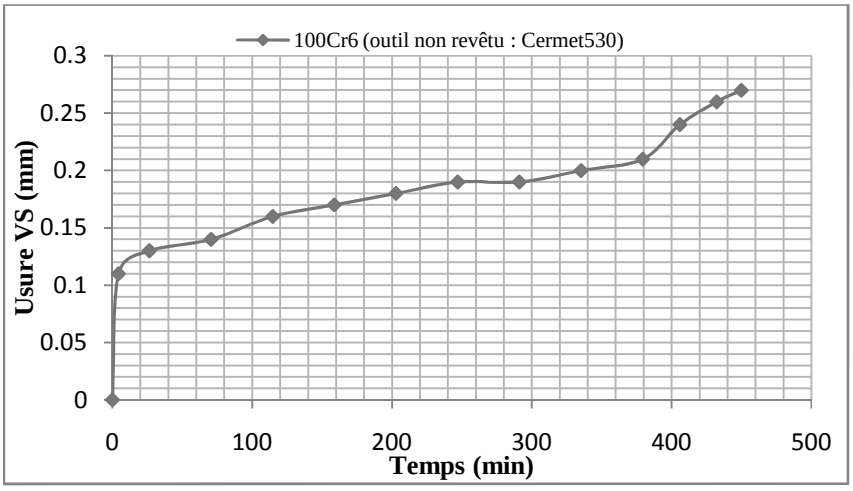


Figure III.3. Evolution de l'usure en dépouille auxiliaire VS en fonction du temps Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

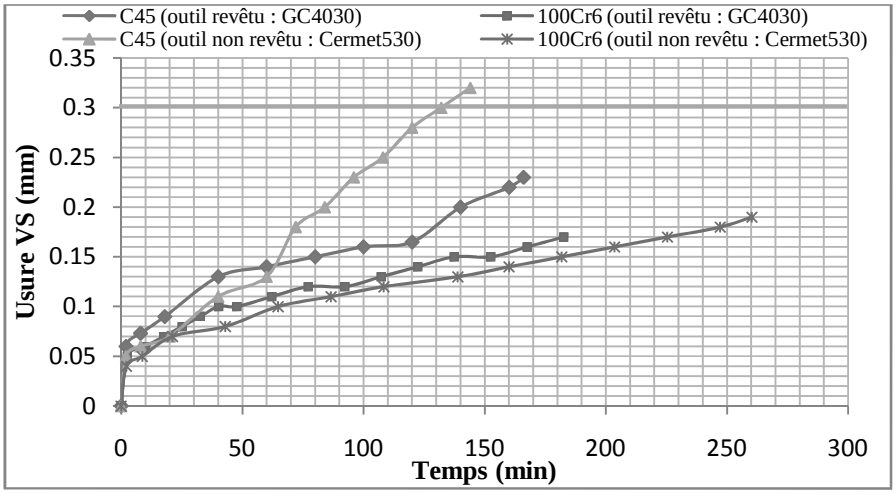


Figure III.4. Evolution de l'usure en dépouille auxiliaire VS en fonction du temps Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

III.2.2 Analyse des résultats de l'usure

Les résultats illustrés dans les tableaux I.1à I.8 du suivi de l'usure en dépouille principale et en dépouille auxiliaire des différentes plaquettes sont illustrés graphiquement par les figures III.1 à III.4.

Les essais réalisés sont ceux d'usure de longue durée [Norme ISO 3685] et cela pour évaluer les tenues des outils utilisés à différentes vitesses de coupe. Ce type d'essai fourni des résultats relativement fiables et proches de la réalité industrielle **[74,102].**

L'analyse de ces courbes montre que l'allure générale obéit à la loi universelle de l'usure **[103]** et est caractérisée par les trois zones principales :

La première correspond aux premières secondes de travail et se distingue par une usure intensive, appelée usure initiale ou de jeunesse, la grande vitesse d'accroissement de l'usure s'explique par l'élimination des aspérités au niveau de l'arête de coupe ou à son voisinage.

Dans la deuxième, l'usure évolue avec une vitesse relativement plus lente et devient plus au moins linéaire. Cette phase d'évolution est connue dans la littérature sous le nom de «l'usure normale »ou de maturation. Elle se distingue par une grande résistance à l'usure. Au fur et à mesure que l'outil travaille la température à l'interface outil/ pièce et outil/copeau s'élève ce qui favorise et amorce l'apparition de la troisième zone. Cette dernière se caractérise par l'élévation de la température dans les zones de contact de l'outil/pièce qui conduit à l'accélération des mécanismes d'usure par abrasion et par diffusion, par conséquent l'usure augmente brusquement et l'outil perd ses qualités de coupe et devient inutilisable. Cette zone est connue dans la littérature par la zone de l'usure accélérée ou catastrophique ou de vieillesse.

L'analyse de ces résultats montre que la vitesse de coupe a une influence significative sur l'usure des matériaux de coupe testés. En effet, pendant l'usinage de l'acier 100Cr6, on constate que l'usureVbmax des plaquettes en carbure métallique revêtu « 4030 » est relativement plus rapide que celle en cermet « CT530 ». A titre indicatif, après 400min d'usinage (Vc=80m/min), l'usure Vbmax du GC4030 est de 0,42mm, alors que celle du CT530 n'est que de 0,24mm. Cet écart prend de l'ampleur au fur et à mesure que le temps d'usinage augmente. On remarque également que l'usure des plaquettes se manifeste avec des taux d'accroissement différents suivant les surfaces de dépouille principale et auxiliaire **[33]**. En effet, à 120m/min et après 180min d'enlèvement de matière, l'usure Vbmax et VS des plaquettes GC4030 sont respectivement 0,48mm et 0,17mm. Pour la même vitesse, ceci est observé également pour les plaquettes CT530, mais avec des écarts relativement plus faibles (à 180min ; Vbmax=0,25mm et VS=0,15mm). L'analyse de l'effet de la vitesse de coupe sur le comportement à l'usure des deux matériaux à outil, fait ressortir qu'à une usure admissible Vbmax=0,3mm les ratios (T_{CT530}/T_{4030}) de performance en termes de durée de vie du cermet CT530 par rapport au carbure revêtu 4030 à 80m/min et 120m/min, sont respectivement

1,78 et 1,91. Ce qui implique qu'aux grandes vitesses de coupe la performance du cermet se confirme davantage. Il est à noter aussi qu'un accroissement de la vitesse de coupe de 1,5 fois (Vc= (80 à 120) m/min fait chuter la durée de vie de 54% et 51%, respectivement pour le carbure revêtu 4030 et le cermet CT530.

Par contre en faisant l'analyse de l'usure de ces mêmes plaquettes après l'usinage de l'acier C45 (figures III.1et III.2), on constate qu'à la vitesse 80m/min l'usure en dépouille Vbmax des plaquettes GC4030 est plus rapide que celle pour les cermets CT530 où Vbmax évolue rapidement vers des valeurs dépassant l'usure admissible. C'est à dire que ces dernières n'ont pu résister qu'à 243,2 mn de travail ce qui est très faible comparativement aux plaquettes en carbure revêtu qui arrivent à 476.1 mn de travail dépassant ainsi l'usure admissible. L'analyse des courbes d'usure à la vitesse 120m/mn, fait ressortir que les GC4030 ont une durée de vie plus longue que les cermets 530, ces dernières n'ont atteint que 144mn alors que les GC4030 ont travaillé 2 fois plus (260,28mn) .Aussi leur usures respectives sont 0,21mm et 0,44mm c'est à dire que les plaquettes en carbure métallique revêtu résiste mieux pour l'usinage de l'acier C45 à la vitesse de 120m/mn. L'usure en dépouille principale VB et l'usure en dépouille auxiliaire VS prennent la même allure et les profils d'usure sont très typiques. Par ailleurs, on remarque que les valeurs de VB sont supérieures à celles de VS et donc le critère d'usure VB permet de mieux voir et suivre cette évolution d'usure. C'est pour cette raison que, l'usure en dépouille VB est prise comme critère principal pour la détermination de la durée de vie.

III.2.2.1 Observations microscopiques de la morphologie de l'usure

Une observation microscopique (Figures III.5 à III.8) serait plus intéressante et plus pratique pour illustrer la morphologie de l'usure suivant les surfaces de dépouille principale et auxiliaire pour les deux matériaux à outils en fonction du temps à différentes vitesses de coupe. L'analyse de ces figures montre l'endommagement par usure des arêtes tranchantes principale et auxiliaire. A 80m/min deux cavités distinctes montrant une perte de matière importante. Notant que ces deux types d'usure s'accroissent en largeur et en hauteur en fonction du temps, jusqu'à ce qu'ils se rejoignent au niveau du bec de l'outil, provoquant ainsi son effondrement (Figure III.5). A 120m/min (figures III.5 et III.6), l'usure des plaquettes GC4030 est nettement plus prononcée que celle du CT530 sur la figure III.6, ce qui témoigne sa performance en termes de résistance.

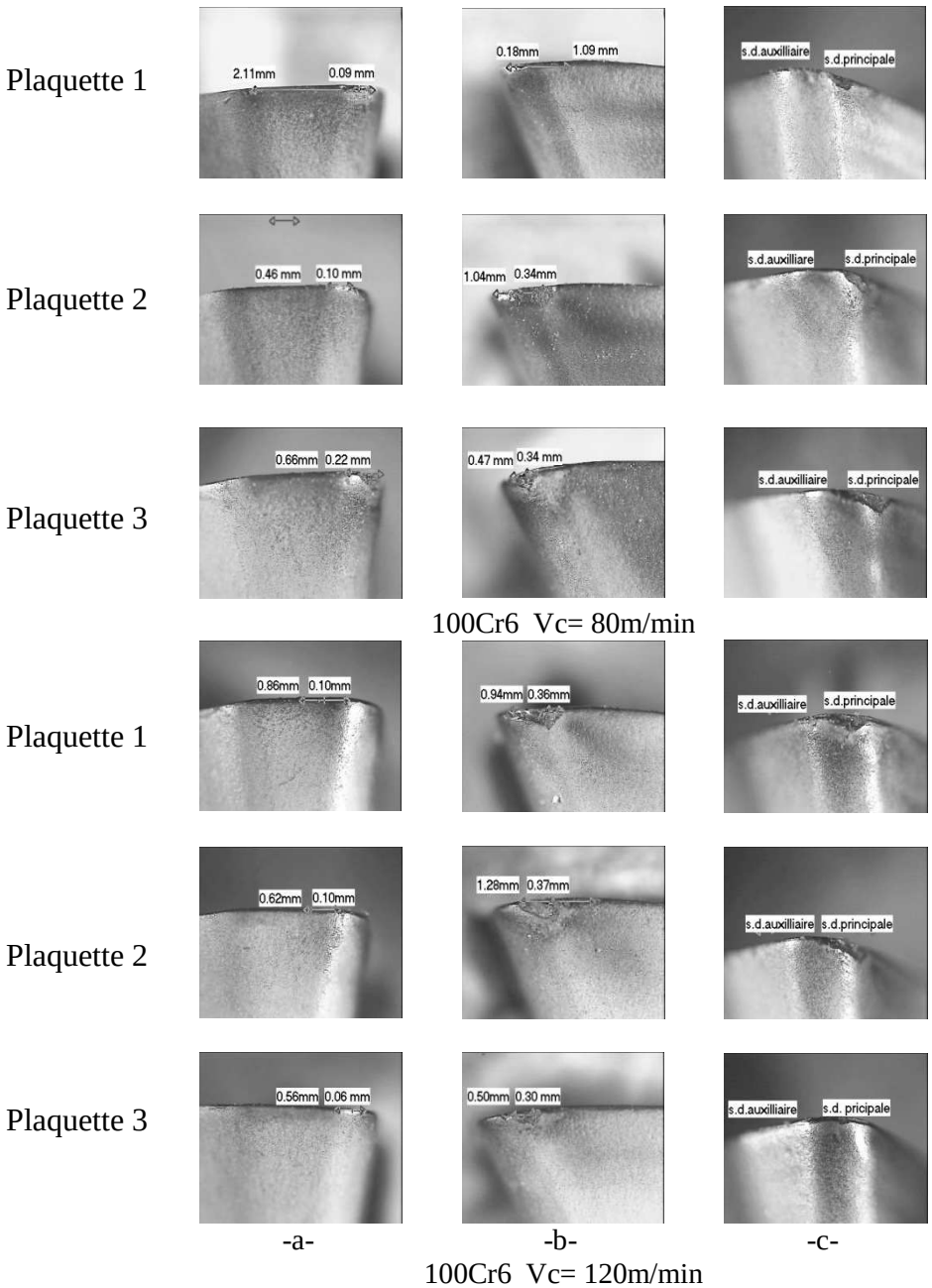


Figure. III.5. Micrographie de l'usure VB, VS et au sommet des plaquettes GC4030 à différentes vitesses de coupe, fz=0.02 mm/d, ap=1mm

a) Surface en dépouille auxiliaire, b) Surface en dépouille principale, c) Surface en dépouille (sommet)

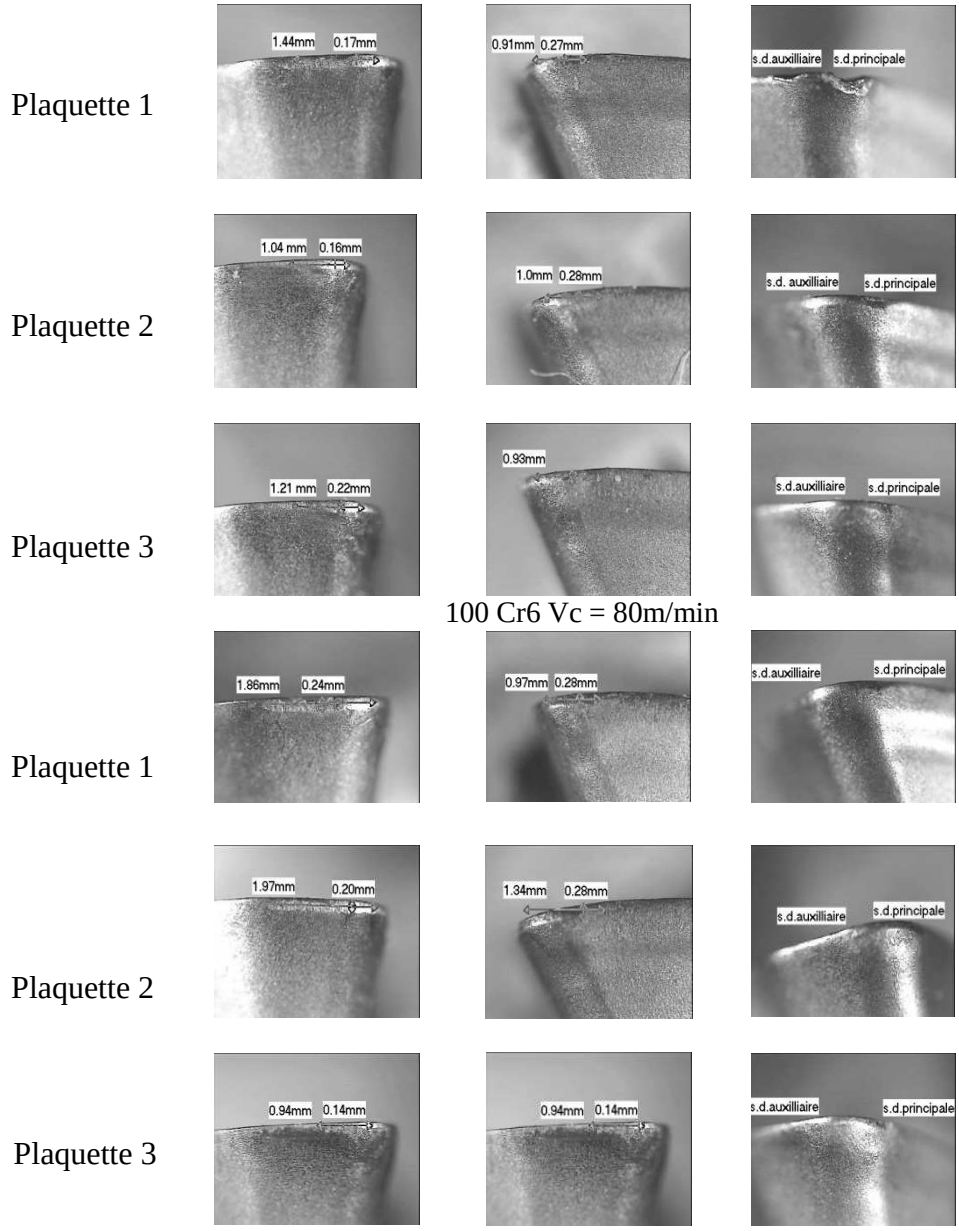


Figure. III.6. Micrographie de l'usure VB, VS et au sommet des plaquettes Cermets 530 à différentes vitesses de coupe, fz=0.02 mm/d, ap=1mm

a) Surface en dépouille auxiliaire, b) Surface en dépouille principale, c) Surface en dépouille (sommet)

• A la vitesse 80 m/min, l'usinage se fait sans difficulté. L'usure sur la surface en dépouille des plaquettes GC4030 est irrégulière, elle se manifeste au début par l'apparition d'une bande striée et brillante, elle est caractérisée par une entaille d'une profondeur de 0,22 mm et d'une largeur de 1,6mm .Avec l'augmentation du temps d'usinage, la valeur de VB augmente, le copeau est fragmenté. La bande d'usure suivant la surface de dépouille auxiliaire est plus au moins régulière avec une largeur et une profondeur allant respectivement jusqu'à 1,07mm et 0,41mm .On remarque à cette vitesse de coupe une stabilité du système usinant. L'usure en dépouille se manifeste par une petite cuvette au sommet dés les premières minutes d'usinage et elle s'élargie avec le temps (figure III.7).

• Avec l'augmentation de la vitesse de coupe (à 120m/min), les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent, on remarque après un temps la formation sur la surface de dépouille des petites cannelures, celles-ci sont générées suivant le sens de la direction de la vitesse de coupe. L'usure VB évolue et augmente de largeur et devient irrégulière. Vers la fin de l'essai, l'usinage devient difficile et le copeau obtenu est de couleur rouge vif, on observe l'apparition d'écaillages sur la surface de dépouille de l'outil suite aux contraintes élevées générées du processus de coupe. L'évolution rapide de VB et VS conduisent à la fin à l'effondrement total du bec de l'outil en carbure métallique revêtu (figure III.7)

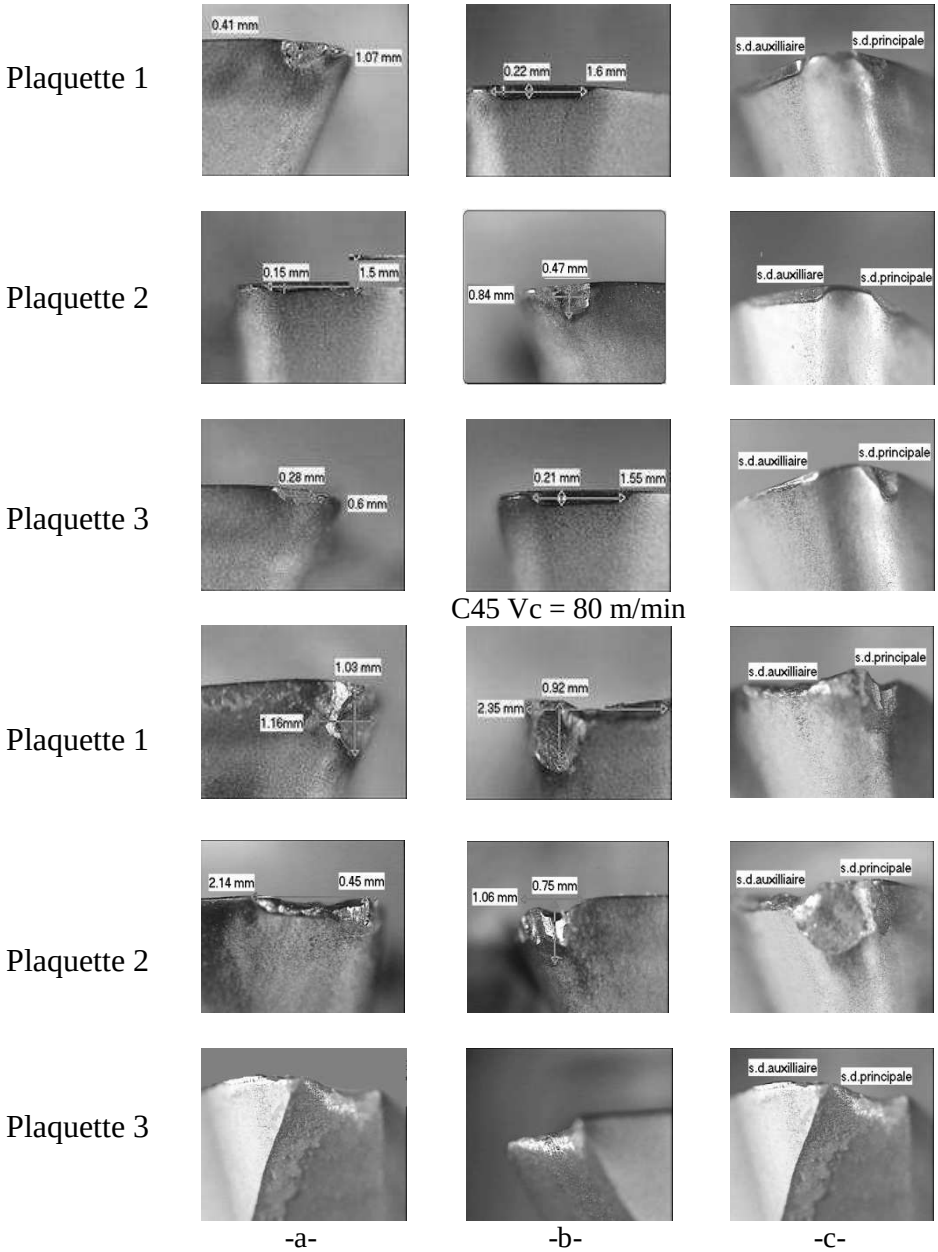


Figure. III.7. Micrographie de l'usure VB, VS et au sommet des plaquettes GC4030 à différentes vitesses de coupe, fz=0.02 mm/d, ap=1mm

a) Surface en dépouille auxiliaire, b) Surface en dépouille principale,c) Surface en dépouille (sommet)

Les cermets à leur tour présentent la morphologie d'usure suivante :

a) A 80m/min deux cavités distinctes montrant une perte de matière importante, sont observées suivant les surfaces de dépouille principale et auxiliaire. Notant que ces deux types d'usure s'accroissent en largeur et en hauteur en fonction du temps, jusqu'à ce qu'ils se rejoignent au niveau du bec de l'outil, provoquant ainsi son effondrement.

b) A 120m/min, les bandes d'usure suivant les deux surfaces sont plus au moins régulières, avec une entaille de faible profondeur (Figure III.8).

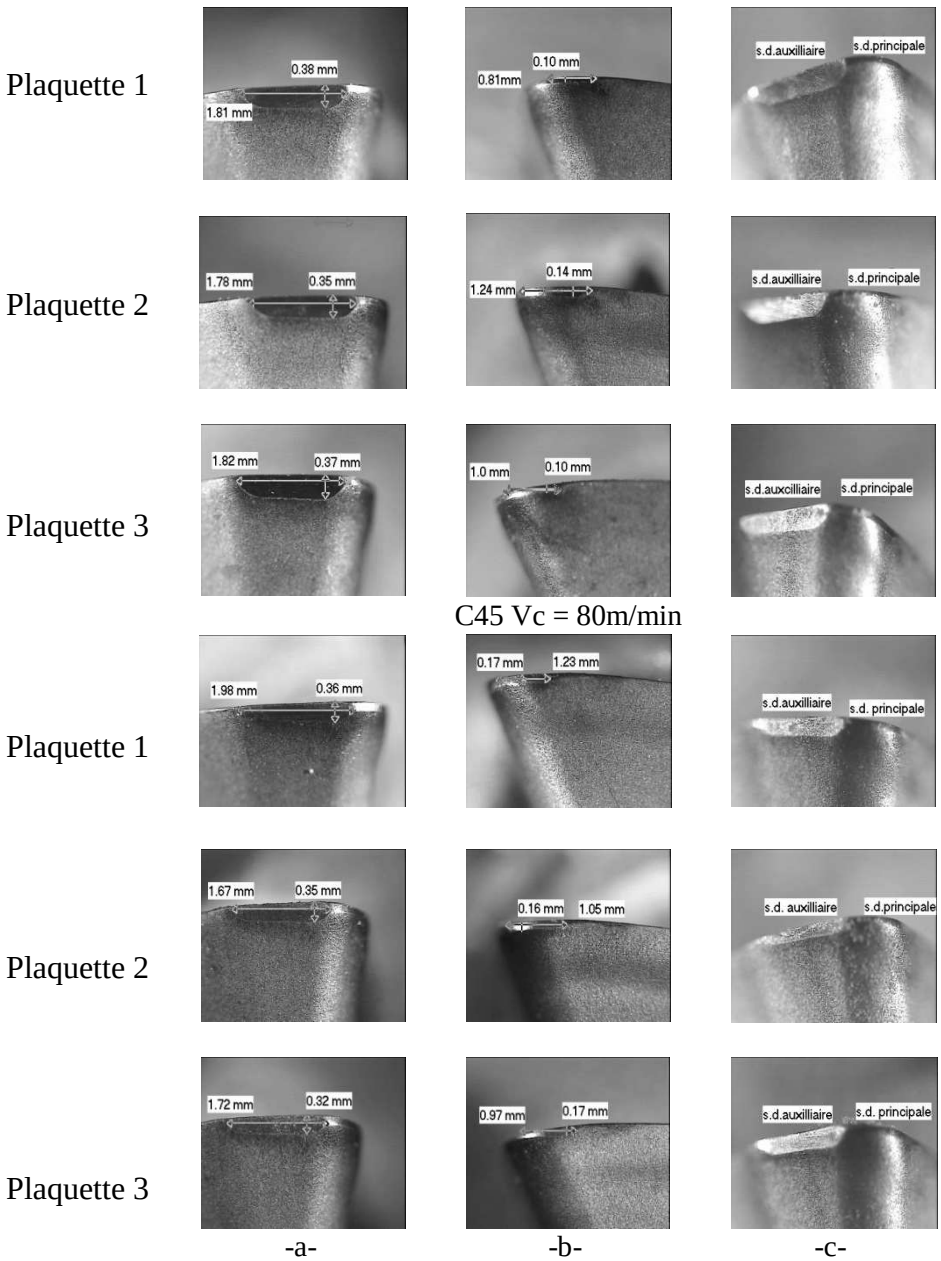


Figure. III.8. Micrographie de l'usure VB, VS et au sommet des plaquettes Cermets 530 à différentes vitesses de coupe, fz=0.02 mm/d, ap=1mm

a)Surface en dépouille auxiliaire, b) Surface en dépouille principale, c) Surface en dépouille (sommet)

L'usure en dépouille auxiliaire, malgré sa vitesse d'accroissement relativement faible par rapport à l'usure en dépouille principale, conduit à la réduction de l'angle de direction auxiliaire ($\alpha \rightarrow 0$) au voisinage du bec de l'outil. La partie de l'arête tranchante se trouvant dans cette zone (bande d'usure) et qui est parallèle à la surface usinée élimine les aspérités générées par le bec de l'outil. Par conséquent ceci se traduit par une nette amélioration de l'état de surface. Cette amélioration est conservée jusqu'à une certaine valeur admissible de l'usure. Au delà de laquelle (c.-à-d. quand l'usure VS et Vbmax se rejoignent), la qualité de surface commence à se dégrader. Ceci à été constaté durant la réalisation des essais.

Le traitement des résultats obtenus (figure III.1 à III.4) en tenant compte de la valeur de l'usure admissible retenue selon la norme a permis la détermination des durées de vie suivantes (tableau III.1) :

Tableau. III.1: Durées de vie des différents matériaux à outil utilisés en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage des deux aciers.

Paramètres d'entrée Régime de coupe			Durée de vie des plaquettes testées T (mn)			
Vc(mm/min)	fz (mm/d)	ap (mm)	Acier C45		Acier 100 Cr6	
			Cermet 530	GC4030	Cermet 530	GC4030
80	0.02	1	243	413	445	247
120	0.02	1	132	166	221	115

L'analyse des tenues (tableau III.1) obtenues lors des essais permet de considérer l'effet des rapports d'augmentation successive des vitesses de coupe sur la durée de vie correspondante (tableau III.2) **[58].**

Tableau III.2 : Effet de la vitesse de coupe sur la durée de vie des plaquettes.

Rapport des vitesses de coupe	Ratios des tenues			
	C45		100Cr6	
	T2/T1	T2/T1	T2/T1	T2/T1
V2/V1 = 1,5	0.54	0.40	0.50	0.47

La figure III.9 illustre les tenues obtenues lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 par les deux matériaux de coupe (GC4030 et CT530) à différentes vitesses de coupe. L'analyse des résultats montre que pour un rapport de vitesses égal à 1.5 les durées de vie des outils chutent (60% et 44%) respectivement pour celles à triple revêtement [TiN+Al2O3+Ti(C, N)] et celles en carbure métallique non revêtu CT530 lors de l'usinage de l'acier C45 et chutent (53% et 50%) respectivement pour celles en carbure métallique à triple revêtement GC4030 et celles non revêtues CT530 lors de l'usinage de l'acier 100Cr6.

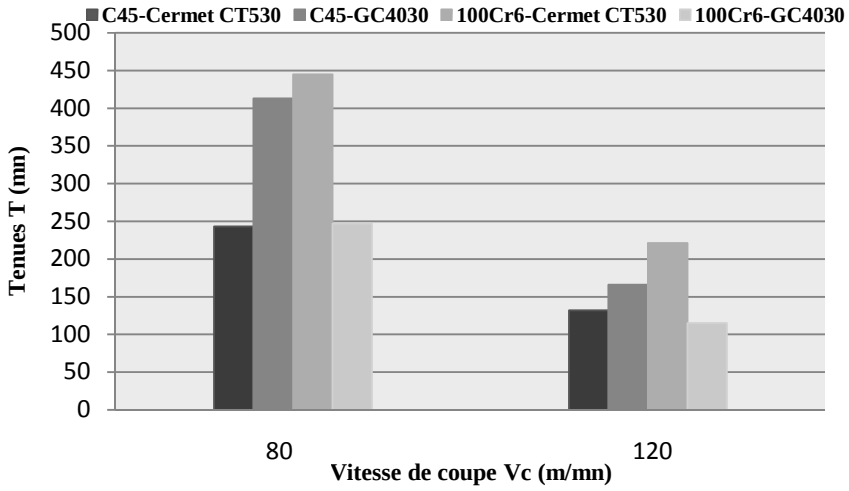


Figure III.9. Tenues expérimentales des différents matériaux à outil à différentes vitesse de coupe, à [VB]=0.3 mm

III.2.2.2 Modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe

Le traitement des résultats de la tenue par la méthode de Taylor, a permis l'établissement des modèles de la tenue en fonction de la vitesse pour [VB] =0.3 (tableau III.3). Les modèles mathématiques déterminés montrent la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie de l'outil. Ils permettent donc de déterminer la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe souhaitée. D'après ces modèles, on peut dire que la vitesse de coupe a une influence majeure sur la durée de vie de l'outil. Il est très clair que son augmentation entraîne une diminution de la tenue de l'outil. Il est à noter aussi que ces modèles mathématiques sont un moyen très utile pour l'élaboration des abaques et pour une éventuelle étude d'optimisation du processus de coupe. Les coefficients de détermination des modèles trouvés sont élevés et convergent vers l'unité, ce qui traduit la bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

Tableau. III.3 : Modèles mathématiques de la tenue.

Matériau usiné	Matériau de coupe	Modèle de Taylor	Coefficient de détermination R^2
100Cr6	GC4030	$9{,}34.10^{5}\ Vc^{-1{,}88}$	0.98
	Cermet 530	$8{,}647.10^{5}\ Vc^{-1.728}$	0.92
C45	GC4030	$7{,}870.10^{6}\ Vc^{-2.249}$	0.94
	Cermet 530	$1.802.10^{5}\ Vc^{-1.508}$	0.92

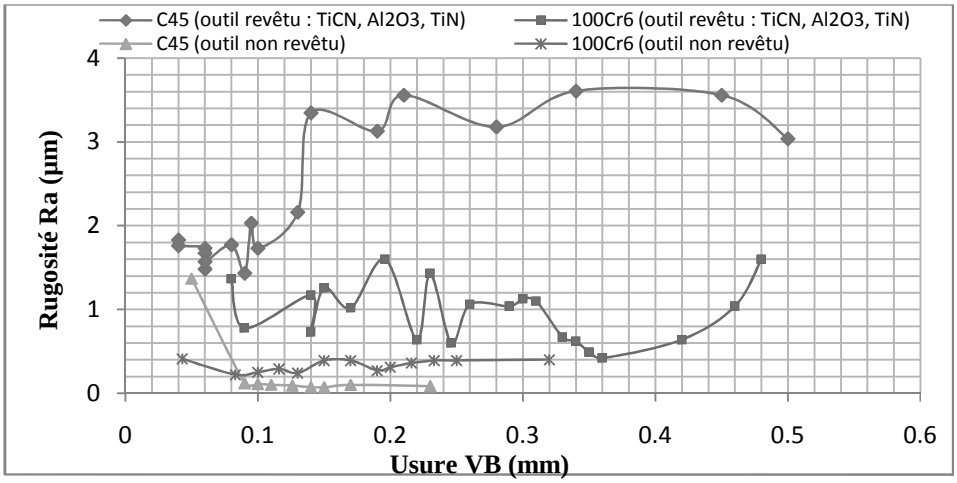
III.2.3 Résultats de la rugosité

En se basant sur les essais réalisés, nous avons relevé les valeurs enregistrées de l'état de surface pour les différentes plaquettes, à différentes vitesses de coupe et fonction de l'usure. La qualité de la surface usinée a été caractérisée par quatre critères Ra, Rz et Rt.

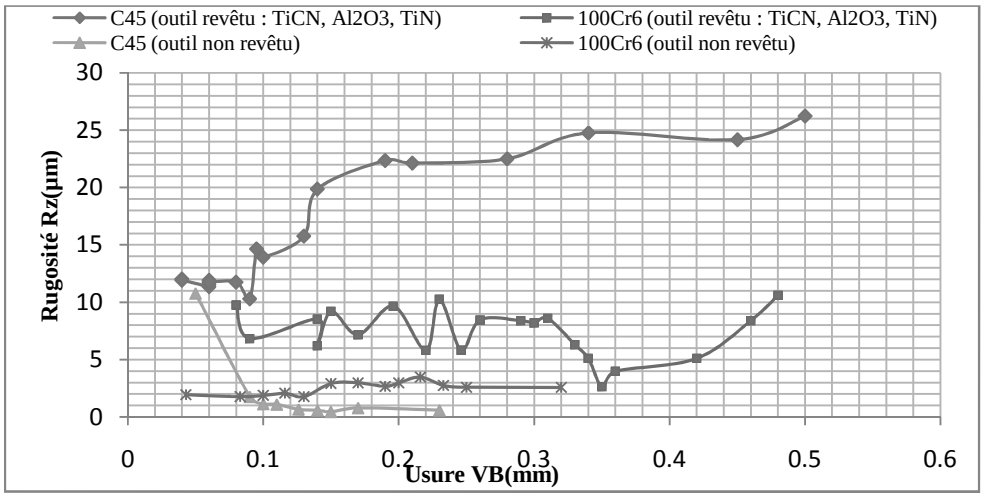
Chaque essai a fait l'objet de trois mesures prises sur une même surface orientée à 120°.Le suivi de l'évolution de la rugosité a été réalisé au moyen d'un rugosimétre (2D) SJ 201 (Mitutoyo), doté d'un système à palpeur inductif se déplaçant linéairement sur la surface mesurée (déplacement de 0.8x5 mm maxi). Le premier suivi, consiste à prendre les mesures en même temps que celles de l'usure. Quand au second, il a été réalisé indépendamment du premier en utilisant des paliers de 25 mm selon le diamètre de la fraise utilisée (Ø=25mm) et la longueur de la pièce utilisée pour chaque essai et chaque matériau. Les résultats obtenus sont présentés à l'annexe I (tableaux I.1 à I.8).

III.2.3.1 Influence de l'usure sur la rugosité des surfaces usinées

Le premier suivi de l'évolution de la rugosité consiste à prendre les mesures en même temps que celles de l'usure. Les résultats de l'impact de l'usure sur la rugosité sont illustrés graphiquement par les figures III.10 à III.19. On a relevé les valeurs enregistrées de la rugosité (Ra, Rz, Rt) pour les deux plaquettes testées.

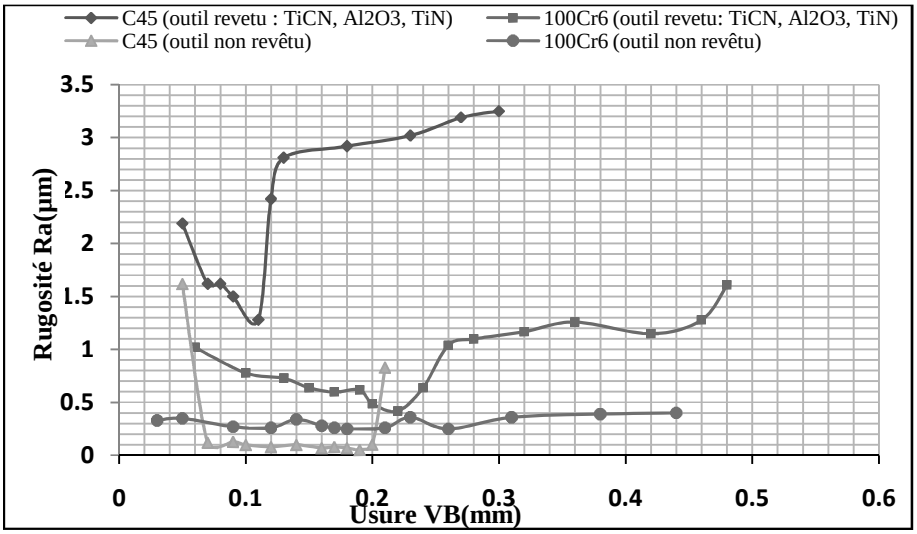


a)

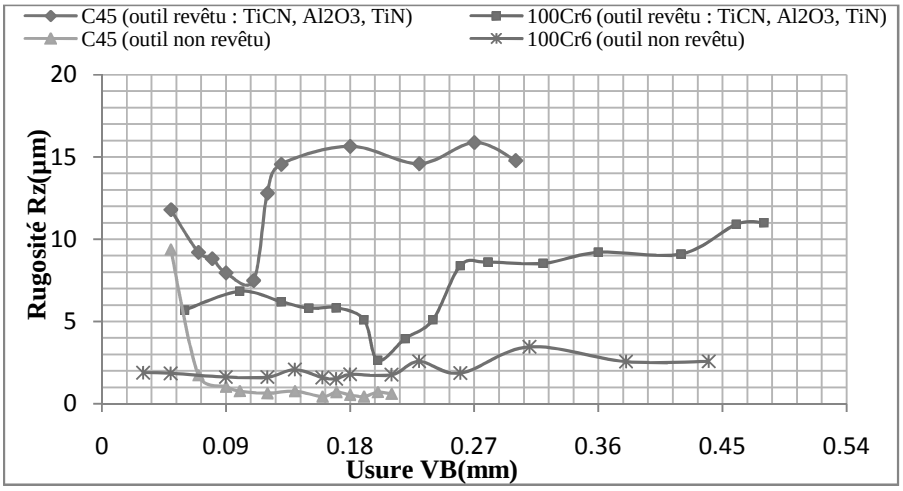


b)

Figure III.10. Evolution de la rugosité **a)** Ra et **b)** Rz en fonction de l'usure VBmax lors de l'usinage des deux aciers C45 et 100Cr6 pour la Vc = 80m/min ; f_z =0,02mm/d ; a_p =1mm.

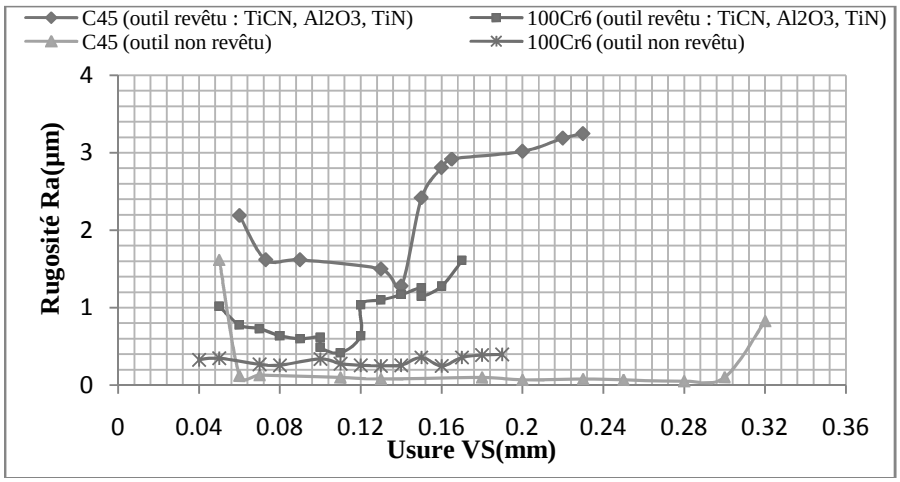


a)

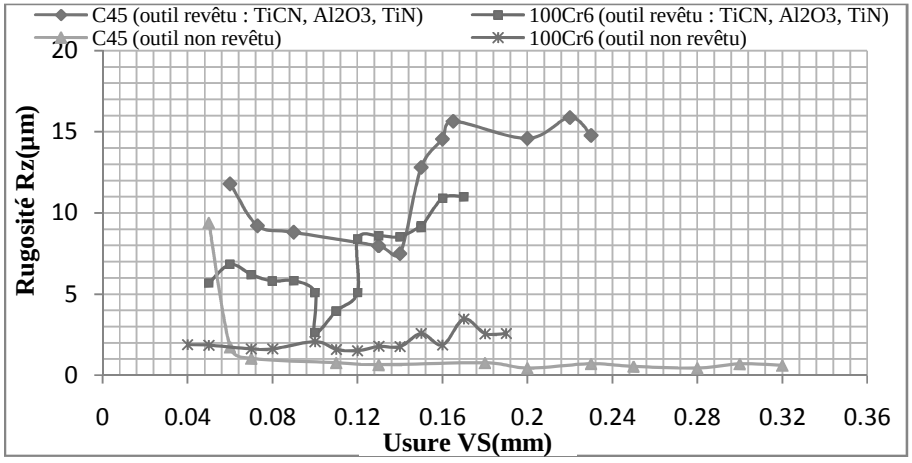


b)

Figure III.11. Evolution de la rugosité **a)** Ra et **b)** Rz en fonction de l'usure VBmax lors de l'usinage des deux aciers C45 et 100Cr6 pour la Vc = 120m/min ;f_z =0,02mm/d ;a_p =1mm.



a)



b)

Figure III.12. Evolution de la rugosité **a)** Ra et **b)** Rz en fonction de l'usure VS lors de l'usinage des deux aciers C45 et 100Cr6 pour la Vc = 120m/min;f_z =0,02mm/d ;a_p =1mm.

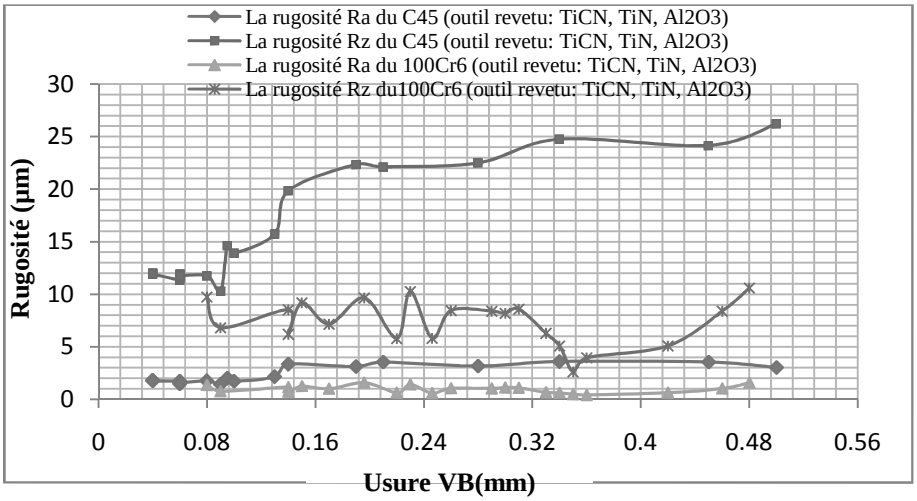


Figure III.13. Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil GC4030 en fonction de l'usure VB àVc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

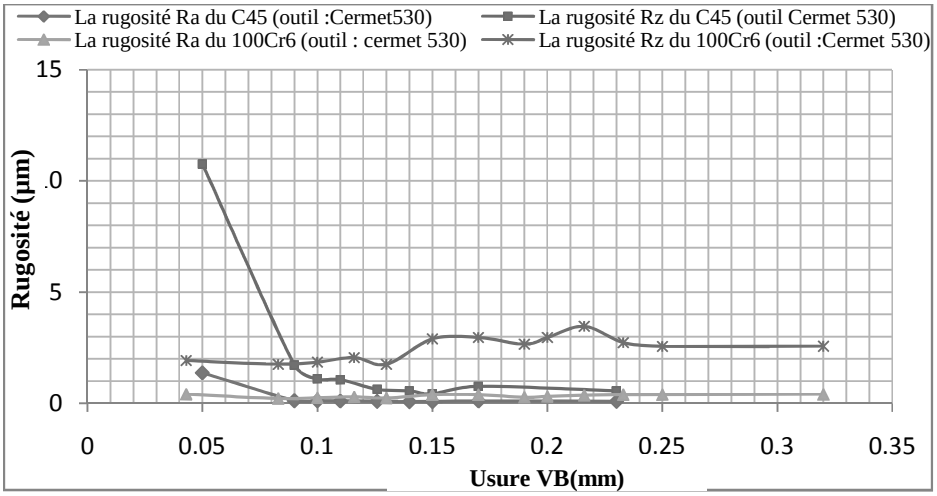


Figure III.14. Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil Cermet 530en fonction de l'usure VB àVc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

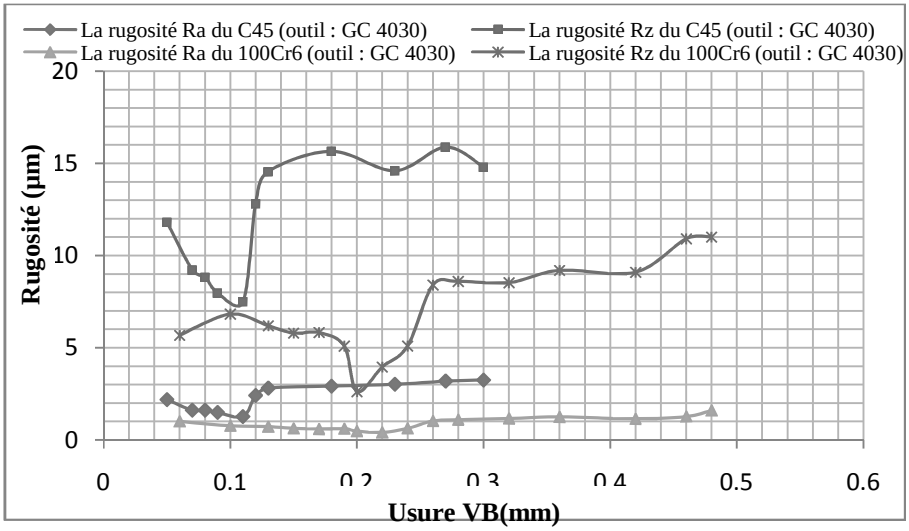


Figure III.15. Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil GC4030 en fonction de l'usure VB à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

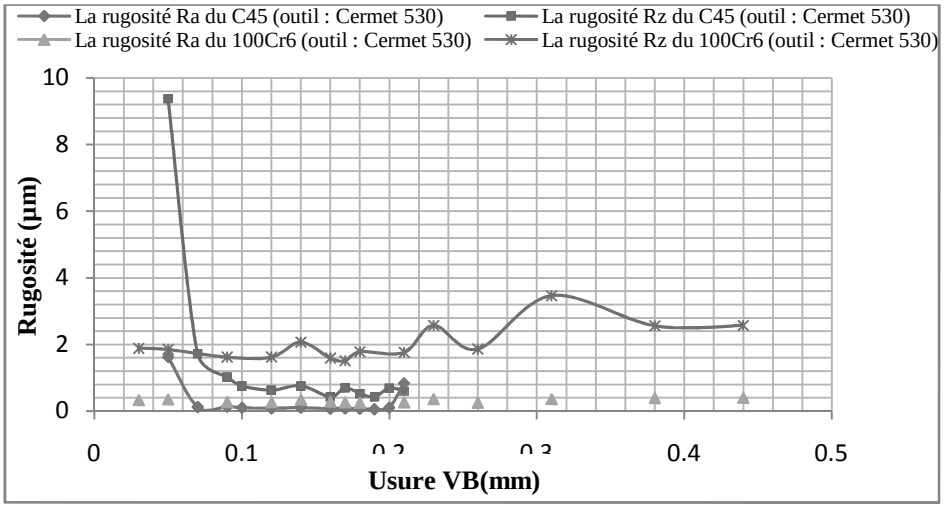


Figure III.16. Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil Cermet 530 en fonction de l'usure VB à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

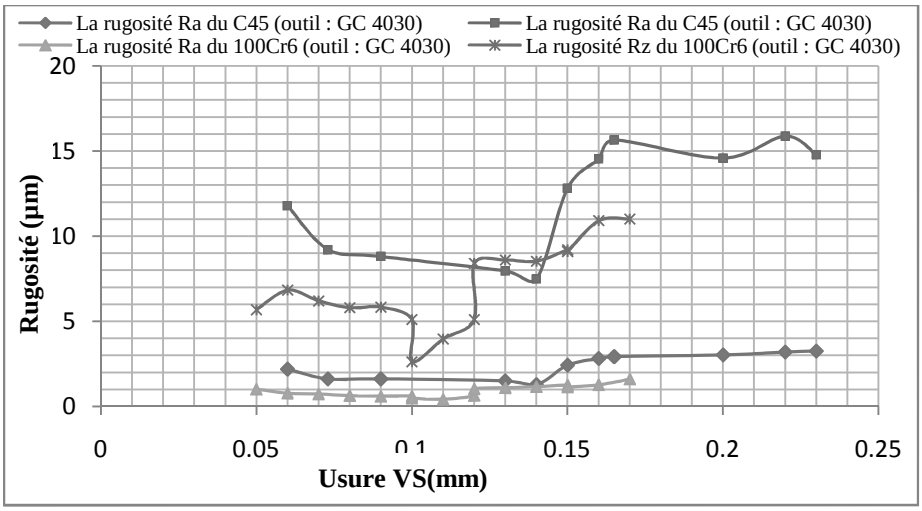


Figure III.17. Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil GC4030 en fonction de l'usure VS à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

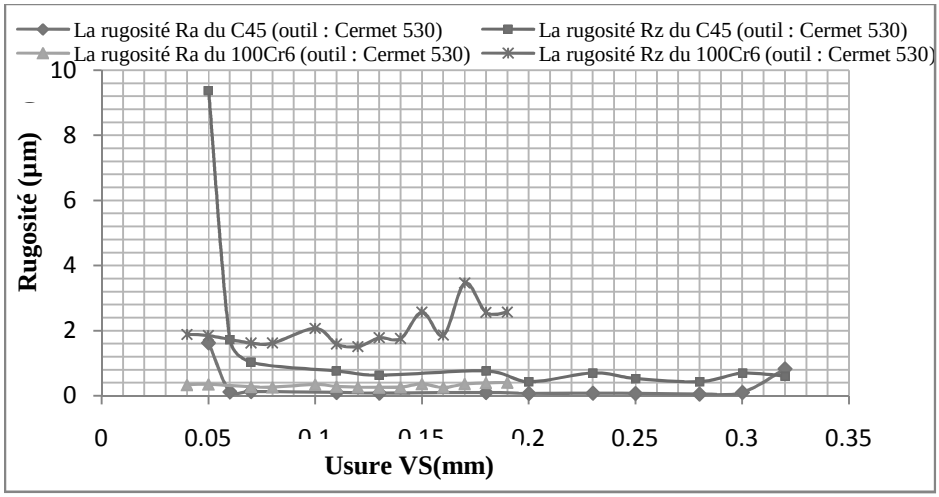


Figure III.18. Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil Cermet 530 en fonction de l'usure VS à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

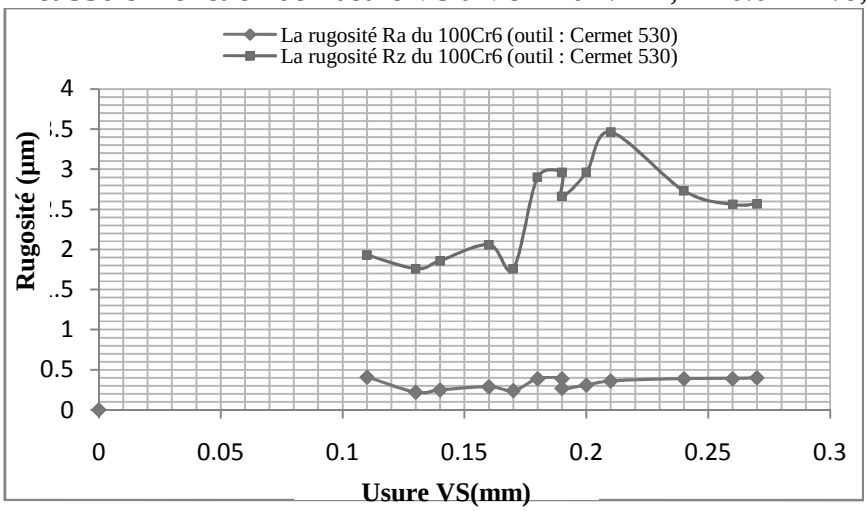


Figure III.19. Evolution de la rugosité Ra et Rz des aciers C45 et 100Cr6, usinés avec l'outil Cermet 530 en fonction de l'usure VS à Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

III.2.3.2 Influence du temps sur la rugosité des surfaces usinées

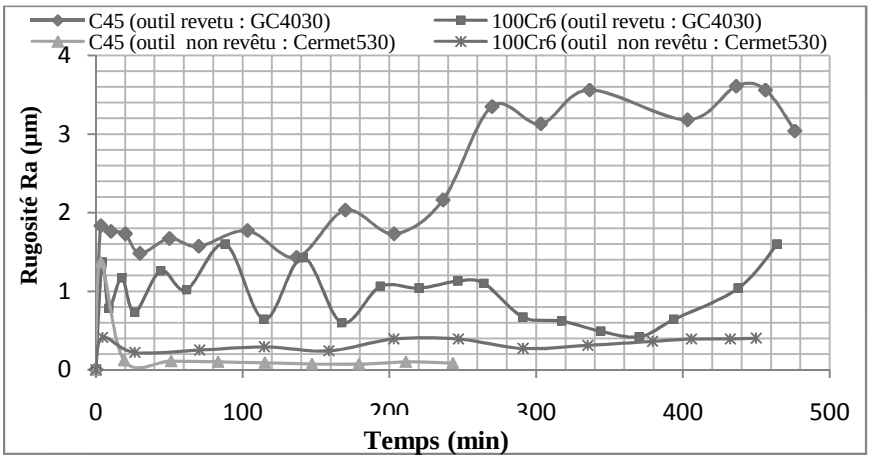


Figure III.20. Evolution de la rugosité Ra en fonction du temps lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6avecles outils GC4030 et le Cermet530 à Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

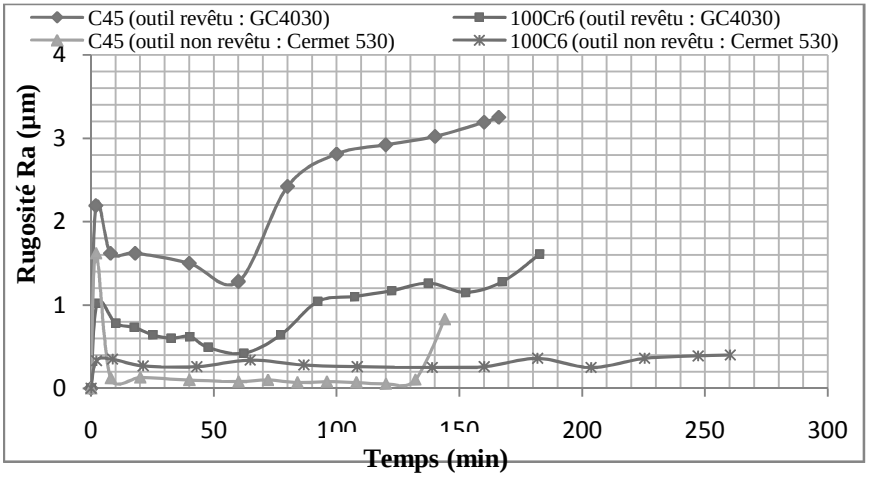


Figure III.21. Evolution de la rugosité Ra en fonction du temps lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 avec les outils GC4030 et le Cermet530 à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

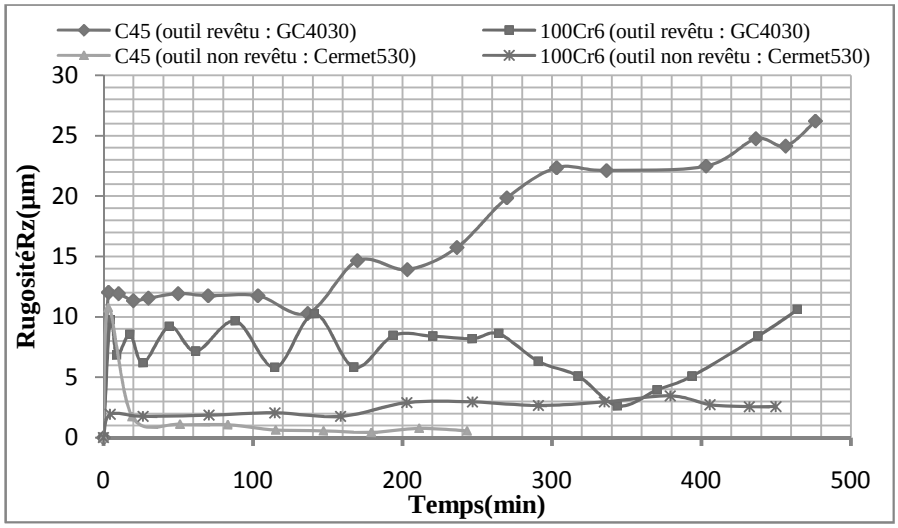


Figure III.22. Evolution de la rugosité Rz en fonction du temps lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 avec les outils GC4030 et le Cermet530 à Vc=80m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

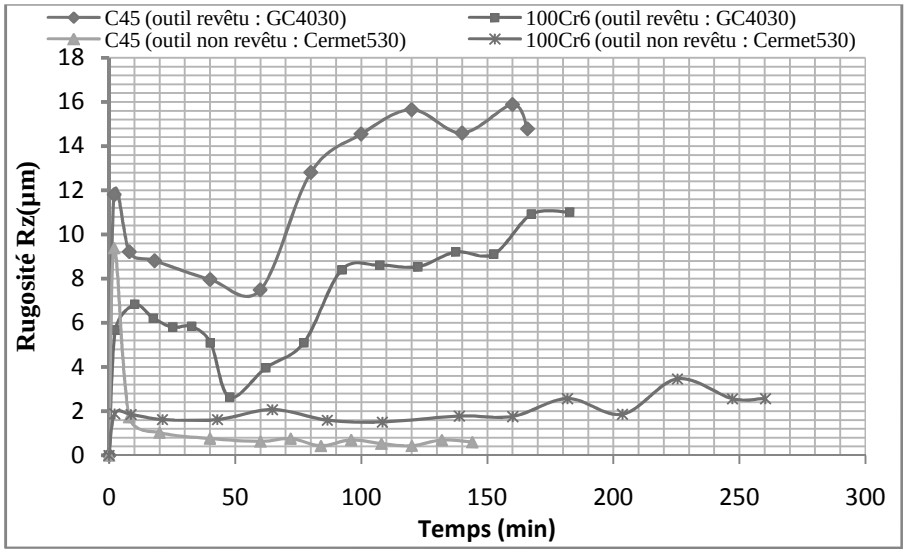


Figure III.23. Evolution de la rugosité Rz en fonction du temps lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 avec les outils GC4030 et le Cermet530 à Vc=120m/min, fz=0.02mm/d, ap=1mm

III.2.3.3 Résultats de la rugosité selon la méthode unifactorielle

Les essais réalisés pour déterminer l'effet de la vitesse de coupe sur les critères de la surface usinée avec différentes plaquettes en carbure métallique revêtu et non revêtu ont permis l'obtention des résultats illustrés dans le tableau III.4. L'avance et la profondeur de passe sont maintenues constantes et leurs valeurs sont respectivement : f=0.018mm/dent et a_p=1mm.

Tableau III.4 : Résultats des différents critères de rugosité en fonction de la vitesse de coupe de l'usinage des deux aciers C45 et 100 Cr6 avec les plaquettes Cermets 530 et GC 4030.

N°essai	Plaquettes de coupe	Paramètres d'entrée Régime de coupe			Paramètres de sortie Rugosité (µm)			
					Acier C45		Acier 100 Cr6	
		Vc (m/min)	fz (mm/d)	ap (mm)	Ra	Rz	Ra	Rz
1	GC4030	80	0.05	1	2.36	16.61	/	/
2		80	0.05	1	/	/	1.02	7.74
3	Cermets 530	80	0.05	1	0.23	1.95	/	/
4		80	0.05	1	/	/	0.33	2.47
5	GC4030	120	0.05	1	2.34	12.13	/	/
6		120	0.05	1	/	/	0.90	7.05
7	Cermets 530	120	0.05	1	0.27	1.47	/	/
8		120	0.05	1	/	/	0.31	2.05

III.2.4 Analyse des résultats de la rugosité

L'analyse de l'effet de l'usure Vbmax sur les critères de rugosité (Ra et Rz) à la vitesse Vc=120m/min, montre que ces derniers ont tendance à diminuer jusqu'à une valeur de Vbmax avoisinant 0,2mm. Au delà de celle-ci l'état de surface se dégrade. Ceci est nettement visible pour les critères Ra (4030) et Rz (4030 et CT530) (Figure III.11) .Cette amélioration de l'état de surface est motivée également par le développement de l'usure VS suivant la surface en dépouille auxiliaire. En effet, avec l'augmentation de celle-ci jusqu'à 0,10 et 0,12mm, les critères de rugosité diminuent. Au delà de ces valeurs d'usure, la qualité d'état de surface change d'allure. L'accroissement de cette usure jusqu'aux valeurs citées ci-dessus, contribue à l'amélioration de l'état de surface suite à la modification de la géométrie de la partie active de la plaquette et notamment l'annulation de l'angle de direction auxiliaire sur une certaine longueur de l'arête tranchante auxiliaire. Ceci permet d'éliminer les aspérités générées par le bec de l'outil. L'augmentation excessive de l'usure accroît d'une part les frottements aux interfaces « Outil-Pièce » et d'autre part les vibrations du système, ce qui se traduit par une dégradation de la qualité de surface usinée.

Le même phénomène est observé en travaillant à la vitesse de coupe 80m/min. Dans ce cas l'accroissement de Vbmax de la GC4030 jusqu'à 0,35mm, correspondant à un temps d'usinage 340min (figure III.1) contribue à la diminution de Ra et Rz (figure III.10). Tandis que pour la nuance du cermet CT530, la valeur limite de Vbmax réduisant la rugosité est au voisinage de 0,14mm, correspondant à un temps d'usinage t=160min (figure III.1). Dépassant cette valeur, les critères de rugosité augmentent brusquement puis ont tendance à se stabiliser (figure III.10). L'analyse de l'effet de l'usure sur la rugosité, montre également que le CT530 génère un état de surface nettement meilleur que celui produit par le carbure métallique GC4030 à triple revêtement et ceci pour les deux vitesses de coupe testées (80 et 120m/min) (figures III.10 et 11).

III.2.4.1 Influence de l'usure sur la rugosité

Les figures III.10 à III.19 illustrent les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction de l'usure pour les vitesses de coupe 80 et 120 m/min. L'analyse des résultats montre que la valeur de la rugosité pour les critères (Ra, Rz) n'est pas stable et uniforme pendant la coupe, mais elle subit une évolution en fonction du temps d'usinage. Ce dernier est étroitement lié avec l'usure. Alors on peut dire que l'endommagement superficiel des arêtes des outils de coupe conduit à la dégradation de l'état de surface du matériau usiné. L'analyse des courbes montre aussi que les cermets CT530 assurent un bon état de surface durant un temps d'usinage considérable pour les deux matériaux usinés (C45 et 100Cr6).A titre indicatif et à la vitesse de 80m /mn, la rugosité Ra n'a pas dépassé la valeur de 0,5 µm respectivement pour un temps de coupe de 243,2 mn et 449,8 mn(figure III.20) et à la vitesse 120 m/mn respectivement pour un temps de coupe de 160mn et 260,28mn (figure III.21),alors qu'avec les carbures à triple revêtement les rugosités respectives des deux aciers ont atteint 3,6µm et 1,04µm pour un temps de coupe de 437 mn à la vitesse de coupe 80 m/min, de la même manière, avec la vitesse de coupe Vc=120 m/min et après un temps de coupe de 166 min la rugosité Ra a atteint respectivement 3,25µm et 1,27µm. La rugosité de surface a été affectée par l'usure de l'outil et la vitesse de coupe ceci a été constaté également dans la référence **[104].**

III.2.4.2 Modèles de la rugosité en fonction du temps

En se basant sur les courbes de la rugosité en fonction du temps d'usinage des figures (III.20 à III.23), on peut déterminer les modèles mathématiques des différents critères de rugosité en fonction du temps (tableau III.5) sous la forme du modèle suivant :

$$Ra = cx^n \qquad \text{(III.1)}$$

Ces modèles sont très utiles pour l'évaluation de la rugosité en fonction temps et de l'évolution de l'usure. L'augmentation de ces derniers conduit à la dégradation de l'état de surface. Les coefficients de détermination trouvés sont tous élevés R^2 >0.96.

On propose de fournir une relation entre la rugosité de surface et l'usure des outils. Ce modèle peut servir pour une meilleure utilisation de l'outil d'une manière que les outils peuvent être utilisés dans toute la mesure jusqu'à ce qu'ils ne réalisent pas la qualité de surface exigée **[105].**

Tableau III.5 : Modèles mathématiques de la rugosité en fonction du temps d'usinage

Matériau usiné	**Matériau de coupe**	**Modèles mathématiques**	**Coefficient de détermination R^2**
100Cr6	GC4030	$Ra= 3,898\ Vc^{-0,306}$	0.99
		$Rz= 21.11\ Vc^{-0,229}$	0.99
	Cermets 530	$Ra= 0.65\ Vc^{-0,155}$	0.98
		$Rz=19,28\ Vc^{-0,469}$	0.98
C45	GC4030	$Ra= 2,564\ Vc^{-0,019}$	0.99
		$Rz= 5,29.10^{2}\ Vc^{-0,79}$	0.97
	Cermets 530	$Ra= 1,52\ Vc^{-0,395}$	0.99
		$Rz= 41,17\ Vc^{-0,696}$	0.97

III.2.5 Longueur et volume du copeau

A partir des résultats obtenus, nous pouvons déterminer les différentes longueurs et volumes de copeaux tableau III.6. Le temps durant lequel est produite cette longueur (L, m) et volume (V, cm3) de copeau est calculée d'après les expressions suivantes:

$$L_c = \ell_f .3.n_f \quad \text{(III.2)}$$

$$\ell_f = r_f.\zeta \quad \text{(III.3)}$$

$$n_f = \frac{1000.Vc}{3,14.D_f} \quad \text{(III.4)}$$

$$V = f_z.a_p.L_c.T \quad \text{(III.5)}$$

Où T la durée de vie de l'outil à [VB]=0.3 mm

Tableau III. 6 : Longueurs et volumes de copeaux générés lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 et l'acier C45 pour les deux matériaux à outil GC4030 et les cermets CT530.

Matériau usiné	Matériau de coupe	Vitesse de coupe Vc (m/mn)	Tenue (mn)	Longueur du copeau (m)	Volume du copeau (cm^3)
100Cr6	GC4030	80	247	46,564	2300,304
		120	115	73,912	1699,987
	Cermets 530	80	445	46,564	4144,273
		120	221	73,912	3266,932
C45	GC4030	80	413	46,564	3846,258
		120	166	73,912	2453,895
	Cermets 530	80	243	46,564	2263,052
		120	132	73,912	1951,290

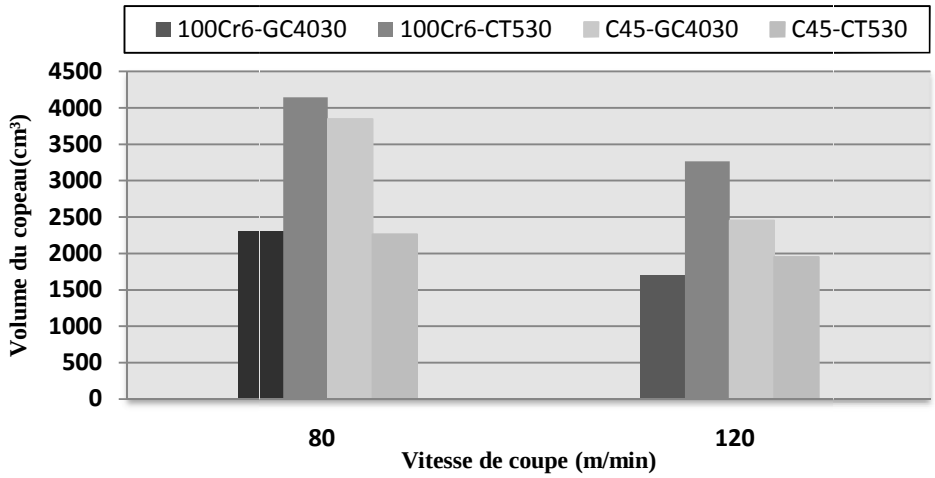


Figure. III.24. Volume du copeau généré par différents matériaux à outil à différentes vitesses de coupe, à [VB]=0.3 mm

La figure III.24 illustre le volume du copeau enlevé obtenu lors de l'usinage des deux aciers 100Cr6 et C45 par les deux matériaux de coupe le GC4030 et la CT530 à différentes vitesses de coupe. On remarque que la vitesse 80 m/min est optimale et ceci pour la plaquette CT530, l'arête de coupe a produit 4144,273 cm^3 de copeau pendant 445 min, par contre pour la GC4030 la vitesse optimale est toujours 80 m/min et l'arête de coupe produit 3846,258 cm^3 correspondant à une tenue de 413 min, il ressort que dans ces conditions la production des copeaux est maximale à 80 m/min pour les deux plaquettes de coupe. Il ressort de ces résultats que la vitesse de coupe 80 m/min conduit à un meilleur rendement.

III.3 Résultats et analyse des essais de la série 2

Dans cette série d'essai, on a procédé à la réalisation d'un traitement thermique par une trempe à 850°C avec un refroidissement rapide à l'eau et un revenu à 200°C avec un refroidissement à l'air libre pour les deux types d'acier (l'acier C45 et l'acier 100Cr6) afin de voir par une autre fenêtre l'effet des différentes plaquettes de coupe utilisées sur l'état de surface des pièces usinées et on a eu les résultats suivants :

III.3.1 Résultats de la dureté

Afin de mieux caractériser l'état de surface, on a mesuré la dureté des surfaces trempées après chaque essai, pour chaque palier usiné avec la plaquette de coupe choisie .Sachant qu'après un traitement thermique de trempe la pièce aura une dureté qui augmente de plus en plus en plus en allant de la surface au cœur de celle-ci.

- ❖ Mesures de la dureté des deux aciers avant trempe :
  - Pour l'acier C45 : 55 HRA
  - Pour l'acier 100Cr6 : 68,4 HRA = 36 HRC

Tableau III.7: Mesures de la dureté avant usinage des deux aciers trempés

Matériau trempé	Mesures de la dureté Rockwell (HRA)				Dureté Rockwell (HRC)
	M_1	M_2	M_3	M_{moy}	
C45	76.5	66.5	67.5	70.16	39.8
100Cr6	81	82	82	81.66	61

Tableau III.8 : Mesures de la dureté de l'acier C45 trempé et après usinage à Vc =120m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 mm

N° palier	Matériau à outils	Dureté Rockwell (HRA)				Dureté Rockwell (HRC)
		M_1	M_2	M_3	M_{moy}	
1	H13A	77	76	78	77	52.3
2	GC1030	78	81	80	79.66	56.8
3	GC4230	80	79	77	78.66	55.2
4	GC2030	80	79	77	78.66	55.2

Tableau III.9 Mesures de la dureté de l'acier C45 trempé et revenu, après usinage à Vc=120m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 mm

N° palier	Matériau à outils	Dureté Rockwell (HRA)				Dureté Rockwell (HRC)
		M_1	M_2	M_3	M_{moy}	
1	H13A	76	74	74	74.66	47.7
2	GC1030	76	75	77	76	50.5
3	GC4230	80	78	76	78	54.1
4	GC2030	75	75	75	75	49.1

Tableau III.10 Mesures de la dureté de l'acier C45 trempé et revenu, après usinage à Vc=80m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 mm

N° palier	Matériau à outils	Dureté Rockwell (HRA)				Dureté Rockwell (HRC)
		M_1	M_2	M_3	M_{moy}	
1	H13A	79	75	76	76.66	51.7
2	GC1030	75	75	74	74.66	47.7
3	GC4230	76	75	74	75	48.4
4	GC2030	73	77	75	75	48.4

Tableau III.11 Mesures de la dureté de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, après usinage à Vc=80m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 mm

N° palier	Matériau à outils	Dureté Rockwell (HRA)				Dureté Rockwell (HRC)
		M_1	M_2	M_3	M_{moy}	
1	H13A	81	80	79	80	57.8
2	GC1030	81	81	82	81.33	60.1
3	GC4230	77	79	78	78	54.1
4	GC2030	79	80	80	79.66	56.8

Tableau III.12 Résultats de la dureté de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, après usinage à Vc=120m/min, fz = 0,018mm/dt, ap = 0,5 mm

N° palier	Matériau à outils	Dureté Rockwell (HRA)				Dureté Rockwell (HRC)
		M_1	M_2	M_3	M_{moy}	
1	H13A	81	80	79	79.66	56.8
2	GC1030	80	78	79	79	56.3
3	GC4230	80	81	82	81	58.7
4	GC2030	78	80	81	79.66	56.8

III.3.2 Analyse des résultats du traitement thermique et de la dureté

Afin de mieux caractériser et voir l'effet du matériau de coupe sur l'état micro-géométrique des pièces usinées (C45 et 100Cr6), on a procédé à un traitement thermique (voir tableaux II.3.a et b).On a constaté les faits suivants (figures III.25 à III.27) :

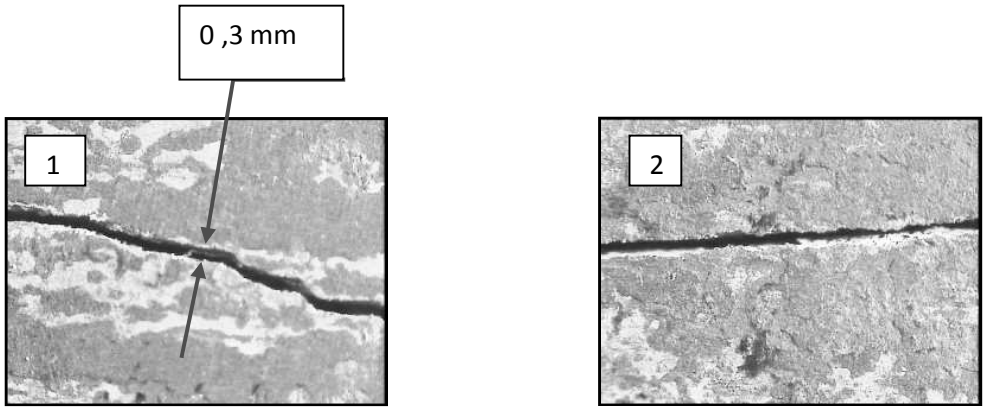


Figure III.25. Apparition d'une fissure sur l'éprouvette en acier 100C6 (avant l'usinage).

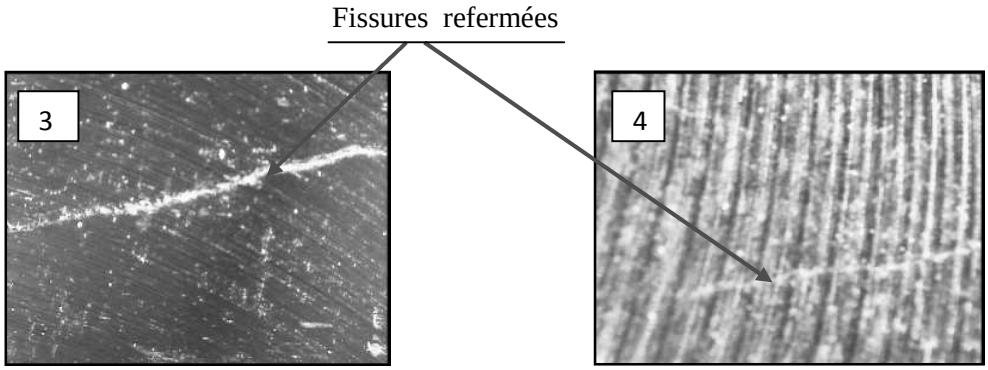


Figure III.26. Aspect de la fissure sur l'éprouvette du 100C6 après l'usinage avec la plaquette 1030

3 Régime Vc=120m/mn ,fz=0.018mm/dt ,ap=0.5mm

4 Régime Vc=80m/mn ,fz=0.018mm/dt ,ap=0.5mm

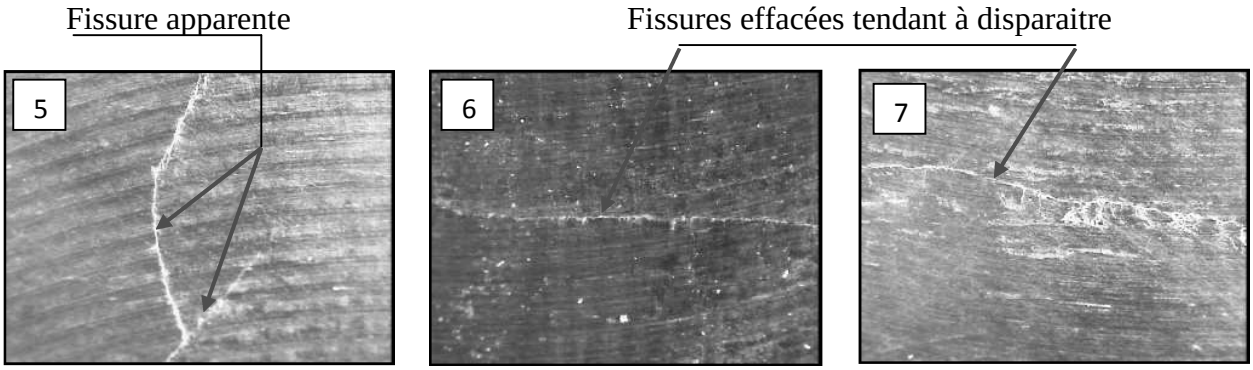


Figure III.27. Evolution de la fissure sur l'éprouvette (en acier 100C6) après usinage avec des matériaux de coupe différents

5 Régime Vc=80m/mn, fz=0.018mm/dt, ap=0.5mm Matériau à outil 4230
6 Régime Vc=120m/mn, fz=0.018mm/dt, ap=0.5mm Matériau à outil H13A
7 Régime Vc=80m/mn, fz=0.018mm/dt, ap=0.5mm Matériau à outil H13A

Analyse :

Après une trempe à l'eau de l'éprouvette en Acier 100Cr6 dans les conditions opératoires suivantes : t° trempe 850° maintient durant une heure et refroidissement rapide à l'eau froide à 18°.Cette opération est suivie d'un revenu aux conditions suivantes : t° de revenu 200° maintient durant 35 minutes et puis refroidissement à l'air libre. Après le refroidissement une fissure est apparue sur toute la longueur de l'éprouvette comme le montrent les photos 1 et 3, respectivement figures III.25 et III.26.

Pour la majorité des usinages, la fissure semble se fermer. Sur l'éprouvette brute la largeur moyenne de la fissure est égale 0,3mm sa propagation étant inconnue. Sur les photos des éprouvettes d'acier 100Cr6, la fissure semble se souder (figure III.25).

Dans la littérature les études ont montré que c'est au cours des opérations d'usinage que les fissures se manifestent. Cela s'explique par le fait que le matériau subit au cours de l'usinage des sollicitations qui favorisent la formation de fissures particulièrement lorsque le matériau a subi des traitements thermiques.

Les photos 5,6 et 7 montrent les fissures après l'usinage avec les plaquettes GC4230 et H13A (figure III.28). Le régime de coupe de fraisage adopté favorise la fermeture de la fissure. En effet si nous comparons les photos 6 et 7 pour l'usinage avec le même matériau H13A mais avec des vitesses différentes la morphologie de la fissure a changé. Nous remarquons l'effacement de la fissure sur la photo 7 comparativement avec la photo 5.

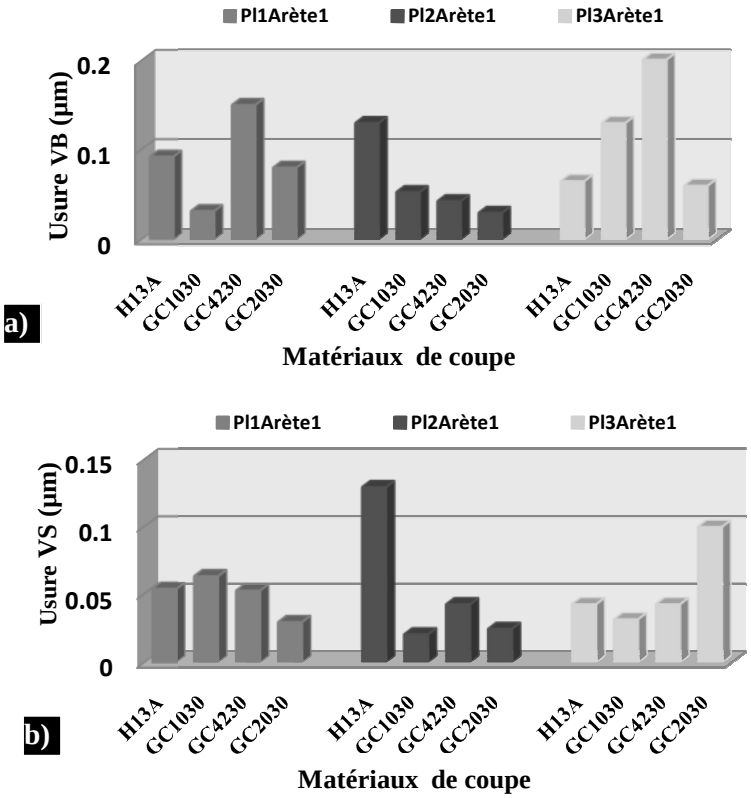
Sous l'impact (mécanique et thermique), les couches superficielles de la pièce se déforment plastiquement sur une faible épaisseur ce qui implique plusieurs effets dans la couche perturbée: un comportement très fragile (ductilité réduite), un risque de fissuration de l'extrême surface, l'apparition de contraintes résiduelles **[106]**.

Pour éviter la formation de fissures sur les éprouvettes en acier 100Cr6, il est fortement recommandé de pratiquer la trempe à basse température avec un refroidissement à l'huile suivi d'un revenu aussi à basse température 200° environ avec une durée de maintient de 30 minutes et ensuite un refroidissement à l'huile chauffé à 80° environ.

III.3.3 Résultats de l'usure

Afin de mieux voir l'impact du matériau de l'outil de coupe sur les surfaces usinées, on à procédé à un changement du type des plaquettes utilisées dans la série 1.Dans cette série (2), on a pris comme outil : les H13A, les GC1030, les GC4230 et les GC2030 (leurs compositions sont présentées dans le tableau II.2).On prend trois mesures pour chaque arête et après chaque passe pour les différents paliers. Les résultats illustrées si dessous par les histogrammes ont été faits sur le microscope optique (Motic Images) c'est-à-dire différemment des mesures de la première série.

III.3.3.1 Résultats d'usure par plaquette et par arête



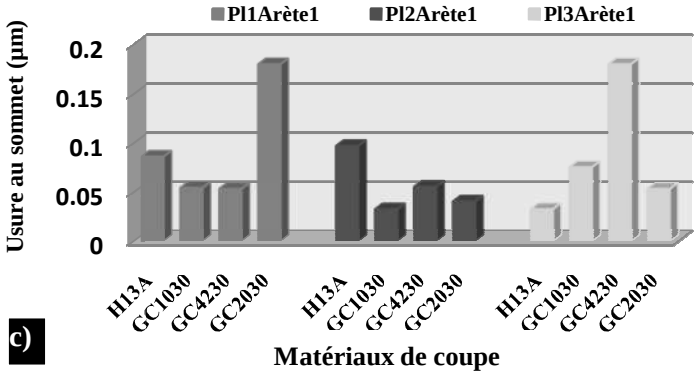


Figure .III.28. Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier C45 après trempe et sans revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min.

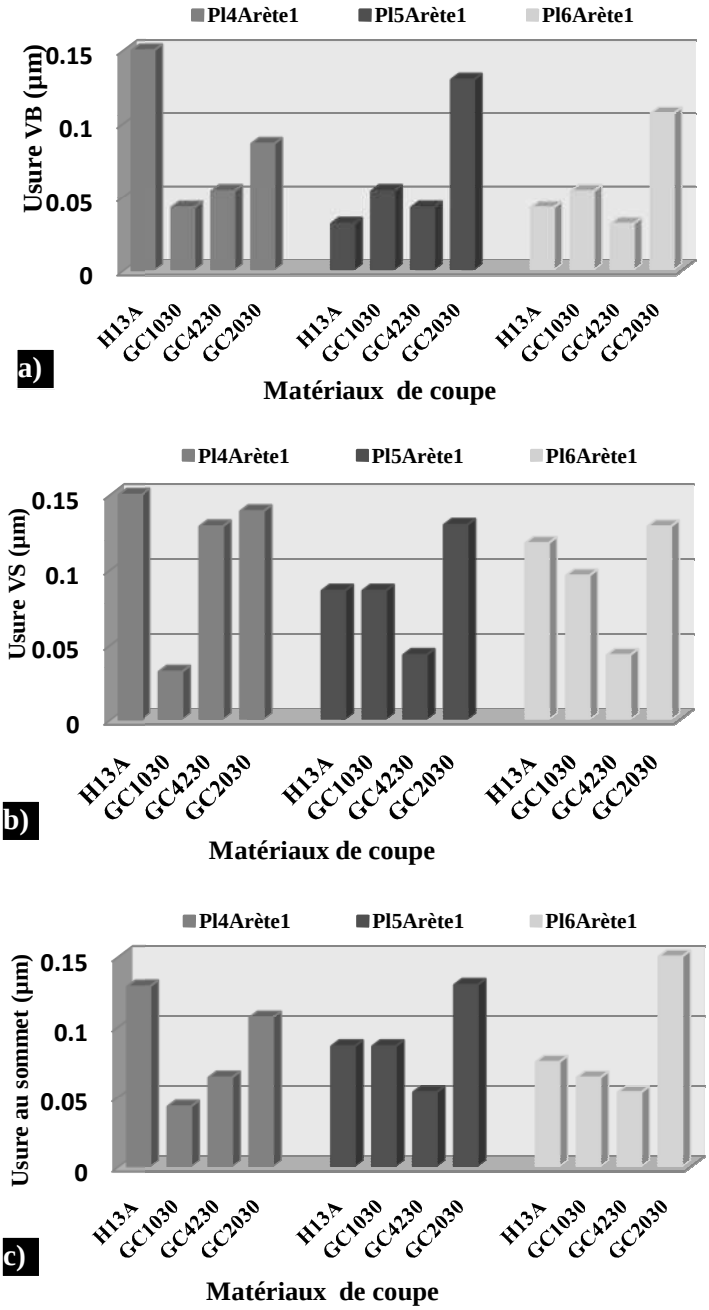


Figure .III.29. Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=80m/min

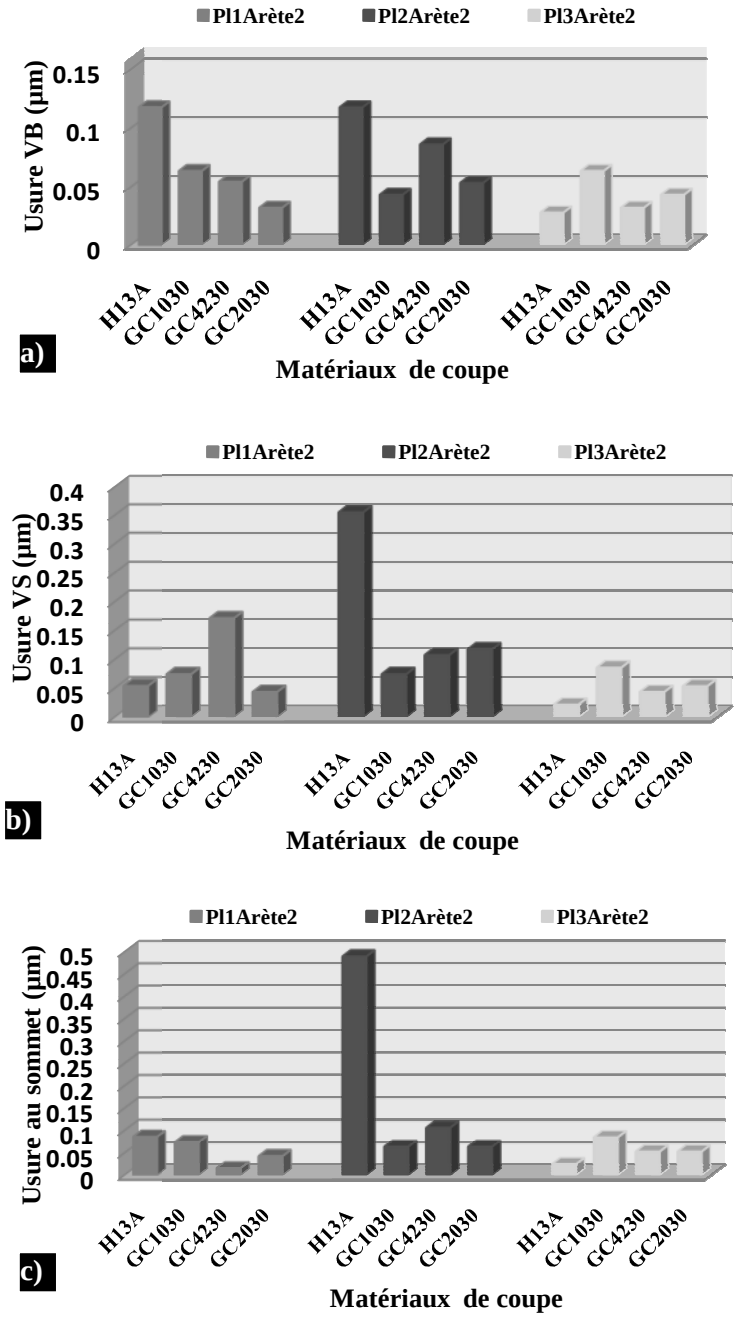
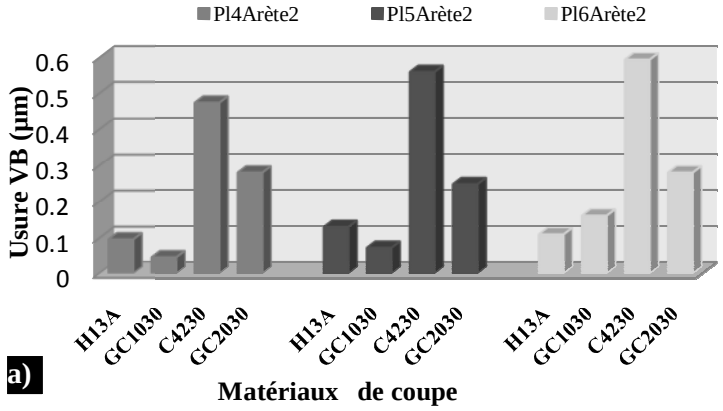


Figure .III.30. Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min.



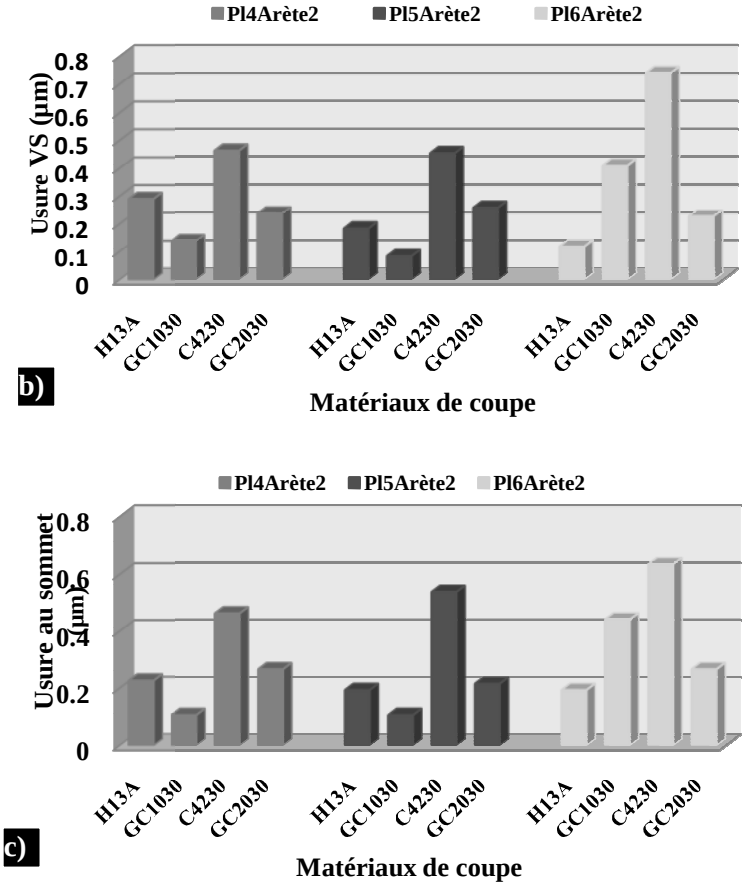
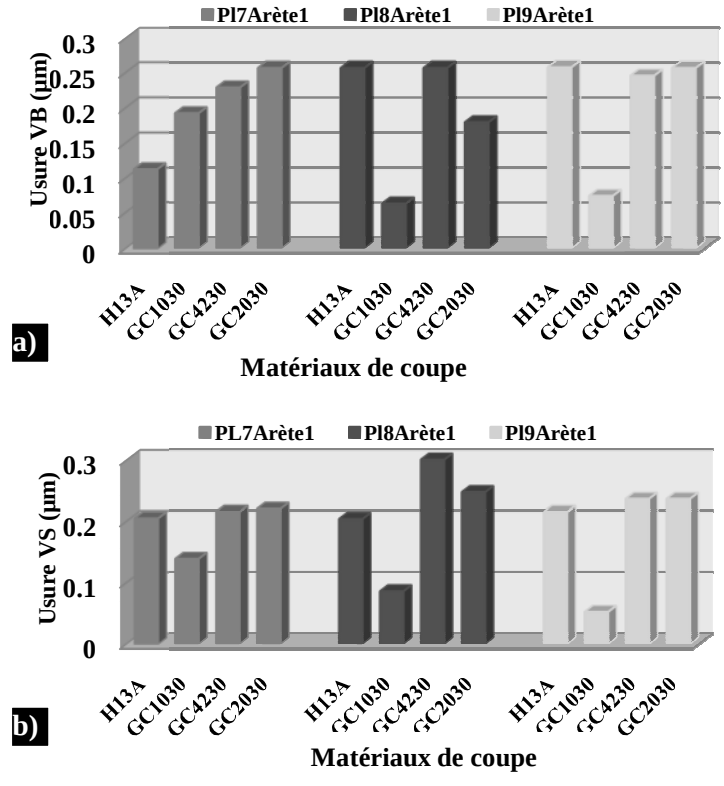


Figure .III.31. Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=80m/min.



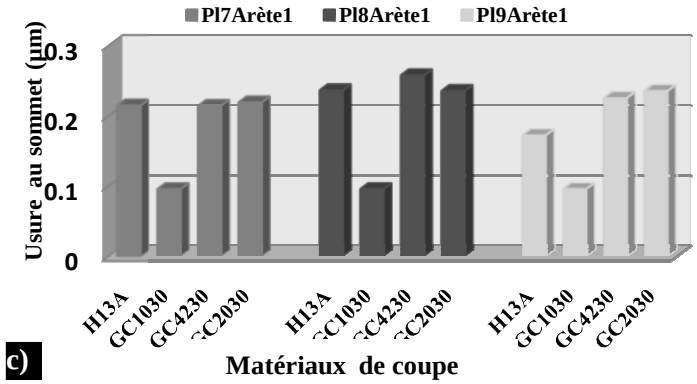


Figure .III.32. Evolution de l'usure **a)**VB,**b)** VS et **c)** au sommet lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min.

III.3.3.2 Résultats d'usure en fonction du matériau usiné

Dans les figures III.33 à III.35, on présente l'impact du matériau usiné sur l'usure des plaquettes testées.

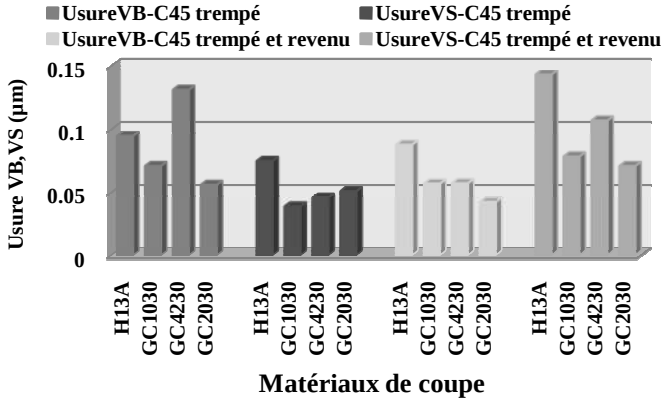


Figure .III.33. Evolution de l'usure VB et VS los de l'usinage de l'acier C45 trempé et C45 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min

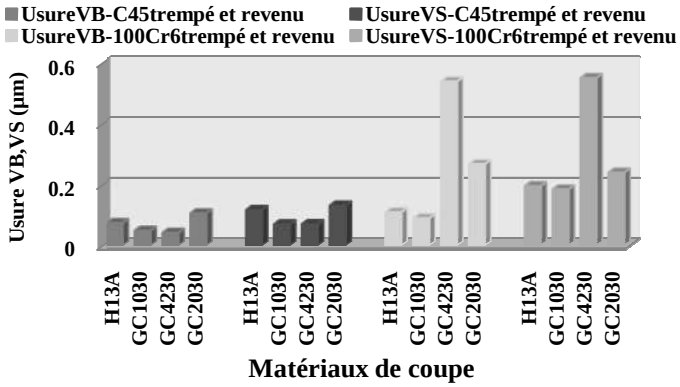


Figure .III.34. Evolution de l'usure VB et VS lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 trempés et revenus en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=80m/min

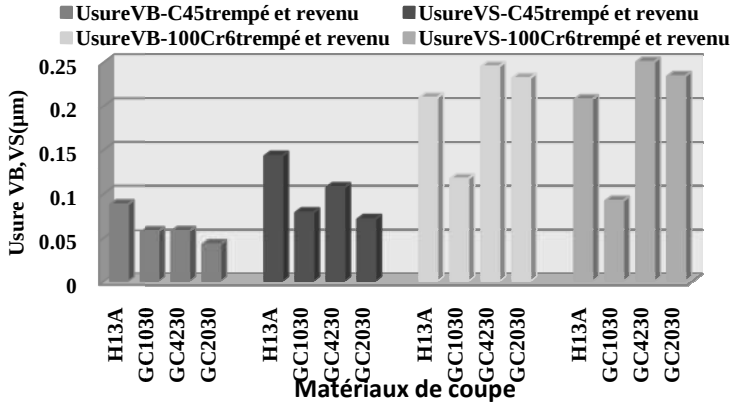


Figure .III.35. Evolution de l'usure VB et VS lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 trempés et revenus en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min

III.3.3.3 Résultats d'usure pour les différents matériaux traités

Pour mieux analyser l'usure sur les plaquettes de coupe et bien préciser l'outil qui travaille mieux et sa meilleure adaptation pour chacun des matériaux, on a construit les histogrammes des figures suivantes.

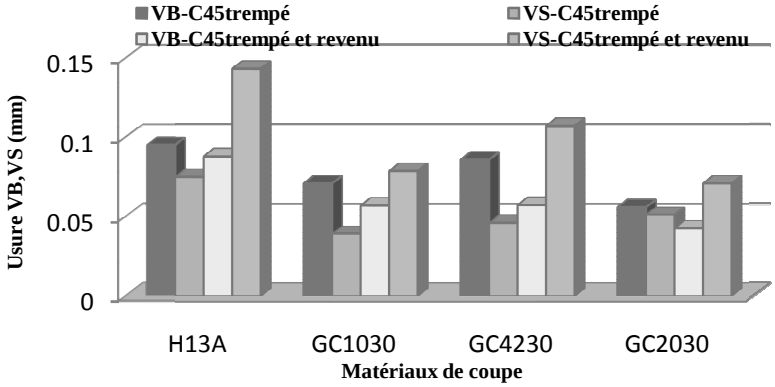


Figure .III.36. Evolution de l'usure VB et VS lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et C45 trempé et revenu en fonction des différents matériaux de coupe à Vc=120m/min

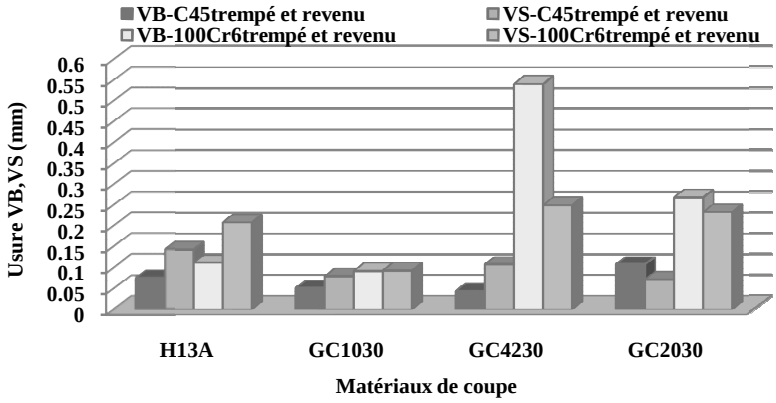


Figure .III.37. Evolution de l'usure VB et VS des différents matériaux de coupe testés lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 trempés et revenus à Vc=80m/min

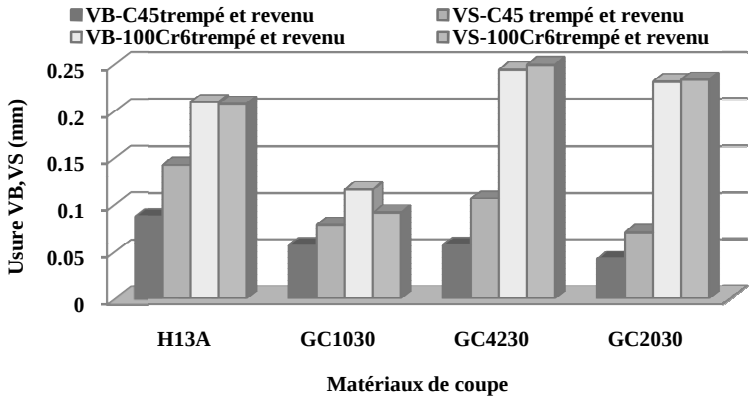


Figure .III.38. Evolution de l'usure VB et VS des différents matériaux de coupe testés lors de l'usinage des aciers C45 et 100Cr6 trempés et revenus à Vc=120m/min

III.3.4 Analyse des résultats de l'usure

Les essais d'usinage sont réalisés conformément au plan des expériences préalablement élaboré. La valeur de l'usure retenue est la moyenne de l'usure en dépouille des trois dents de la fraise. Les figures III.28 à III.32 illustrent les résultats du suivi de l'évolution de l'usure en dépouille principale (VB) et auxiliaire (VS) en fonction des différents matériaux de coupe. Malgré que les plaquettes de coupe ont été prises du même lot, on a constaté que leurs arêtes n'ont pas données les même résultats .L'analyse de ces figures montre que l'usure VB des 1ères et 3èmes arêtes des plaquettes GC4230 (figure III.28.a) évoluent rapidement vers des valeurs dépassant l'usure admissible, alors que la 2ème son usure en dépouille principale n'a pas atteint 0.1mm. L'usure VB de la 1ère et 2èmes arêtes des plaquettes H13A tendent à s'accélérer par rapport à la 3ème. Par contre pour les plaquettes 1030 et 2030, l'usure est plus lente (figure III.28.a).

L'analyse de la figure III.28.b montre que l'usure VS des 2èmes et 3èmes arêtes respectivement des plaquettes H13A et GC2030 évoluent rapidement par rapport à leurs 1ères arêtes ainsi qu'aux arêtes des plaquettes GC1030 et GC4230 qui n'ont pas atteint 0.1mm.

L'analyse de la figure III.29 montre que l'usure VB et l'usure VS des 1ères ,2èmes et 3èmes arêtes respectivement des plaquettes H13A et GC2030 évoluent de la même manière tandis que pour les plaquettes GC4230 et GC1030, l'usure VS est plus rapide que l'usure VB. Les trois arêtes tranchantes de la plaquette GC4230 ont subi une usure relativement inférieure à celles des dents des autres nuances (figure III.29.c). Ceci est valable pour l'usure VS de la 2ème et 3ème arête (figure III.29.b).Quant à l'usure VB, (figure.III.29.a) les dents de cette fraise se caractérise par une usure comparativement plus lente. Ce qui peut conduire à la conclusion que la GC4230 a une bonne résistance à l'usure par rapport aux autres plaquettes des matériaux testés.

L'analyse de la figure III.30 (a, b et c) indique que les usures VB ,VS et au sommet de la 2èmme arête de la plaquette H13A évoluent très rapidement dépassant l'usure admissible, contrairement à

celles de ses autres arêtes ($1^{ère}$ et $3^{ème}$) qui n'ont pas atteint 0.13mm ainsi que l'usure des arêtes des autres plaquettes GC1030 ,GC4230 et GC2030 qui est très lente. A la vitesse 80m/mn et pendant l'usinage de l'acier 100Cr6 traité, l'usure VB, VS et au sommet des arêtes de la GC4230 évoluent rapidement, dépassant ainsi l'usure admissible pour un temps de coupe de 1,23min alors que les plaquettes H13A, GC1030 et GC2030 ont une meilleure résistance à l'usure (figure III.31) .A la vitesse 120m/mn et pendant l'usinage de ce même matériau , on a constaté que seules les arêtes des plaquettes GC1030 se caractérisent par une usure relativement plus lente. Pour les plaquettes H13A, GC4230 et GC2030, les usures de leurs arêtes tendent vers l'usure admissible très rapidement (figure III.32). Les plaquettes 1030 résistent mieux à l'usure, cela est dû à la protection que lui confère le revêtement TiN(e=5µ). Lorsque le revêtement disparaît sous l'effet du frottement et l'adhésion du copeau, le substrat à micro grains présente une excellente résistance à l'usure. L'écaillage qui se produit sur la face d'attaque de la plaquette 1030 est bien géré, il y a une résistance à la propagation de la zone écaillée, c'est l'usure en dépouille qui atteint sa valeur admissible et oblige l'arrêt de l'essai.

L'analyse des valeurs de l'usure en fonction des matériaux de l'outil de la figure III.33 montre que les plaquettes H13A et GC4230 s'usent plus rapidement et perdent leurs performances par rapport aux plaquettes GC1030 et GC2030 qui se distinguent par une résistance à l'usure plus élevées. L'usure VB des plaquettes ayant usiné les pièces C45 trempé est plus prononcée que celle lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et revenu. Par contre il s'est avéré que l'usure VS est plus marquée lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et revenu par rapport à celle du C45 trempé.

La figure III.34 montre que l'effet du matériau usiné sur l'usure est très net. En effet, l'usure occasionnée par l'acier 100Cr6 trempé et revenu est nettement supérieure à celle de l'acier C45 et ceci pour tous les matériaux étudiés. Il est de même pour l'usure VS. Les plaquettes H13A et GC1030 ont une résistance meilleure soit pour l'usinage du C45 traité ou le 100Cr6 traité (leurs usures VB respectives sont 0.075mm et 0.05mm pour le C45 et 0.118mm et 0.071mm pour le 100Cr6).

A la vitesse 120m/min, l'analyse de la figure III.35 nous permet de constater que les plaquettes utilisées pour ces essais s'usent rapidement en usinant l'acier 100Cr6 traité comparativement avec celles qui ont été utilisées pour l'usinage de l'acier C45 traité et cela pour les deux types d'usure (VB et VS).Ceci s'explique par le caractère abrasif de l'acier 100Cr6 trempé suite à l'élévation de sa dureté après trempe et ses hautes caractéristiques mécaniques.

L'analyse des résultats illustrés sur la figure III.36, montre que l'usure VB de tous les matériaux à outil testés lors de l'usinage de l'acier C45 trempé est plus prononcée par rapport à celle générée lors de l'usinage du même acier trempé et revenu. Ceci est dû à l'amélioration des

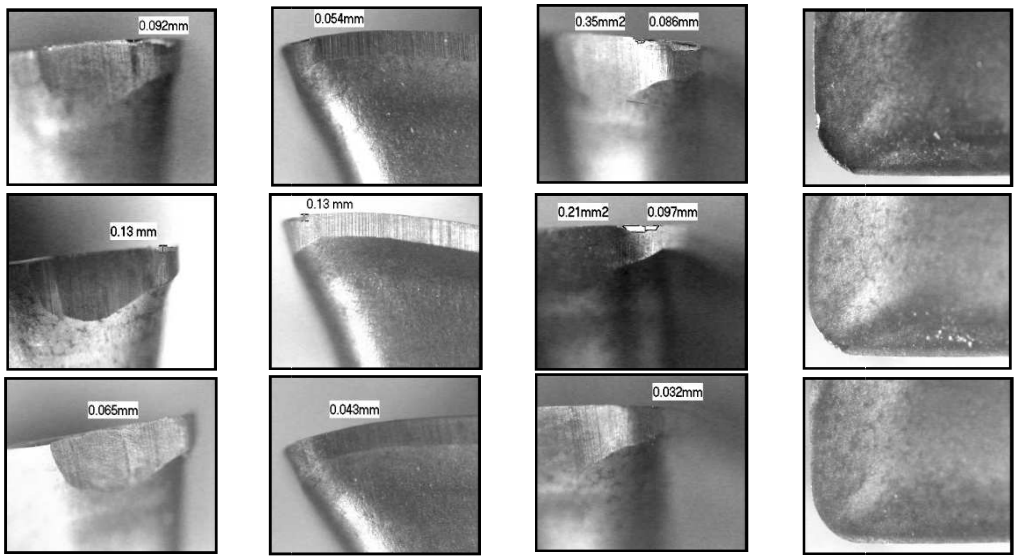
caractéristiques mécaniques et la réduction de la dureté suite au traitement de revenu, qui atténue les contraintes résiduelles laissées par la trempe. Par contre, pour l'usure en dépouille auxiliaire VS nous avons obtenu l'effet inverse. Est dû probablement aux frottements plus importants suite aux déformations de la pièce usinée relativement plus tendre lors de l'usinage de l'acier trempé et revenu.

L'évolution très rapide de l'usure VB des plaquettes GC4230 pendant l'usinage de l'acier 100Cr6 traité (VB=0.541mm pour un temps de coupe t=1.23min). La figure III.37 indique que c'est l'usure en dépouille principale qui augmente rapidement et cause l'arrêt de l'essai. Les plaquettes GC1030 ont montré de meilleurs résultats en terme de résistance à l'usure, suivies par H13A (respectivement leurs valeur de VB sont 0.091mm et 0.111mm pour un temps t=1.23min).Par conséquent, ces plaquettes de coupe sont toutes très adéquates pour l'usinage de l'acier C45 traité à une vitesse de 80m/min.

A la vitesse 120m/mn, en comparant les résultats illustrés sur la figure III.38 on tire les constatations suivantes : l'usure (VB ou VS) des plaquettes H13A, GC4230 et GC2030 évolue rapidement pendant l'usinage de l'acier 100Cr6, contrairement aux plaquettes GC1030 qui ont toujours une résistance meilleure (son VB n'a pas atteint 0.15mm).Pour l'usinage de l'acier C45 traité ,on constate qu'elles peuvent être toutes utilisées pour ce régime et avec ce matériau sans crainte pour la production.

III.3.5 Analyse de la morphologie de l'usure

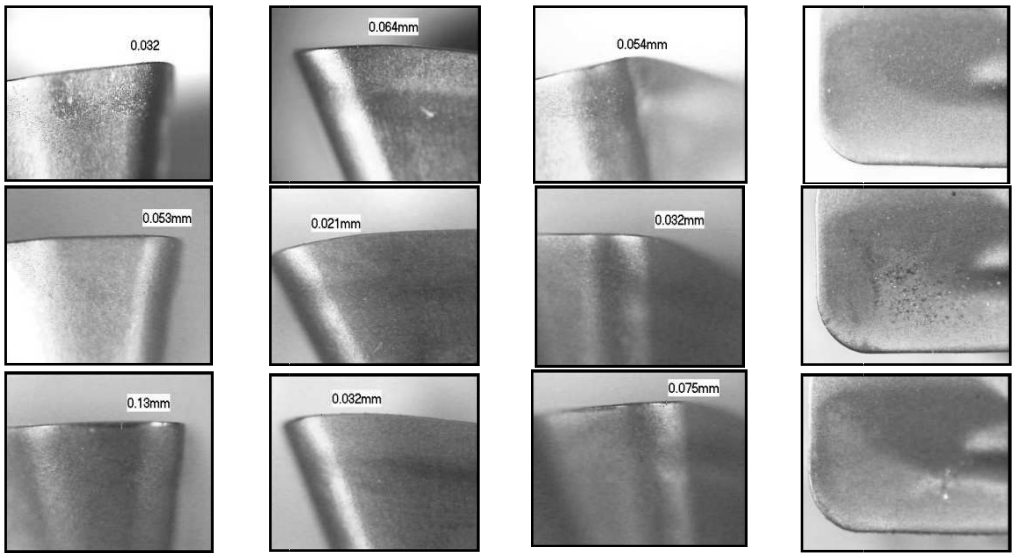
L'analyse des surfaces d'attaque et de dépouille des différentes plaquettes montre qu'après la disparition de la couche du revêtement (couche mince de 6 à7 μm), il n'y a pas d'usure importante en profondeur sur la face en dépouille et l'absence de cratère en face d'attaque. Cela s'explique par la grande cohésion du substrat en carbure micro grains. L'usure en entaille est présente sur toutes les plaquettes testées. Pour la nuance GC1030, l'usure en dépouille évolue très lentement. Pour la nuance H13A, l'usure en dépouille évolue très lentement et semble être freinée. L'arête de coupe conserve bien son acquitté mais écaillage s'est produit sur la face d'attaque (figures III.39 et III.40).



-a- -b- -c- -d-

Figure. III.39. Micrographie de l'usure des plaquettes H13A après l'usinage de l'acier C45trempé à Vc= 120m/mn, fz=0.018 mm/d, ap=0.5mm

a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB,
c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque



-a- -b- -c- -d-

Figure. III.40. Micrographie de l'usure des plaquettes GC1030 après l'usinage de l'acier C45trempé à Vc= 120m/mn, fz=0.018 mm/d, ap=0.5mm

a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB,
c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

L'examen de la morphologie de l'usure des plaquettes testées au microscope optique à montré que pour les plaquettes GC4230 et GC2030, l'usure sur la surface en dépouille évolue progressivement avec un effet d'entaille suivi d'un écaillage prononcé sur la face d'attaque. L'arête tranchante perd son acquitté. Au fur et à mesure, le revêtement se détache et l'usure s'imprime dans le substrat (figure III.41 et III.42).

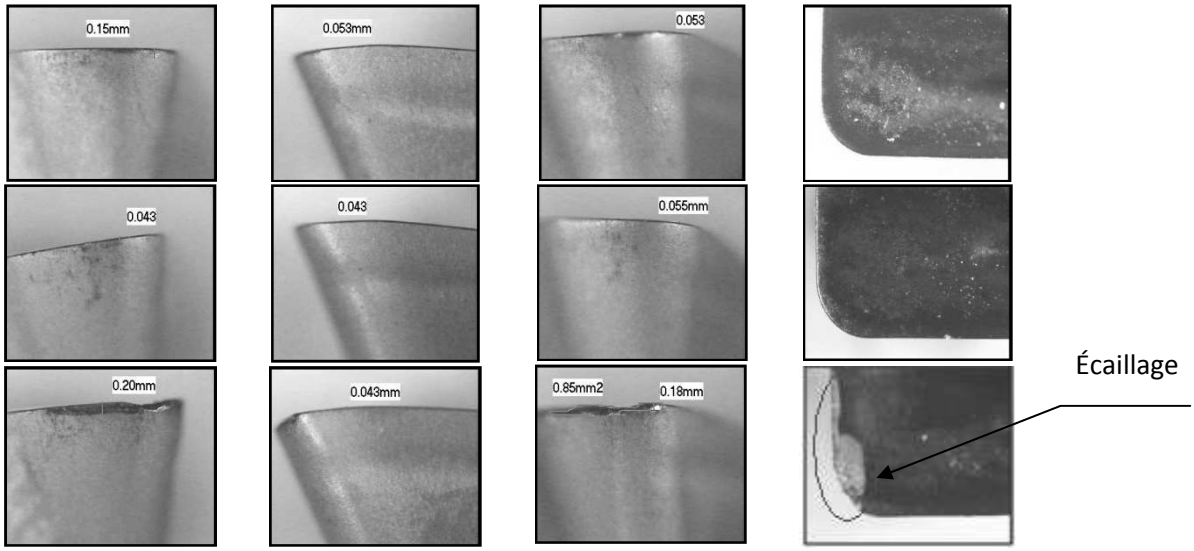


Figure. III.41. Micrographie de l'usure des plaquettes GC4230 après l'usinage de l'acier C45trempé à Vc= 120m/mn, fz=0.018 mm/d, ap=0.5mm
a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB,
c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

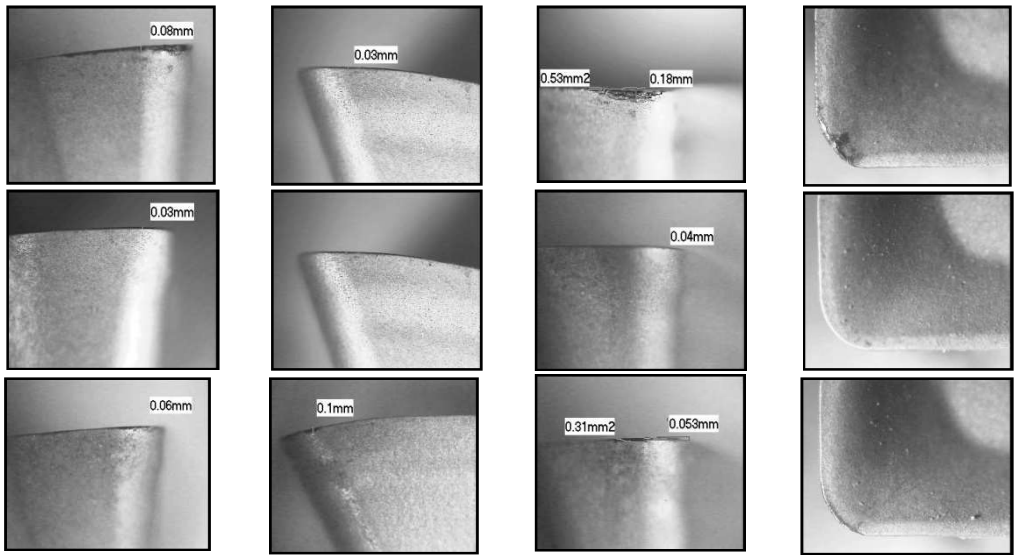


Figure. III.42. Micrographie de l'usure des plaquettes GC2030 après l'usinage de l'acier C45trempé à Vc= 120m/mn, fz=0.018 mm/d, ap=0.5mm
a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB,
c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

Pour la plaquette H13A, l'examen a montré que l'usure sur la face en dépouille évolue lentement. L'écaillage sur la face de coupe se produit comme pour les autres conditions, un début d'entaille commence à prendre naissance au niveau de la zone de profondeur de passe. Par contre, à la vitesse 120m/mn deux types d'usure se manifestent causant l'éffondrement de l'arête tranchante (cote face de dépouille) avec la perte de matière (usure abrasive) (figure III.43).

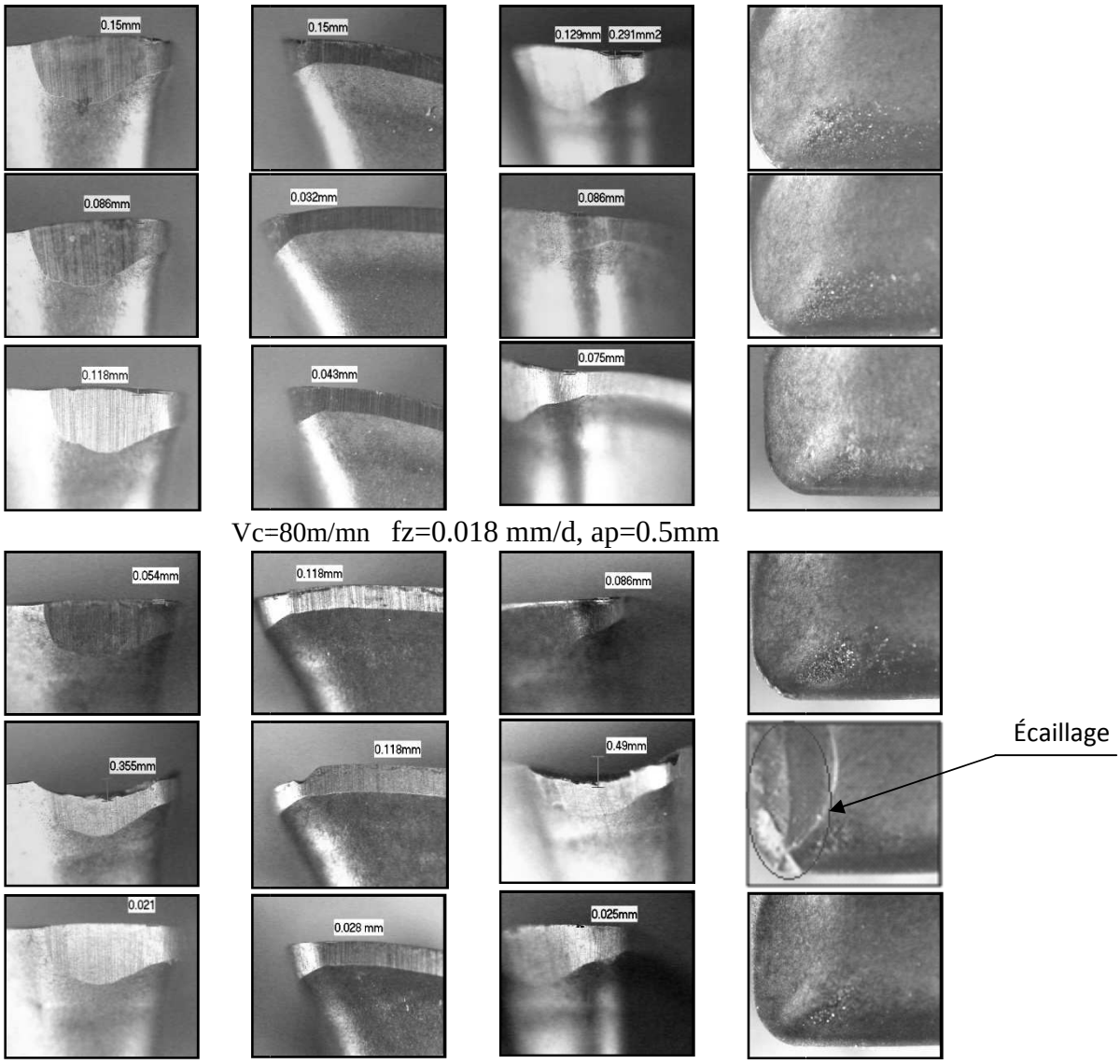


Figure. III.43. Micrographie de l'usure des plaquettes H13A après l'usinage de l'acier C45trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

L'examen des plaquettes au microscope optique révèle qu'une usure légère s'est manifesté sur la surface en dépouille des plaquettes GC1030 et qui n'a pas beaucoup progressée montrant ainsi qu'elles résistent mieux que les autres plaquettes pendant l'usinage de l'acier C45 traité et pour les deux vitesses utilisées pour cet essai (figure III.44).

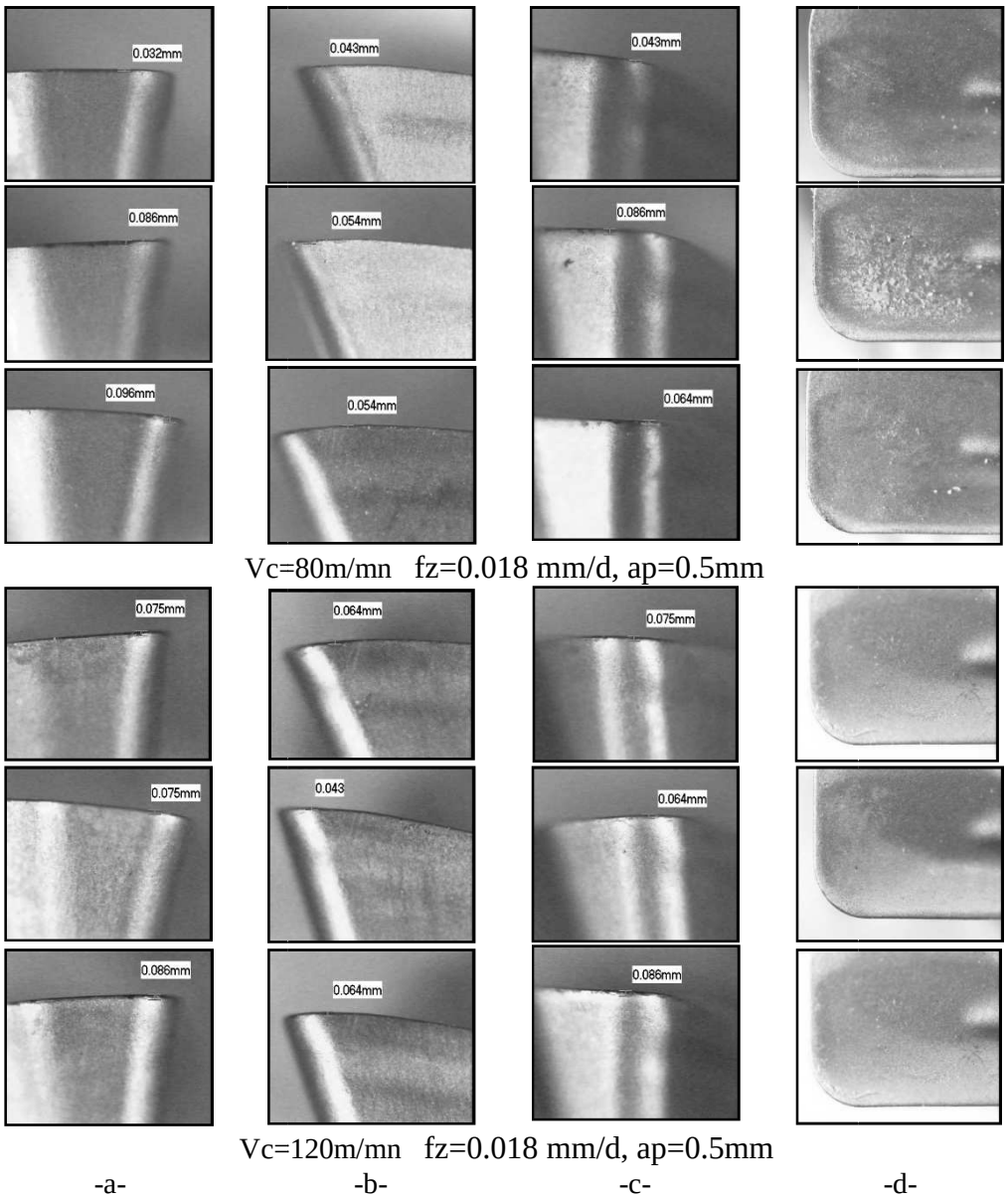


Figure. III.44. Micrographie de l'usure des plaquettes GC1030 après l'usinage de l'acier C45trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

A la vitesse 80 m/min, l'usinage au début est caractérisé par une stabilité, pas d'écaillage des plaquettes GC4230 sur la surface en dépouille et en cratère, par la suite apparait une légère ébréchure sur la surface en dépouille.

A la vitesse 120 m/mn, l'usure en dépouille se manifeste par l'apparition d'une bande régulière (figure III.45). La valeur de VS augmente ce qui conduit à l'élargissement des dimensions du cratère. Elle devient irrégulière avec l'apparition d'un petit effondrement sur la surface d'attaque.

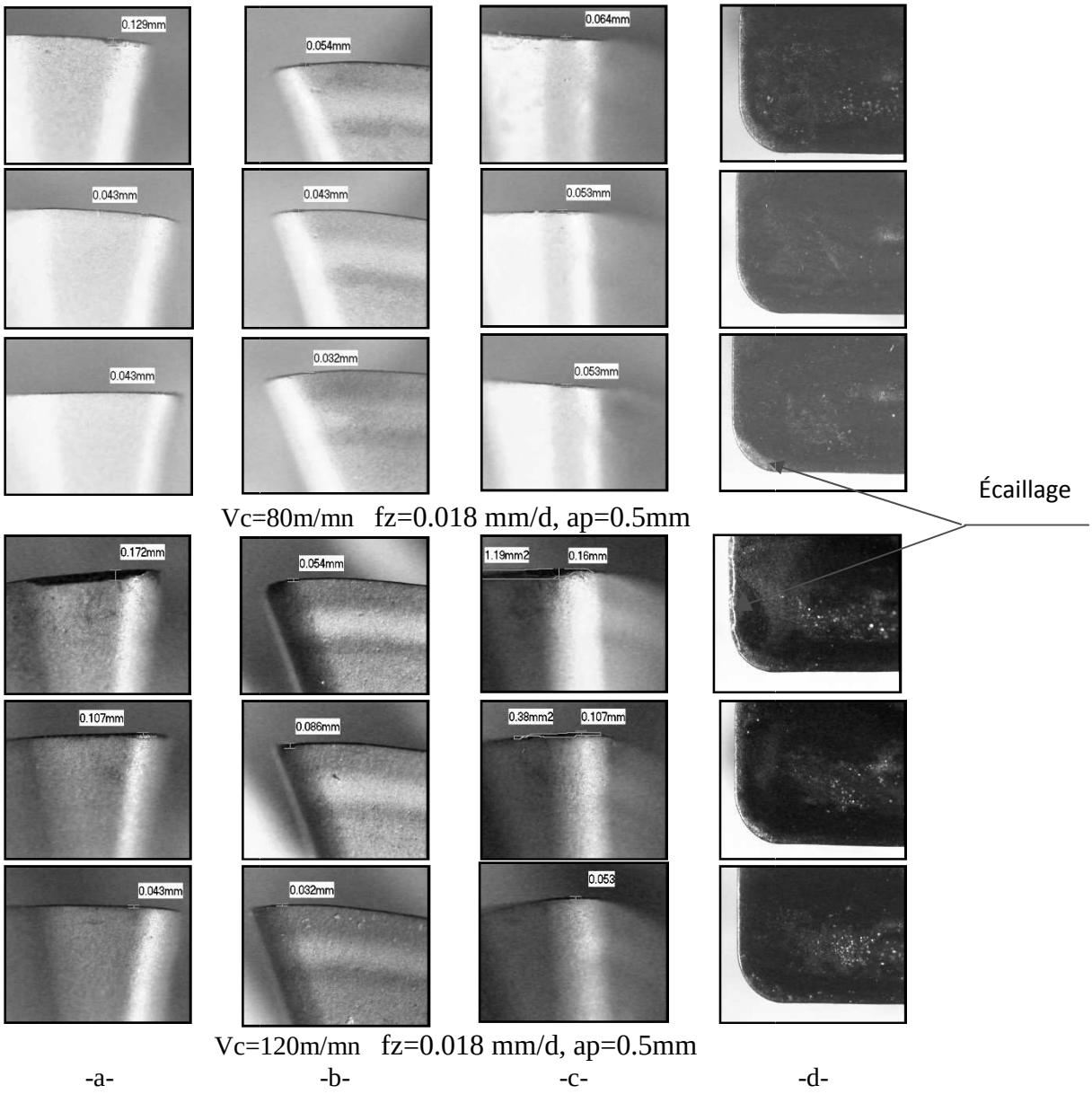


Figure. III.45. Micrographie de l'usure des plaquettes GC4230 après l'usinage de l'acier C45trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c)Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

L'analyse morphologique des plaquettes GC2030 met en exergue qu'à la vitesse 80m/mn, les endommagements (écaillages) sont essentiellement localisés sur la pointe d'outil (Figure III.46).Ceci est ainsi car la profondeur de passe est faible.

A la vitesse 120m/mn, l'usure se manifeste sur la face en dépouille par une bande non uniforme et d'une profondeur variable et arbitraire provoquant le détachement de petites particules du matériau de coupe sous forme d'entailles au niveau de la pointe de l'outil.

On peut constater que les plaquettes de coupe GC2030 peuvent donner un bon résultat en usinant l'acier C45 traité pour les deux vitesses 80 et 120 m/mn.

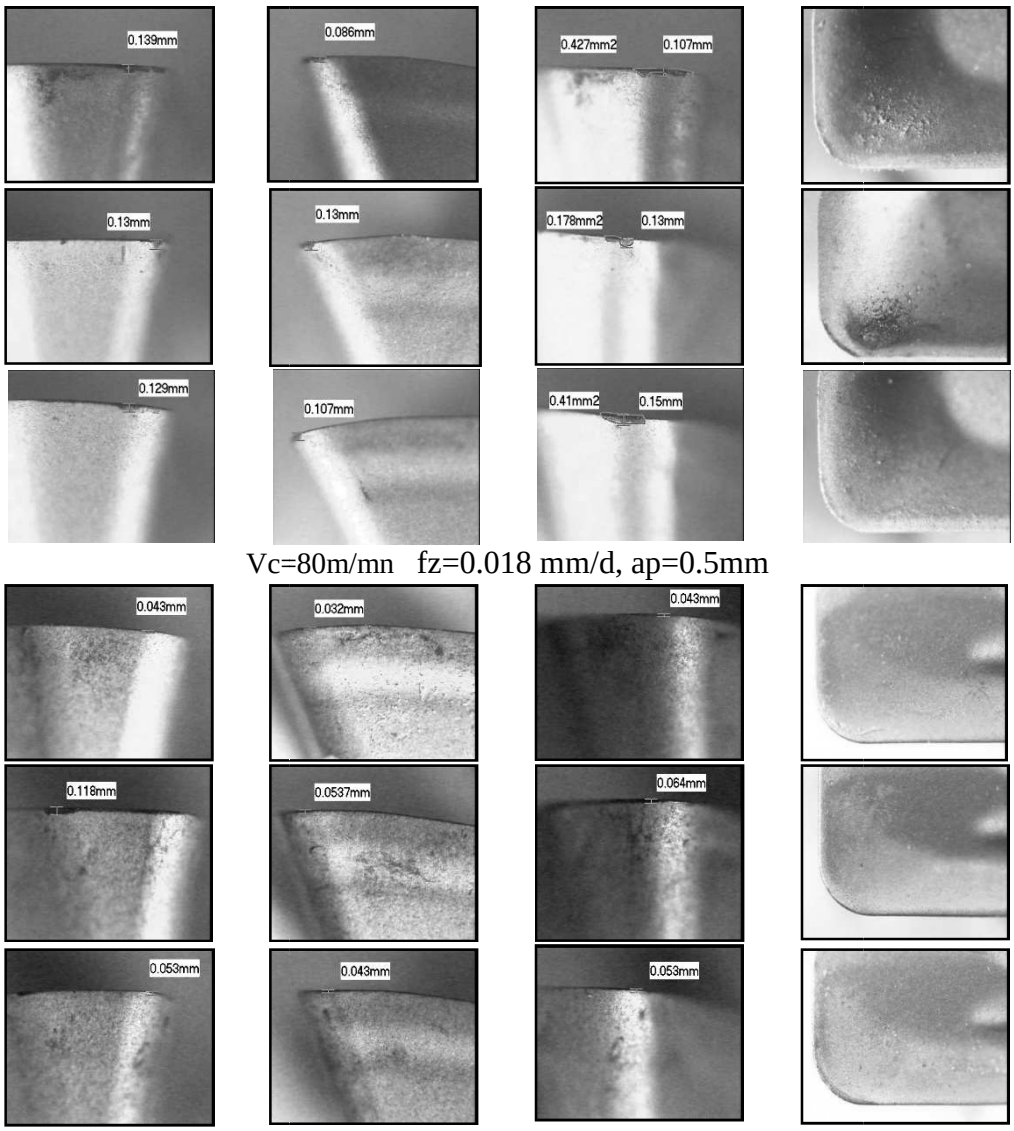


Figure. III.46. Micrographie de l'usure des plaquettes GC2030 après l'usinage de l'acier C45trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c)Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

L'analyse morphologique des plaquettes H13A après l'usinage de l'acier 100Cr6, à la vitesse 80m/mn, montre un écaillage prononcé sur la face en dépouille de la plaquette. Cette zone écaillée continue à s'élargir jusqu'à l'effondrement de la pointe de l'outil. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe (120m/mn), l'apparition d'une usure en dépouille provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe. Elle influe sur l'état de surface de la pièce usinée et sur la précision dimensionnelle car elle modifie la position de l'arête de coupe (figure III.47).

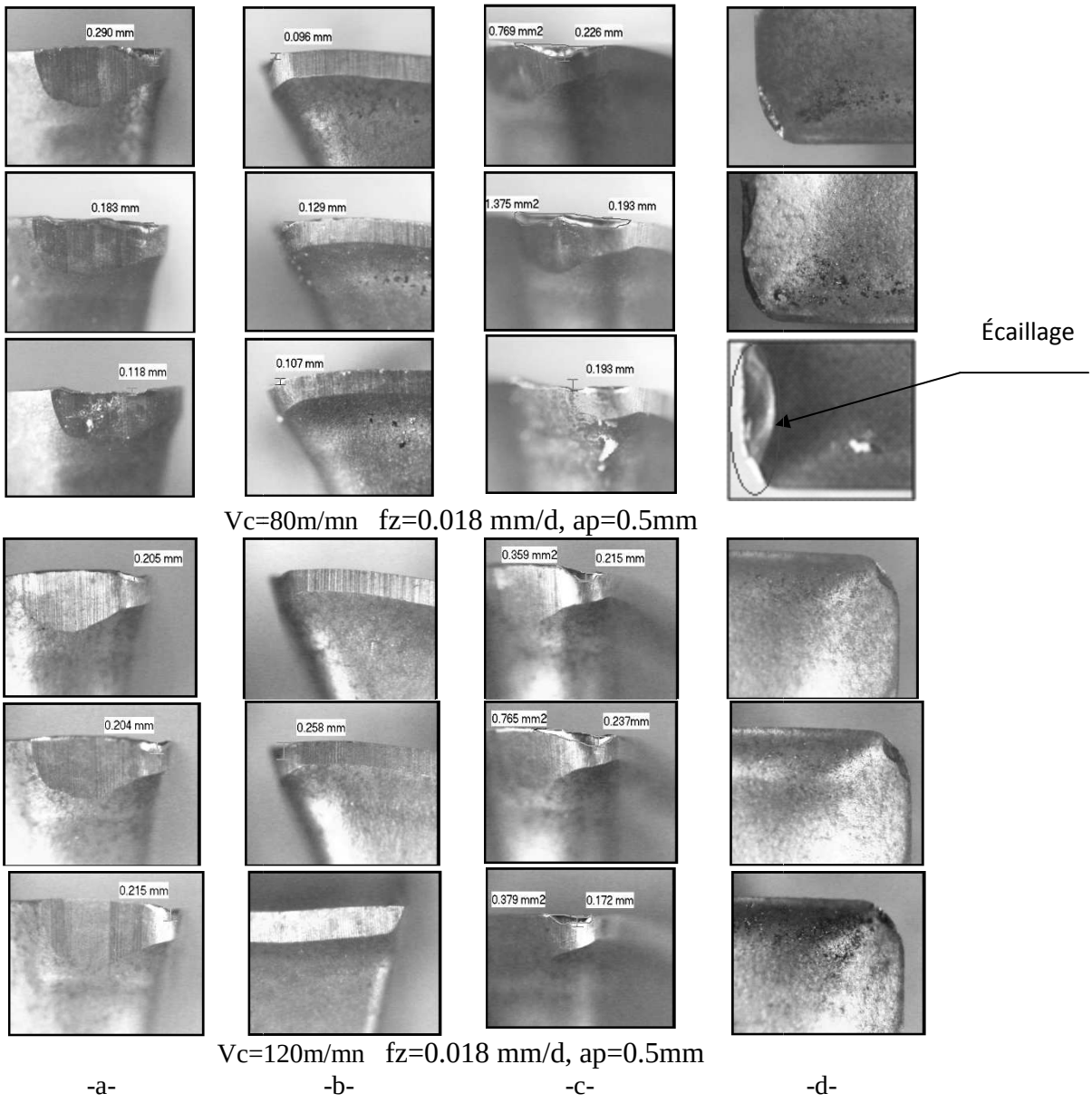


Figure. III.47. Micrographie de l'usure des plaquettes H13A après l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

A la vitesse 80m/mn, l'examen des plaquettes au microscope optique révèle que sur la surface d'attaque de la plaquette GC1030 au niveau de l'arête tranchante un écaillage accompagné d'un détachement du substrat sur la zone d'entaille de profondeur de passe. L'usure en dépouille auxiliaire est assez prononcée (figure III.48). Par contre à la vitesse 120m/mn, les plaquettes subissent une légère usure caractérisée par un faible écaillage confirmant la rigidité et la résistance de ces plaquettes pour l'usinage d'un acier aussi dur que l'acier 100Cr6 traité par rapport aux H13A, GC2030 et GC4230 testées dans le même essai **[107].**

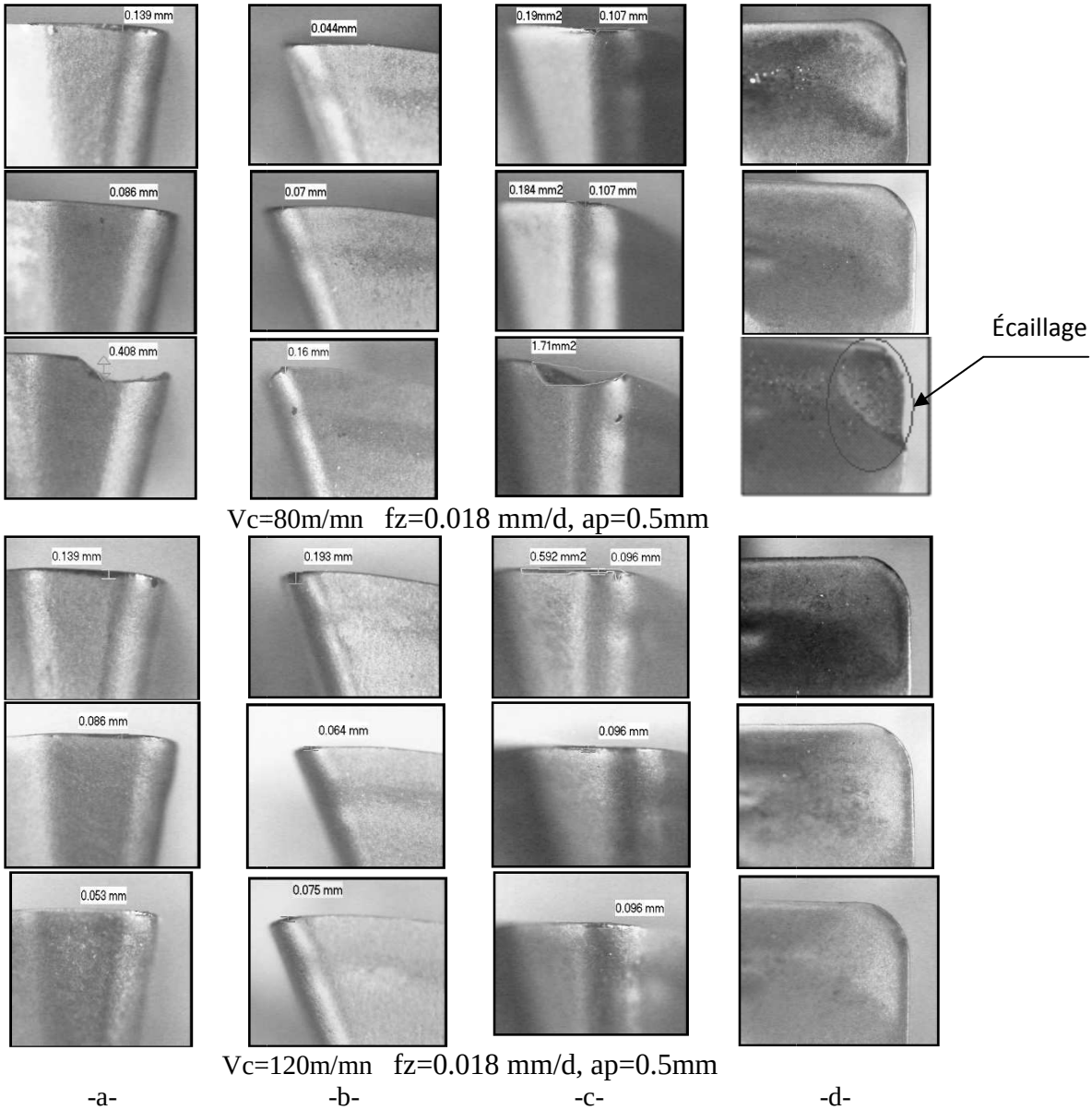


Figure. III.48. Micrographie de l'usure des plaquettes GC1030 après l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

La figure III.49 montre que l'usure des plaquettes GC4230 à la vitesse 80 m/mn se manifeste sur la face en dépouille par une bande non uniforme et d'une profondeur variable et arbitraire. L'effondrement remarqué de la pointe de l'outil a été causé par la progression très rapide de l'usure en dépouille auxiliaire en un temps de coupe très court t=1.23 mn et qui a virée vers la surface d'attaque provoquant un large détachement du substrat de la plaquette. A la vitesse 120m/mn, on remarque sur la surface d'attaque de la plaquette au niveau de l'arête tranchante un sévère écaillage accompagné d'un détachement du substrat sur la zone d'entaille de profondeur de passe. L'usure en dépouille est assez prononcée.

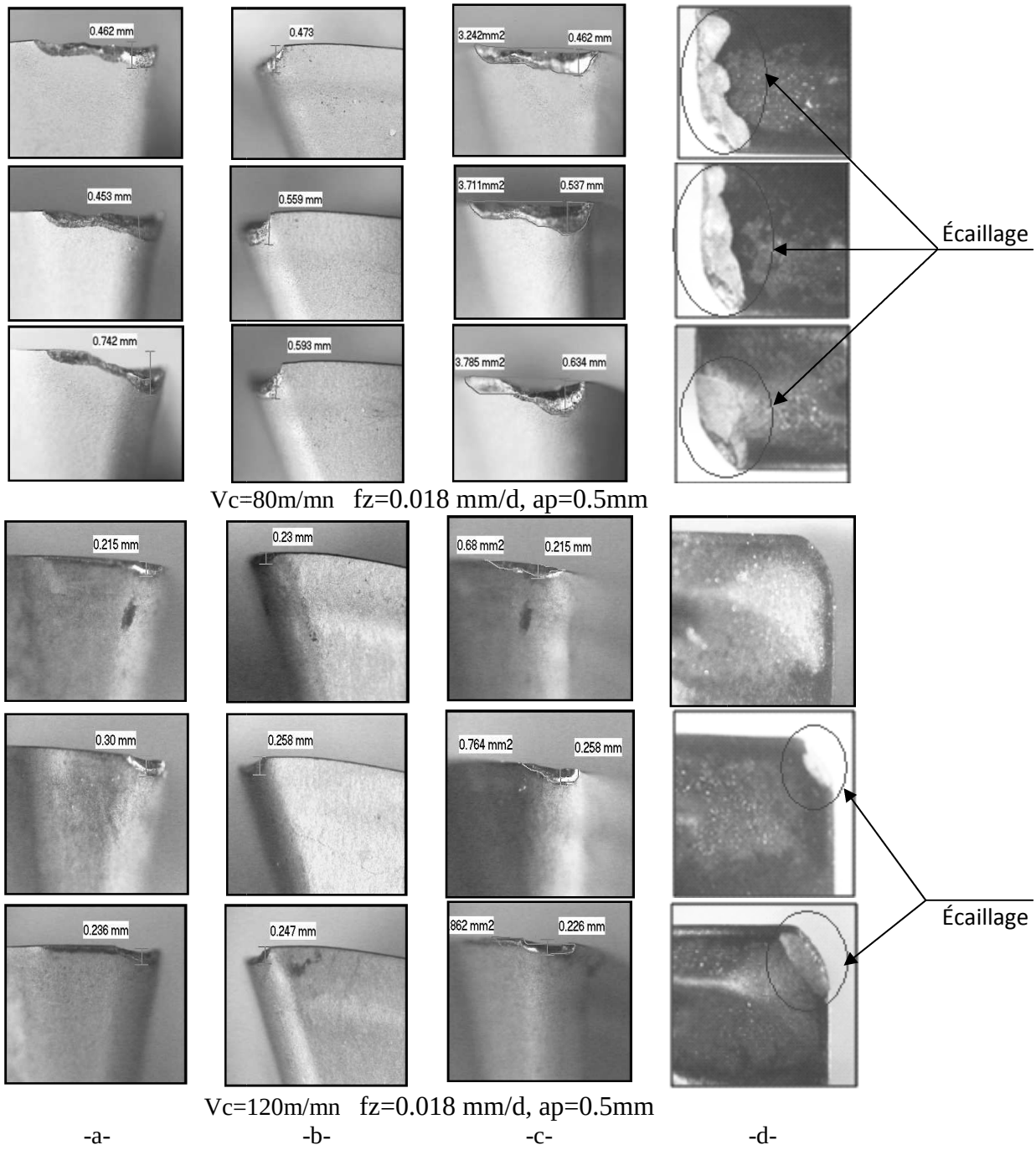


Figure. III.49. Micrographie de l'usure des plaquettes GC4230 après l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

A la vitesse 80 m/mn et à la fin de l'usinage c'est-à-dire après un temps de 1.23 mn, la plaquette GC2030 est marquée par un écaillage sur la surface d'attaque, qui s'élargit sur la surface d'attaque. A cette vitesse aussi, on remarque que la hauteur de l'usure VB est plus grande que celle des plaquettes qui ont été utilisées pour l'usinage de l'acier 100Cr6 traité à la vitesse 120m/mn (figure III.50).

A la vitesse de 120 m/min et après 0.42 min d'usinage, on observe que le chanfrein de la plaquette subit une usure accentuée provoqué par l'élévation de la température et aussi un écaillage sur la surface d'attaque qui a provoqué un petit effondrement du bec de l'outil **[30].**

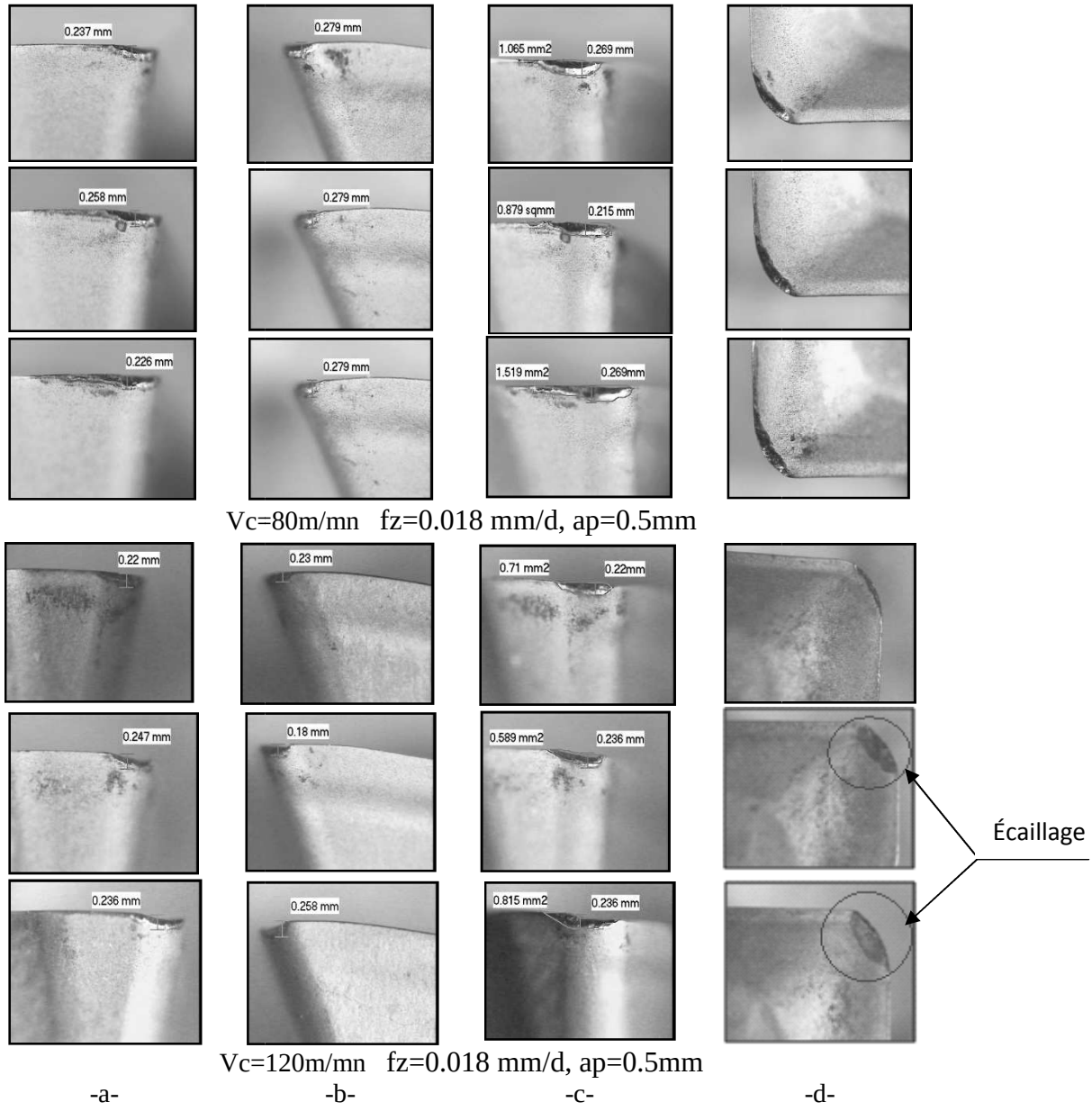


Figure. III.50. Micrographie de l'usure des plaquettes GC2030 après l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et revenu, a)Surface en dépouille auxiliaire VS, b) Surface en dépouille principale VB, c) Surface en dépouille (au sommet), d) Surface d'attaque

III.3.6 Influence du matériau de coupe sur la rugosité des surfaces usinées

Les essais de la rugosité pour les deux aciers ont été effectués avec les mêmes matériaux de coupe utilisés dans la série 2.En se basant sur les résultats des tableaux de l'annexe II.1-II.5, on a relevé les valeurs enregistrées des trois critères de rugosité (Ra, Rz et Rt) pour les différents

matériaux à outil, à différentes vitesses de coupe à VB = 0,3 mm. Chaque essai a fait l'objet de trois mesures prises sur une même surface.

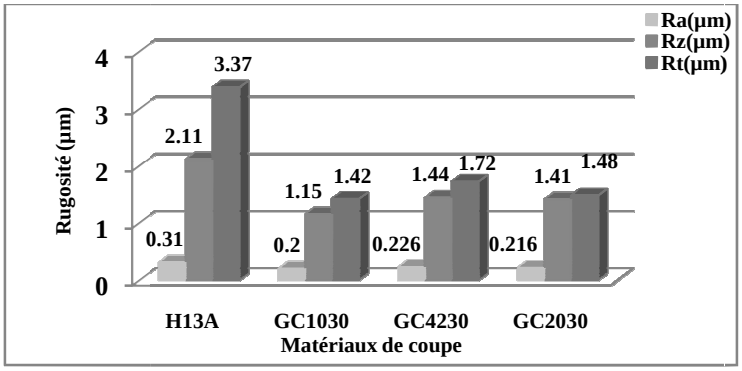


Figure III.51. Evolution de la rugosité de l'acier C45 trempé en fonction des matériaux de coupe à Vc=120m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm

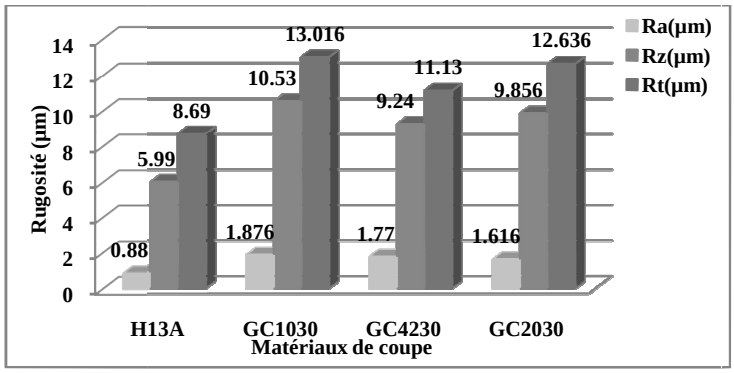


Figure III.52. Evolution de la rugosité de l'acier C45 trempé et revenu en fonction des matériaux de coupe à Vc=80m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm

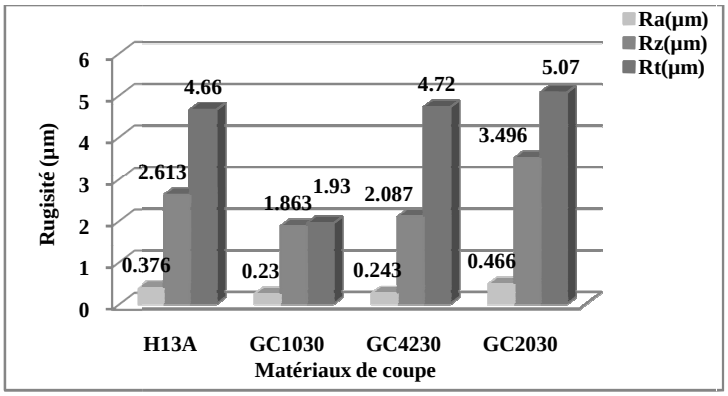


Figure III.53. Evolution de la rugosité de l'acier C45 trempé et revenu en fonction des matériaux de coupe à Vc=120m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm

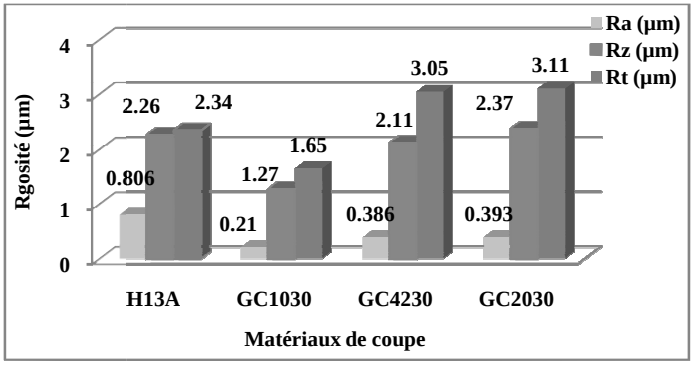


Figure III.54. Evolution de la rugosité de l'acier 100Cr6 trempé et revenu en fonction des matériaux de coupe à Vc=80m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm

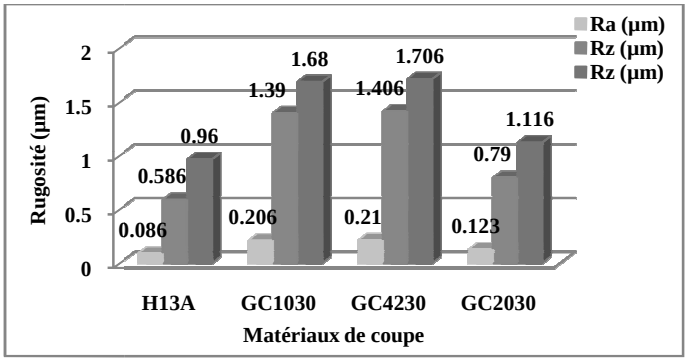


Figure III.55. Evolution de la rugosité de l'acier 100Cr6 trempé et revenu en fonction des matériaux de coupe à Vc=120m/min, fz=0.018mm/d, ap=0.5mm

III.3.6.1 Résultats de la Rugosité

Les essais relatifs à l'étude de la rugosité de surface des aciers étudiés, ont permis l'obtention des résultats reportés sur les tableaux III.13 et III.14. L'influence de la vitesse de coupe sur les différents critères de la rugosité (Ra, Rz et Rt) obtenus lors de l'usinage de ces aciers par les défférnts matériaux à outil testés.

Tableau III.13 : Résultats des différents critères de rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage des deux aciers C45 et 100 Cr6 traités avec les différentes matériaux de coupe.

Plaquettes de coupe	**Paramètres d'entrée Régime de coupe**			**Paramètres de sortie Rugosité (µm)**					
				Acier C45			**Acier 100 Cr6**		
	Vc (m/min)	**fz (mm/d)**	**ap (mm)**	**Ra**	**Rz**	**Rt**	**Ra**	**Rz**	**Rt**
H13A	80	0.018	0.5	0.88	5.99	8.69	0.806	2.26	2.34
	120			0.376	2.613	4.66	0.086	0.586	0.96
GC1030	80			1.876	10.53	13.016	0.21	1.27	1.65
	120			0.23	1.863	1.93	0.206	1.39	1.68
GC4230	80			1.77	9.24	11.13	0.386	2.11	3.05
	120			0.243	2.087	4.72	0.21	1.406	1.706
GC2030	80			1.616	9.856	12.636	0.47	2.37	3.11
	120			0.466	3.496	5.07	0.123	0.79	1.116

Tableau III.14: Résultats des différents critères de rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et sans revenu avec les différents matériaux de coupe.

Plaquettes de coupe	Paramètres d'entrée Régime de coupe			Paramètres de sortie Rugosité (µm)		
	Vc (m/min)	fz (mm/d)	ap (mm)	Ra	Rz	Rt
H13A	120	0.018	0.5	0.31	2.11	3.37
GC1030				0.20	1.15	1.42
GC4230				0.226	1.44	1.72
GC2030				0.216	1.41	1.48

III.3.7 Analyse des résultats de la rugosité de surface

Les figures III.51 à III.55 montrent la relation entre la rugosité de surface, le matériau de coupe et la vitesse. La figure III.52 montre que l'outil de coupe H13A donne le meilleur état de surface caractérisé par les valeurs de ces critères (Ra=0.88µm), suivi de prés par les plaquettes 2030, pour l'usinage de l'acier C45 trempé et revenu à une vitesse VC=80m/mn. A la vitesse 120m/mn (figure III.51), on constate que la rugosité de surface diminue. Cette observation est en bon accord avec les résultats rapportés par les chercheurs précédents que la vitesse de coupe et la qualité de surface ont une forte corrélation positive.

En fait, à 120 m / min, tous les quatre matériaux de coupe affichaient des comportements similaires en termes de rugosité de surface (Ra ne dépassant pas 0.5µm). Les résultats ont été dans la gamme de 0,23 à 0,466 µm pour les quatre nuances de matériau à outil. Lors de l'usinage de l'acier C45 trempé et revenu (figure III.53), les plaquettes de coupe utilisées ont donné de bons états de surface.

L'analyse de la figure III.54, nous permet de constater que les meilleurs critères de rugosité sont donnés par la 1030 c'est-à-dire que pour avoir un bon état de surface pour un acier à roulement « 100Cr6 » traité (dureté de 60.1 HRC) pour une vitesse de coupe de 80m/min, le meilleur matériau de coupe pour son usinage dans cette gamme d'outil est la GC1030. La rugosité de surface obtenue à cette vitesse avec les H13A est considérablement plus élevée que celles obtenues par les autres matériaux de coupe.

Les meilleures valeurs de la rugosité ont été obtenues par l'outil de coupe H13A lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 traité à la vitesse 120m/min (la figure III.55).Les plaquettes de coupe GC2030 ont à leur tour donné un bon état de surface (Ra a pour valeurs respectives 0.086µm et 0.123µm) comparativement avec les GC1030 et les GC4230.

III.3.8 Analyse de la morphologie du copeau

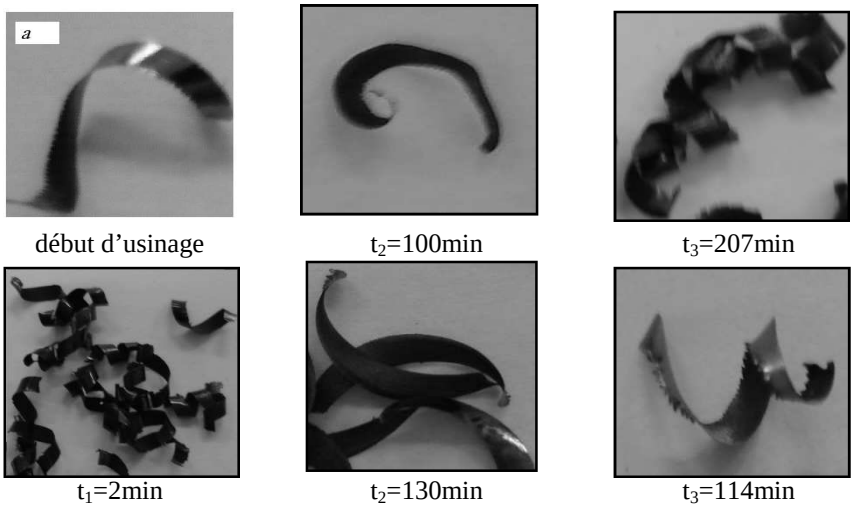


Figure III.56. Evolution de la forme du copeau en fonction de l'usure et de la vitesse de coupe pour la GC4030 lors de l'usinage de l'acier C45, a) Vc=80m/min, b) Vc=120m/min,

Au début de l'essai, (photo gauche) le copeau obtenu est continu enroulé en hélice. Il est uniforme et ne présente pas de déchirures. Sa couleur est grisâtre virant vers l'argenté. Ce type de copeau est l'indicateur d'un bon écoulement dans la zone de coupe ce qui signifie que le matériau testé se donne bien à l'usinage. Au fil du temps d'usinage un temps d'usinage, la forme du copeau change et sa couleur aussi. Le copeau montré sur la photo du milieu est récupéré après 100 minutes d'usinage, nous remarquons qu'il a perdu l'enroulement en hélice qu'avait le copeau du début d'usinage, sa couleur a virée vers le violet et il est écroui. Vers la fin de l'essai le copeau a retrouvé sa forme hélicoïdale mais avec des caractéristiques géométriques différentes. Sa couleur commence à virer du violet vers le bleu foncé.

A la vitesse 120 m/mn, le copeau obtenu après deux minutes d'usinage a une forme hélicoïdale. Il est uniforme et ne présente pas de déchirures. Sa couleur est bleuâtre, Ce type de copeau est l'indicateur d'un bon écoulement dans la zone de coupe, mais la vitesse de coupe élevée comparativement au premier essai a engendré un dégagement de chaleur plus important ce qui a donné le teint violet- bleuâtre au copeau. A la cent trentième minute d'usinage, le copeau est devenu plat sa couleur bleue foncée et présente un aspect uniforme et ne présente pas de déchirures. Vers la fin de l'essai le copeau a repris sa forme hélicoïdale avec une tendance spirale. Sa couleur est devenue bleue claire.

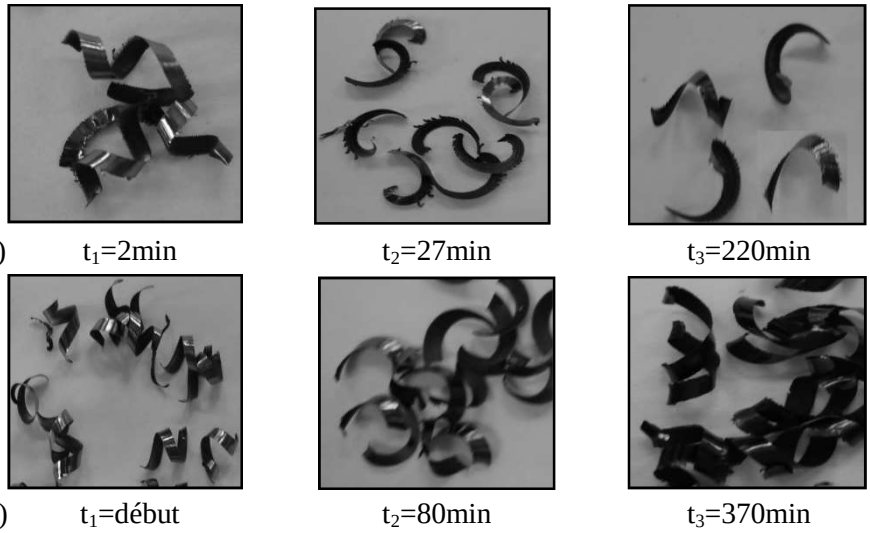


Figure III.57. Evolution de la forme du copeau en fonction de l'usure et de la vitesse de coupe pour la GC4030 lors de l'usinage de l'acier 100Cr6, a) Vc=80m/min, b) Vc=120m/min,

A la vitesse 80m/mn, le copeau obtenu après deux minutes d'usinage a une forme hélicoïdale. Il est uniforme et ne présente pas de déchirures. Sa couleur est jaunâtre avec des taches bleues, il s'écoule bien et présente un aspect uniforme. Après vingt sept minutes d'usinage, le copeau n'est plus enroulé en hélice et présente des déchirures sur le flanc sa couleur est devenue bleue foncée. A la fin de l'essai après deux cent vingt minutes d'usinage le copeau commence à reprendre une forme spirale et sa couleur vire au bleu.

A 120m/mn, le copeau obtenu au début d'usinage a une forme hélicoïdale et une couleur grise argentée. Il est uniforme et ne présente pas de déchirures c'est la forme du copeau obtenu lorsque les conditions de l'usinage son favorables. Après quatre vingt minutes d'usinage, le copeau n'est plus enroulé en hélice sa couleur est devenue bleue foncée. A la fin de l'essai, le copeau commence à reprendre une forme spirale avec une déchirure sur le flanc et sa couleur vire au bleu.

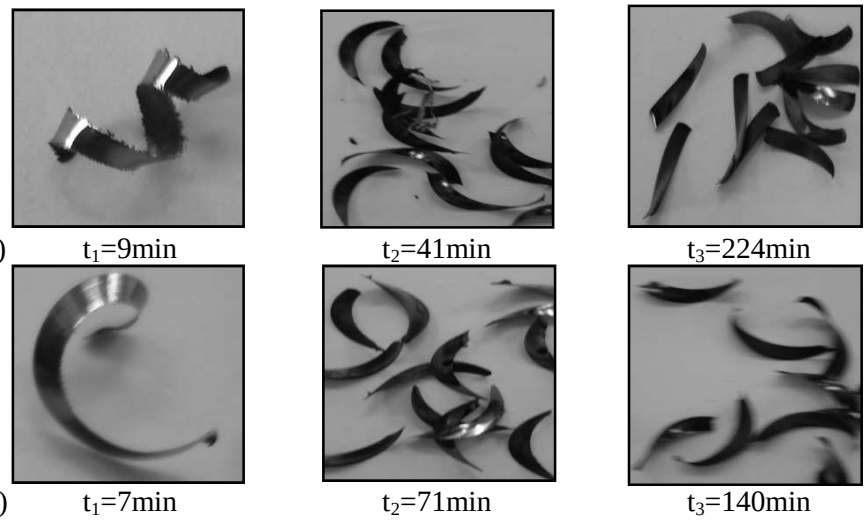


Figure III.58. Evolution de la forme du copeau en fonction de l'usure et de la vitesse de coupe pour les cermets CT530 lors de l'usinage de l'acier C45, a) Vc=80m/min, b) Vc=120m/min

Pour l'usinage de l'acier C45 avec les plaquettes en CT530 (cermet), le copeau est de forme hélicoïdale présentant de petites déchirures sur le flanc, sa couleur grise argentée. Après quarante minutes d'usinage, le copeau n'est plus enroulé, il est devenu plus dur et cassant, sa couleur a viré au bleu foncé. Vers la fin de l'essai, le copeau est devenu plat mais toujours continu, sa couleur vire vers le bleu clair.

A la vitesse 120m/min, le copeau obtenu aux premières minutes de l'usinage est uniforme continu enroulé en hélice avec un pas plus grand que celui du régime à 80m/min. A la soixante dixième minute, le copeau n'est plus enroulé il est écroui et sa couleur commence à virer vers le gris foncé. A la fin de l'essai, le copeau est devenu bleuâtre, c'est l'effet de la température.

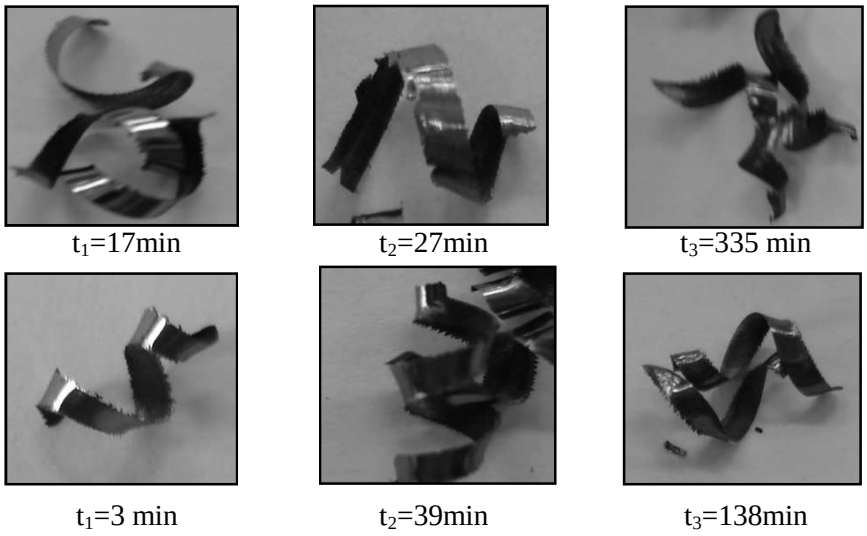
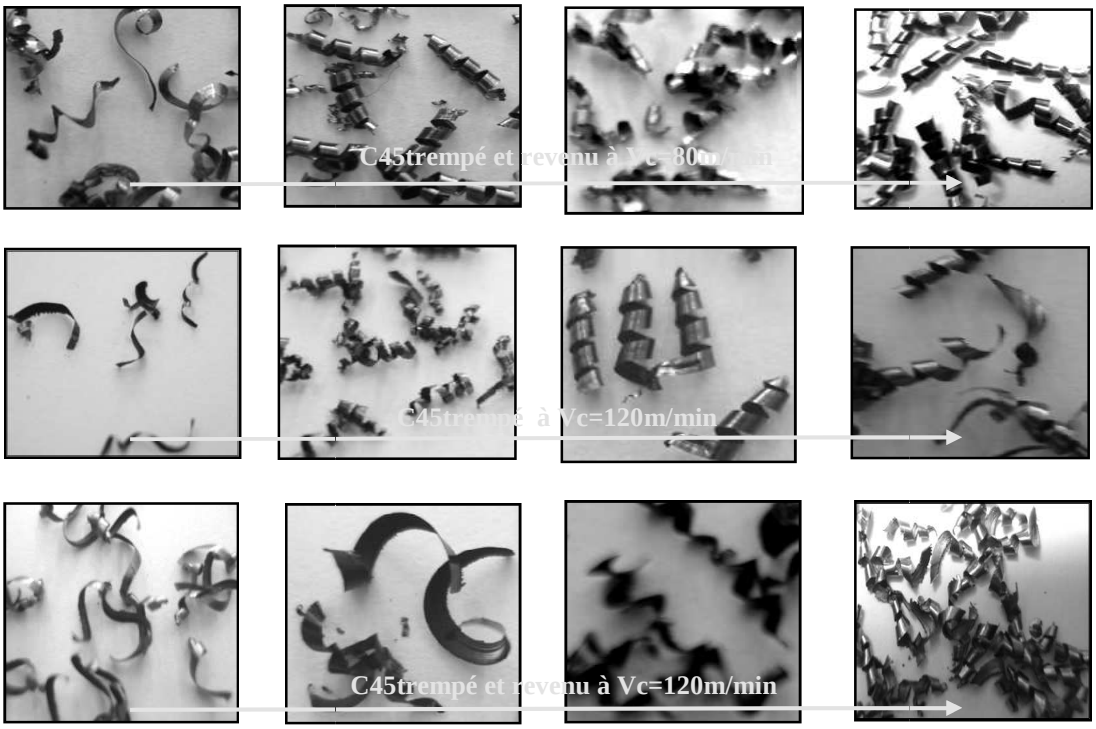


Figure III.59. Evolution de la forme du copeau en fonction de l'usure et de la vitesse de coupe pour les cermets CT530 lors de l'usinage de l'acier 100Cr6, a) Vc=80m/min, b) Vc=120m/min

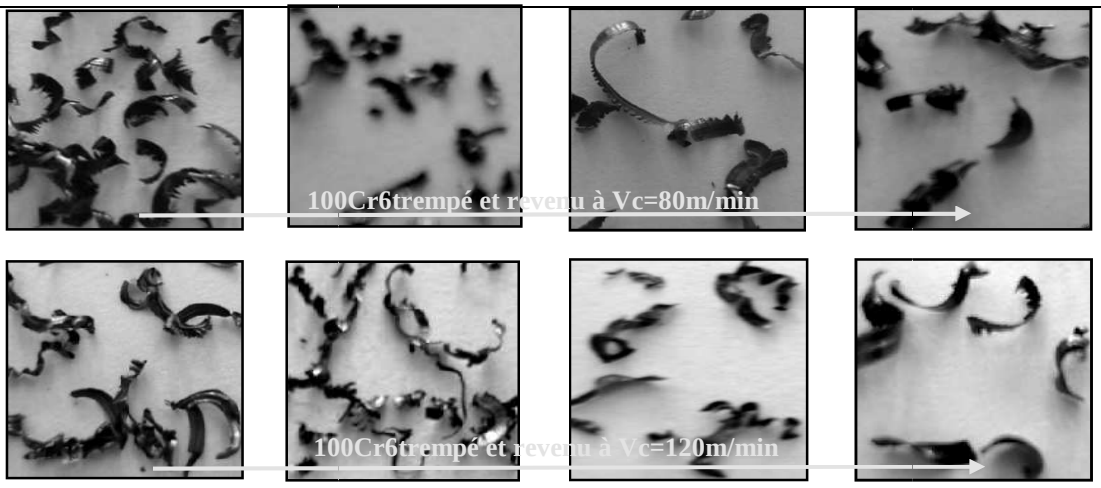
A la vitesse 80 m/mn, le copeau obtenu après dix sept minutes d'usinage a une forme hélicoïdale. Il est uniforme et ne présente pas de déchirures importantes. Sa couleur est grise jaunâtre, il s'écoule bien. Après vingt sept minutes d'usinage, le copeau reste enroulé en hélice et présente des déchirures sur le flanc sa couleur est devenue grise foncée. A la fin de l'essai après trois cent trente minutes d'usinage le copeau commence à reprendre une forme spirale et sa couleur vire au bleu.

A la vitesse 120m/min, le copeau obtenu après trois minutes d'usinage est un copeau enroulé de forme hélicoïdale et comporte de légères déchirures sur le flanc. Après quarante minutes d'usinage le copeau reste enroulé en hélice et présente des déchirures sur le flanc sa couleur est devenue grise foncée virant vers le bleu. A la fin de l'essai après cent trente huit minutes d'usinage le copeau conserve sa forme spirale et sa couleur vire au bleu clair, signe d'élévation de température de coupe.



-a- -b- -c- -d-

Figure III.60. Evolution de la forme du copeau de l'acier C45 en fonction de la vitesse de coupe lors de son usinage par les différentes plaquettes, a) H13A, b) GC1030,c) GC4230, d) GC2030



-a- -b- -c- -d-

Figure III.61. Evolution de la forme du copeau de l'acier 100Cr6 en fonction de la vitesse de coupe lors de son usinage par les différentes plaquettes, a) H13A, b) GC1030,c) GC4230, d) GC2030

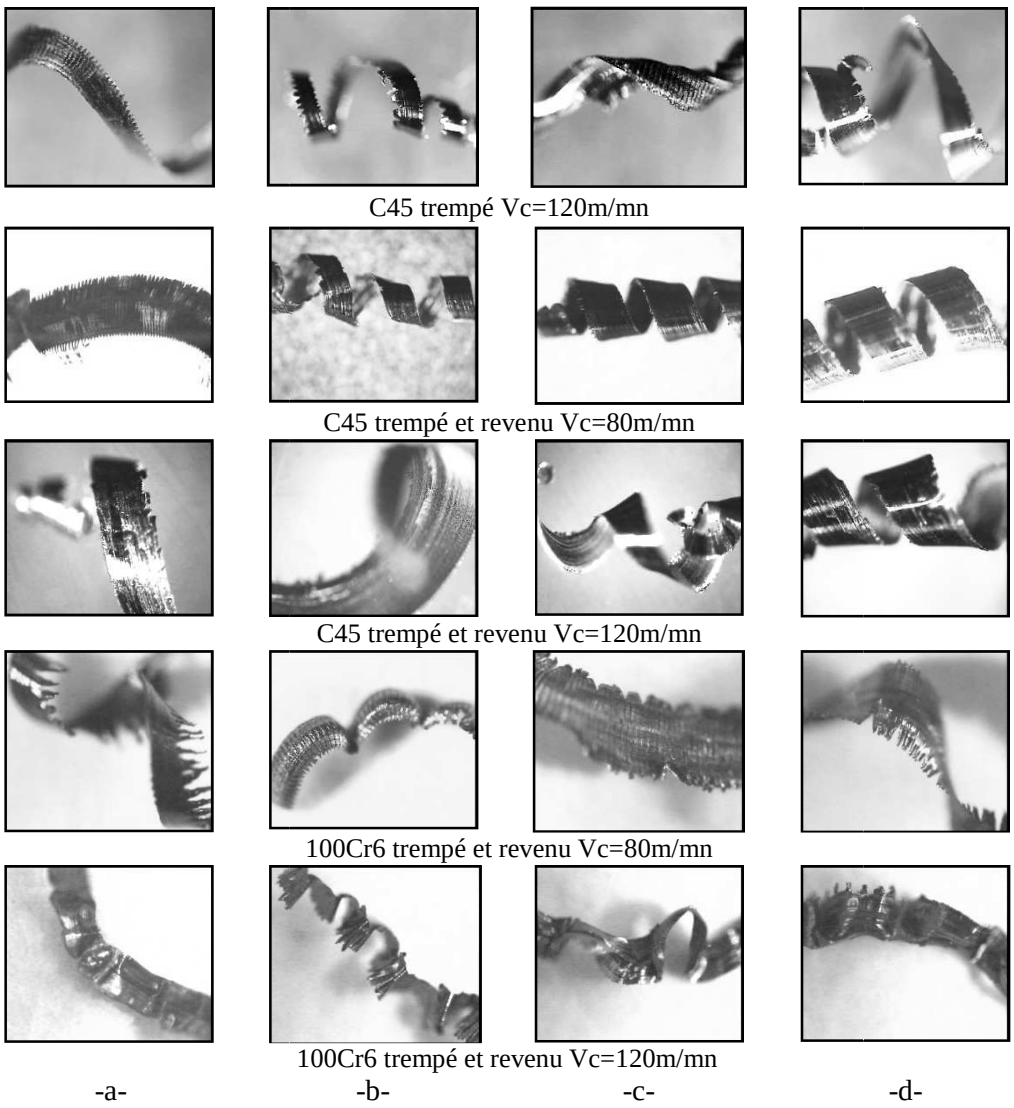


Figure .III.62. Micrographies du copeau en fonction de la Vc et l'acier usiné par les différents matériaux à outils, a)H13A, b) GC1030, c) GC4230, d) GC2030

A la vitesse 120 m/mn, le copeau obtenu est continu enroulé en hélice, sa couleur est grisâtre virant vers l'argenté. Il présente de petites déchirures sur le flanc presque pour toutes les plaquettes. Pendant l'usinage de l'acier C45 trempé et revenu à la vitesse 80 m/mn par les plaquettes H13A, il s'est engendré un copeau est uniforme continu enroulé en hélice avec un pas plus grand que celui du régime à 80m/min, de couleur gris foncé. Avec le reste des plaquettes, on a eu un copeau jaunâtre enroulé en hélice.

A la vitesse 120 m/mn, l'analyse de la micrographie du copeau de l'acier C45 trempé et revenu usiné par les différentes plaquettes nous donne :-Par les H13A un copeau hélicoïdale de couleur jaune brillante indiquant qu'il ya un bon écoulement du copeau c'est-à-dire un bon état de surface.

-Par les GC1030, le copeau est toujours de forme hélicoïdale mais de couleur gris virant vers le bleu ce qui veut dire qu'il ya une augmentation de température dans la zone de coupe.-par les GC4230, le copeau a la forme d'une hélice bleu virant au jaune.-Par les GC2030, on a un copeau en hélice de couleur jaune.

L'analyse de la morphologie du copeau de l'acier 100Cr6 trempé et revenu montre :

A la vitesse 80m/mn, on a la même forme du copeau pour les plaquettes GC1030,GC4230 et GC2030, presque et presque uniforme, sa couleur est marron jaunâtre. Par contre pour les H13A, sa forme est hélicoïdale et sa couleur grise virant vers le noir. Mais les quatre types de copeau ont des déchirures sur le flanc.

A la vitesse 120 m/mn, les copeaux ont tous une forme presque linéaire et leur couleur est grise foncée presque noire.

Le copeau est la conséquence de l'usinage. Mais si l'on fait le raisonnement inverse, comme nous l'avons déjà mentionné, le comportement du copeau est une source d'informations sur les conditions de coupe. Progresser dans sa connaissance est peut être la meilleure voie pour maîtriser la coupe. C'est un défi à relever dans l'avenir.

Conclusion générale

Ce travail de thèse a eu pour objectif d'étudier l'effet de la variabilité du matériau de coupe : Cermet530, GC4030, H13A, GC1030, GC4230, GC2030 sur le comportement micro-géométrique des pièces usinées C45 et 100Cr6 traités et non traités dans une opération de fraisage à sec. L'analyse bibliographique, présentée dans le chapitre 1, a montré les interactions qui existent entre de nombreux phénomènes notamment le comportement de la matière à usiner, la chaleur générée et l'usure des outils de coupe. La bibliographie générale a permis de souligner l'intérêt de travaux réalisés dans chaque domaine ainsi que les avantages et les limites de différents moyens utilisés pour mener les études expérimentales. Les moyens expérimentaux sont très coûteux mais ils restent les plus utilisés pour comprendre les états micro-géométriques des surfaces usinées, les mécanismes d'usure des outils de coupe...etc. L'interprétation des résultats des essais réalisés dans cette étude ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- ✓ Le phénomène d'usure le plus distingué est l'usure par abrasion. Ce phénomène se manifeste par l'apparition de cannelures (stries) sur la face en dépouille de l'outil. L'usure par abrasion est due à l'arrachement de particules de l'outil par les particules dures constituant le matériau usiné.
- ✓ La vitesse d'accroissement de l'usure en dépouille auxiliaire est plus lente que celle en dépouille principale. Avec le temps, on remarque une augmentation de l'usure VB, VS et KT .Quand ces paramètres d'usure se rejoignent, on assiste à un effondrement brutal du bec de l'outil. L'effondrement de l'outil provoque un émoussage qui se traduit par un recul de la pointe de l'outil. Cette usure mérite par conséquent une attention particulière puisqu'elle affecte la surface usinée et la précision dimensionnelle.
- ✓ L'usure est l'un des facteurs à considérer, puisque son évolution endommage et dégrade l'état de surface des pièces. Malgré l'évolution de VB jusqu'à 0.3 mm, la majorité des valeurs enregistrées de Ra n'ont pas dépassé la valeur de 1 µm.
- ✓ Les plaquettes cermets CT350 ont montré un comportement à l'usure nettement meilleur que celui des plaquettes en carbure métallique revêtu et ceci pour les différentes conditions de travail et pour les deux matériaux utilisés. Cette performance de supériorité est caractérisée par un ratio allant de 1,78 à 1,91fois.
- ✓ La résistance à l'usure en dépouille des plaquettes revêtues GC4030 est meilleur que celle des plaquettes non revêtues CT530.
- ✓ L'analyse des courbes de suivi de l'usure en fonction du temps montre que l'allure de cette dernière obéit à la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique.

- ✓ Les plaquettes H13A et GC1030 ont donné une résistance meilleure à l'usure par rapport aux plaquettes 4230 et 2030 permettant d'obtenir des états de surfaces (Ra = 0,02 à 0,88) µm) compris dans les limites de rugosité obtenues par la rectification.
- ✓ Avec l'évolution de l'usure la qualité de la surface se détériore. Ceci s'explique d'une part par l'accroissement progressif de l'usure suivant la surface d'attaque et de dépouille de l'outil, ce qui conduit à la modification géométrique de l'outil. Par conséquent cette nouvelle morphologie de la partie active de l'outil sera reproduite sur la surface usinée de la pièce. En outre elle contribue à l'élévation de l'effort et de la température dans la zone de contact "Outil-Pièce", ce qui fait naître des vibrations dans le système usinant. Ces dernières se traduisent sur la surface générée de la pièce par des ondulations et des aspérités accentuées.
- ✓ La qualité des surfaces obtenues lors de l'usinage avec les outils en cermet530, H13A et GC1030 est comparable à celle obtenue en rectification. Cet avantage présente un atout économique, puisqu'il nous permet de réduire les phases de fabrication des pièces (ébauche, demi finition, finition) sur la même machine-outil. Il est clair que le fraisage est un procédé d'usinage qui réduit considérablement le prix de revient en ayant une bonne productivité du travail.
- ✓ L'usinage dans différents états métallurgiques a montré que la morphologie du copeau évoluait en fonction de la dureté et de la microstructure du matériau. Le copeau est parfaitement continu et sans instabilité à la dureté de 45 HRc. A 55 HRc, le copeau se forme par localisation de déformation et il est en dents de scie pour une dureté d'environ 60 HRc.

PERSPECTIVES

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- Optimisation des conditions de coupe (à fin d'élaborer des modèles prédictifs plus précis).
- Élaboration et caractérisation de nouveaux revêtements (Les revêtements permettent d'améliorer de manière significative les performances de l'usinage. En conséquence le développement de nouveaux revêtements spécifiques des surfaces devient un objectif pour les fabricants de revêtements).
- Analyse thermique et mesure de la température en divers points de la surface du copeau (cerner plus précisément la région de formation du copeau et s'efforcer d'établir une cartographie thermique en mesurant les températures en divers points de la surface du copeau).

- Modélisation de la formation du copeau (l'existence de données thermiques fiables doit stimuler la modélisation. En effet, ces données constituent, à la fois, une assise et un test de validation d'un modèle).

Références bibliographiques

[1] Bedrin C, Généralités sur la coupe des métaux, Conférences CAST, Lyon, INSA de Lyon, 1971, pp.5-71.

[2] Centre technique des industries mécaniques (CETIM), Tournage dur et usinage à grande vitesse (UGV). 2000. Rapport, 86p.

[3] Mehdi Remadna, Le comportement du système usinant en tournage dur, application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitrure de Bore Cubique).Thèse de doctorat. N°d'ordre 01 ISAL 00 22. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001.

[4] SPUR G, La mesure de l'importance des forces radiales engendrées par les forets hélicoïdaux, Micro technique 1961, T.15, n°2, p.53.

[5] Ansell c.t, Taylor J, The surface finishing properties of a carbide and ceramic cutting tool, Advances in machine tool design Platit, Documentation commerciale, 2001. and research. Ed. S.A TOBIAS and F. IGSBERGER, London: Pergamon Press, 1962.

[6] .Mathon P, Usinabilité et lois générales de l'usinage des aciers et des fontes. Recueil de conférences, In. La coupe des métaux, INSA de Lyon, 1971, p.12-164.

[7] .Mathon P, Usinabilité d'aciers 16NC6 de structures differentes.Traitement thermique, Paris, Sept-Oct.1968, pp.27-38.

[8] J.M.Bergheau, M.Dursapt, H.Hamdi, C.Pagès, J.Rech, H.Zahouani, Usinage à grande vitesse .Edition 2003

[9] Daniel Dudzinski et Philippe Lorong, Modélisation et expérimentation en usinage grande vitesse, Vie scientifique –Matériaux et procédés-22 ,23(2004).

[10] SANDVIK, Fraisage ; Principe, principe de base du fraisage, Technique de l'ingénieur [BM 7082]. 2003

[11] Christian Pagès, Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition, Thèse doctorat à LYON N=d'ordre : 2003-37.

[12] A.Benyoucef, Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécanistique, Mémoire de magister, Université de Batna, 06-2006.

[13] Catalogue et guide industriel de la firme « SANDVIC Coromant 2007 »

[14] http://fr.wikiversity.org/wiki/Fraisage/Angle_de_coupe, Avril 2010

[15] Mohamad Al-ahmad, Industrialisation de procédé : Contribution à la maitrise de l'opération de tréfilage ou fraisage vertical - approches analytique et expérimentale, Thèse de doctorat. N°: 2008-ENSAM-08.

[16] Stéphane Bolognini, Propriétés mécaniques à haute température de cermets Ti(C, N)-WC-Mo-Co à gradient de composition pour outils de coupe, Thèse de doctorat. N°d'ordre 2161-2000.

[17] Stéphanie Bissey, Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités thermiquement, Thèse de doctorat.N° d'ordre : 2005-04.Année 2005.

[18] Cédric Ducros, Véronique Benevent et Frédéric Sanchette. Revêtement, caractérisations et essais d'usinage de systèmes multicouches réalisés par PVD sur outils en carbure cémenté .2002

[19] Cetim, Les revêtements CVD et PVD appliqués aux outils de coupe, document de formation, 1994, pp. 66-75.

[20] Platit, Documentation commerciale, 2001.

[21] Hamid Aknouche. Etude de l'usure des outils de coupe traités dans le domaine de l'usinage du bois .Thèse de doctorat. Université M'Hamed Bougara – BOUMERDES.2009

[22] Trent E.M., Metal Cutting, Butterworth Heinemann, ISBN 0-7506-1068-9, 1991. pp. 256-266.

[23] Rêche J., Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures à la fraise-mère à grande vitesse, Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, N° 23-2002, 2002.

[24] Philippe Bagard, Outils coupants, conditions de coupe et stratégies en Usinage à grande vitesse des outillages : point de départ de la chaîne CFAO, Journées d'information : Usinage à Grande Vitesse des outillages, CETIM Senlis, 6 et 7 décembre 1994.

[25] J.Maushart, Le fraisage à haute vitesse – Technologie, outils et secteurs d'application, FRAISA S.A.

[26] Peter Rigby – GE Super abrasives, Les Super abrasives et la Grande Vitesse, Journées d'information : Usinage à Grande Vitesse des outillages, CETIM Senlis, 6 et 7 décembre 1994.

[27] François Leroy, Matériaux pour outils de coupe, traité Mécanique et Chaleur. Techniques de l'Ingénieur. B7042.2003.

[28] D.G.Flom, W.R.Reed, High Speed Machining of cast iron with BZN Compacts, General Electric Super abrasives, 1990.

[29] M. Benghersallah; L.Boulanouar; Mahfoudi, S. Dominiak.Examen morphologique de l'usure des plaquettes carbure métallique en fraisage. Congrès international de physique ANNABA 2007.

[30] M.a. Yallese H. Bouchelaghem S. Belhadi N. Kribes, Investigation expérimentale sur l'usure des outils de coupe en cbn lors du tournage des pièces dures. Sciences & Technologie B – N°26, décembre (2007), 15-22.

[31] Poulachon.G, Usinabilité des matériaux difficiles : application aux aciers durcis. Techniques de l'ingénieur. BM7048.2003.

[32] Hug J. L., Tournage des métaux durs, Machine de production, N° 110 pp 17-19, 1995.

[33] Yallese.M.A, Boulanouar.L et Chaoui.K, Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique, Revue Mécanique et Industries, volume 5, N°4, pp355-368, 2004.

[34] 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.

[35] Boulanouar ; M. Benghersallah, Etude et modélisation de l'usure d'une fraise à surfacer à plaquettes rapportées amovibles en carbure métalliques. Synthèse N=5 1999.

[36] A. Cornet and J. P. Deville, Physique et ingénierie de la surface, Monographie de matérialogie 3, 1998.

[37] S. Han, Mechanisms and modeling of white layer formation in orthogonal machining of steels, PhD thesis, George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, May 2006.

[38] A. Molinari and M. Nouari, Modeling of tool wears by diffusion in metal cutting. *Wear*, 252(1-2):135–149, January 2002.

[39] C. Y. H. Lim, P. P. T. Lau, and S. C. Lim, The effects of work material on tool wear. *Wear*, 250(1-12):344–348, October 2001.

[40] Q. Liu and Y. Altintas, On-line monitoring of flank wear in turning with multilayered feed-forward neural network. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39(12):1945–1959, December 1999.

[41] S.-S. Cho and K. Komvopoulos, Wear mechanisms of multi-layer coated cemented carbide cutting tools. J. Tribol., 119(1):8–17, January 1997.

[42] Y. S. Liao and R. H. Shiue, Carbide tool wear mechanism in turning of Inconel 718 superalloy. *Wear*, 193(1):16–24, April 1996.

[43] G. List, M. Nouari, D. Géhin, S. Gomez, J.P. Manaud, Y. Le Petitcorps, and F. Girot. Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy. *Wear*, 259(7-12):1177–1189, 2005.

[44] M. Nouari and I. Iordanoff, Effect of the third-body particles on the tool-chip contact and tool-wear behaviour during dry cutting of aeronautical titanium alloys. Tribology International, 40(9):1351–1359, September 2007.

[45] K.-M. Li and S. Y. Liang, Modeling of cutting forces in near dry machining under tool wear effect. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(7-8):1292–1301, June 2007.

[46] A. Ebrahimi and M.M. Moshksar, Evaluation of machinability in turning of microalloyed and quenched-tempered steels: Tool wear, statistical analysis, chip morphology. Journal of Materials Processing Technology, 209(2):910–921, January 2009.

[47] K. A. Venugopal, S. Paul, and A. B. Chattopadhyay, Tool wears in cryogenic turning of ti-6al-4v alloy. Cryogenics, 47(1):12–18, January 2007.

[48] E. M. Trent and P. K. Wright, Metal Cutting (Fourth Edition). Butterworth-Heinemann, 2000.

[49] H. S. Qi and B. Mills, On the formation mechanism of adherent layers on a cutting tool. *Wear*, 198(1-2):192–196, October 1996.

[50] G. List, Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caractérisation de l'interface outil-copeau : Application a l'usinage a sec de l'Alliage d'Aluminium Aéronautique *AA2024 T351*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2004.

[51] D. Jianxin, L. Yousheng, and S. Wenlong, Diffusion wear in dry cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co carbide tools. *Wear*, In Press, Corrected Proof:–, 2008.

[52] S. Giménez, S.G. Huang, O. Van der Biest, and J. Vleugels, Chemical reactivity of PVD-coated WC-Co tools with steel. Applied Surface Science, 253(7):3547–3556, January 2007.

[53] T. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, and Y. Yamane, *Metal Machining: Theory and Applications*. John Wiley & Sons Inc., 2000.

[54] H. O. Gekonde and S. V. Subramanian, Tribology of tool-chip interface and tool wear mechanisms. Surface and Coatings Technology, 149(2-3):151–160, January 2002.

[55] K. Kudou, T. Ono, and S. Okada, Crater wears characteristics of an Fe-diffused carbide cutting tool. Journal of Materials Processing Technology, 132(1-3):255–261, January 2003.

[**56] R. F. Ávila, C. Godoy, A. M. Abrão, and M. M. Lima,** Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C, N) and (Ti,Al)N coated carbide tools. *Wear*, 265(1-2):49–56, June 2008.

[57] A. Devillez, S. Lesko, and W. Mozer, Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry. *Wear*, 256(1-2):56–65, January 2004.

[58] Yallese M.A., Etude de comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, Thèse de doctorat, Université de Annaba 2005.

[59] GACEB Mohamed et BRAHMI Sadek. Etude de l'influence de l'état de surface sur la tenue à la fatigue d'un acier XC48. 2008

[60] .Leskovar P. & Peklenik J, 1982 Influences affecting surface integrity in cutting processes, Annals of the CIRP, Vol.31/1, pp.447-450.

[61] Hua J., Umbrello D. & Shivpuri R, 2006. Investigation of cutting conditions and cutting edge preparations for enhanced compressive subsurface residual stress in hard turning of bearing steel J Mat Proc Tech 171, 180-187.

[62] André Chevalier,Chevalier, guide du dessinateur industriel. Hachette technique Edition 2004.

[63] ST. Enache, La qualité des surfaces usinées, édition DUNOD 1972, 340 p.

[**64] H. Schultz ,** Fraisage à grande vitesse des matériaux métalliques et non métalliques, Paris ed. Technologie d'aujourd'hui 1997, p343.

[65] D. Novovic, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, W. Voice, P. Bowen ,The effect of machined topography and integrity on fatigue life ,International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 125–134.

[66] M. Gaceb, An investigation of micro crack formation on machined surfaces, A PH-D Thesis, Department of Mechanical and Production engineering, Sheffield City polytechnic, July 1985.

[67] A.R.C. Sharman, D.K. Aspinwall, R.C. Dewes, D. Clifton, P. Bowen ,the effects of machined work piece surface integrity on the fatigue life of γ-titanium aluminide ,International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 1681-1685

[68] V.Kovan, Technologie de la construction mécanique, Edition MIR MOSCOW, 1970

[69] H.K. Tonshoff, E. Brinksmeier ,Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by microhrdness and residual stresses analysis, Ann of the CIRP, 29/2/1980, pp519-530.

[70] Talhi F, Etude de l'influence du système MoDOP sur le comportement a l'usure des outils de coupe. Mémoire de magister, Université de Annaba, 2003.

[71] Adel Amin Ammar, Zoubeir Bouaziz & Ali Zghal, Modélisation et simulation des efforts de coupe en fraisage 2.5 axes, 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 2007.

[72] Stéphanie BISSEY, Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable a des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traites thermiquement, Thèse de doctorat.N° d'ordre : 2005-04.Année 2005.

[73] A Selaimia, Contribution à l'étude de l'usinabilité des alliages ferreux en fraisage, Mémoire de Magister, Année 2009.

[74] Bouchlaghem, Etude de l'impact des conditions de coupe et de l'usure sur les différents paramètres technologiques en tournage dur, Mémoire de Magister, Université de Guelma 2006.

[75] Guénaël Germain, Contribution a l'optimisation du procédé d'usinage assiste laser. Thèse doctorat .N°: 2006 ENAM 51.

[76] J.L. Battaglia, L. Puigsegur, H. El Moussami, J.P. Nadeau, J.C. Batsale, Méthode d'estimation de température et de flux de chaleur dans certains procédés d'usinage. Revue Mécanique et Industrie, 5 (2004) p49-60.

[77] C. Le Calvez, Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, (1995)

[78] R. M'Saoubi, J.L. Lebrun, B. Changeux ,A new method for cutting tool temperature measurement using CCD infrared technique: Influence of tool and coating Machining Science and Technology, 2 (1998) p369-382.

[79] Richard Tomasi et Grégoire Peigne, Usinage de l'aluminium Géométries d'outils adaptés (Influence de l'acuité) Méthodes de détermination des conditions de coupe (Intérêt et limites des méthodes existantes –Présentation d'une nouvelle approche).Thèse de doctorat.2008

[80] Xavier soldani, Modélisation analytique de l'usinage a grande vitesse et étude de l'usure en cratère –application au tournage, Thèse de doctorat. Metz 2008.

[81] J. P.Cordebois and coll, Fabrication par usinage, ISBN 2 10 005586 0. Dunod, Paris, 2003.

[82] Leonello Zaquini « Fraisage à grande vitesse : bases technologiques et applications pratiques « 2005.

[83] Christian Pagès, Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition, Thèse de doctorat. N° D'ordre : 2003-37.

[84] Stephen Bièdé Donyo, Jean-Christophe Hamann, Frédéric Meslin, Félix Le-maître, Modes de formation du copeau en fraisage orthogonal : cas du ta6v. XVème Congrès Français de Mécanique, Edition 2001.

[85] Jawahir I.S. and Luttervelt (van) C.A., Recent developments in Chip Control Research and Applications, Annals of the CIRP - Vol. 42/2/1993.

[86] T.H.C. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, and Y. Yamane, Metal Machining: theory andapplications, Arnold, 2000.

[87] T.H.C. Childs, Friction modeling in metal cutting, wear, 260:310–318, 2006.

[88] 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).

[89] Philippe Depeyre , Fabrication mécanique, Année 2004-2005

[90] J.Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet et P, Commande, Métallurgie du minerai au matériau Masson 1998 Paris, p. 717

[91] L. Mairesse. Composition des aciers. 1999

[92] M. Massin, Métallurgie Pratique pour Mécaniciens, tome 1, Pyc édition 1982, p 87-162.

[93] Belbacha El Djemai, Mesure de la drasticité des fluides de trempe, Thèse de doctorat 2002.

[94] H-J. Bargel and G. Schultze (ed.), Materials science, Springer Link 2000

[95] Renouard (M), Interret des diagrammes temps- température- Propriétés pour les traitements thermiques des alliages. Mem. Sc Rev. Metallurg. L.V.I. N° 5 P517-2 fev 1959

[96] M. Rainville. Technologie des matériaux. Edition 2004

[97] Guy Murry, Transformations dans les aciers, Techniques de l'ingénieur. Doc. M 1 115-p 3-4-5.2003.

[98] Philippe Poupeau, Traitements thermiques des métaux et alliages, Techniques de l'ingénieur. M 1 105-p13-14.2003

[99] Guy Murry, Aciers pour traitements thermiques. Techniques de l'ingénieur, Propriétés et guide de choix, Volumes M 4 530 – 2-3.2004.

[100] Olivier Bartier, Rochdi El Abdi, Gerard Mauvoisin et Ali Nayebi, Contribution de l'essai d'indentation à la caractérisation d'aciers nitrurés, 2005

[101] Bouziane.R, Etude de l'effet des conditions d'usinage sur ``C.O.P``en tournage, Mémoire de Magistère, Université de ANNABA, année 2009.

[102] Bodart .E, **«** Une méthode rapide de mesure de l'usinabilité et les essais de longue durée » CIRP ANNALES, pp.261-263, 09/1990.

[103] C.H. Che Haron a, A. Ginting b, H. Arshad, Performance of alloyed uncoated and CVD-coated carbide tools in dry milling of titanium alloy Ti-6242S, Journal of Materials Processing Technology 185, 77–82, 2007.

[104] B. Yalcın *, A.E. Ozgur, M. Koru.The effects of various cooling strategies on surface roughness and tool wear during soft materials milling.Materials and Design 30 (2009) 896–899

[105] M. Cemal Cakir∗, Cihat Ensarioglu, Ilker Demirayak. Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material. Journal of materials processing technology 2 0 9 (2009) 102–109.

[106] Nguyen thi thu Huyen, Effet des hétérogénéités microstructurales sur le comportement en fatigue multiaxiale a grand nombre de cycles application a l'usinage assiste laser, Thèse de doctorat, N°: 2008 ENAM 0018. Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur.

[107] Mohieddine Benghersallah, Lakhdar Boulanouar, Arnaud devillez, Gaël Lecoz, DanielDudzinski

Surveillance par Wattpilote du fraisage grande vitesse des rechargements stellite 6. 4th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics.2010.