

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY جامعة باجي مختار-عنابة

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Année 2010

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

*RECHERCHE SUR LE FRAISAGE DES MATERIAUX DURS AVEC LES MATIERES
DE COUPE MODERNES : APPLICATION A L'UGV DES SUPERALLIAGES*

Option : Productique

Par

Mohieddine BENGHERSALLAH

DIRECTEUR DE THESE : Lakhdar BOULANOVAR Pr. Université de Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Kamel CHAOUI Professeur Université de Annaba

EXAMINATEURS: Mohamed Cherif DJEMAA Mc. U. GUELMA

Mohamed Athmane YALLES Mc. U. GUELMA

Daniel DUDZINSKI Pr. U. PAUL VERLAINE METZ

Résumé

Cette thèse de doctorat a pour but d'étudier l'usinabilité des matériaux de différentes duretés en utilisant des matières de coupe modernes. En premier plan, une étude bibliographique synthétisant les méthodes d'évaluation de l'usinabilité et les résultats des travaux de recherche dans le domaine du fraisage des matériaux durs est passée en revue.

Une première partie concerne l'étude de l'usinabilité à sec de trois types d'aciers le C18, C45, 100Cr6 au cours du fraisage conventionnel. Les critères d'évaluation considérés sont la durée de vie de l'outil de coupe comme critère principal, les efforts de coupe et la rugosité de la surface usinée comme critères complémentaires. Des modèles mathématiques exprimant l'influence des paramètres de coupe sur les critères d'évaluation ont été établis d'après la méthode multifactorielle de planification des expériences. Les résultats obtenus nous ont permis d'évaluer l'usinabilité des aciers testés. Une deuxième partie concerne l'étude de l'usinabilité à sec des superalliages (Stellites6) par le fraisage à grande vitesse en employant des plaquettes de coupe avec différents revêtements. L'usinage des superalliages base-cobalt est particulièrement difficile mais possible grâce à l'emploi des carbures et revêtement de haute technologie. Le suivi de l'usure des outils de coupe en temps réel par l'introduction des dispositifs wattpilotes de mesure de puissance au cours de l'usinage a permis la sélection des plaquettes de coupe les plus performantes.

Une analyse des résultats expérimentaux obtenus au cours des deux parties de l'étude est présentée avec une conclusion générale et les perspectives envisagées.

Abstract

This thesis aims to study the machinability of materials of different hardness by using modern cutting materials. In the foreground, a literature review summarizing the methods for evaluating the machinability and the results of research in the field of milling of hard materials is reviewed.

The first part concerns the study of dry machining of three types of steels C18, C45, 100Cr6 during the conventional milling. The evaluation criteria considered are the life of the cutting tool as the main criterion, the cutting forces and roughness of the machined surface as additional criteria. Mathematical models expressing the influence of cutting parameters on the evaluation criteria have been established by the method of multifactor experimental design. The results allowed us to evaluate the machinability of steels tested. A second part concerns the study of dry machining of superalloys (Stellites6) by high speed milling using cutting inserts with different coatings. The machining of cobalt-base superalloys is particularly difficult but possible through the use of carbides and coating of high technology. Monitoring of cutting tool wear in real time by the introduction of devices WattPilote power measurement during machining has allowed the selection of cutting inserts the most successful. An analysis of experimental results obtained during the two parts of the study is presented with an overall conclusion and its prospects.

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة تشغيلية المواد ذات الصلادة المختلفة باستعمال مواد قطع عصرية. في أول المطاف تم تقديم حوصلة الطرق و البحوث المقترحة في مجال تقييم تشغيلية المواد الصلدة عن طريق التفرير.

الشطر الأول من الأطروحة يتعلق بدراسة تشغيلية ثلاثة أنواع من الفولاذ وهي حسب التعيين الموصف (100Cr6, C45, C18) عن طريق التفرير التقليدي بدون تبريد . لقد تم اختيار عنصر مدة القطع للأداة كعنصر أساسي في تقييم التشغيلية للمعدن و تم اختيار قوى القطع و حالة السطح المشغل كعنصرين مكملين. عن طريق تنظيم التجارب ثم الحصول على نموذج رياضي يعرف بدقة العلاقة التي تربط بين عناصر القطع و عناصر تقييم تشغيلية المواد . النتائج المحصل عليها سمحت لنا بتعريف أكثر و تقييم جدي لتشغيلية الأنواع الثلاثة من الفولاذ المدروسة.

الجزء الثاني من المذكرة يتعلق بدراسة تشغيلية المعادن ذات السبائك العالية (ستليت 6) عن طريق التفرير السريع بدون تبريد. تشغيل السبائك القوية صعب و لكنه ممكن باستعمال لقم قطع من الكربيد المعدني المزدوج و المغلف بعدة طبقات وقائية. تمت متابعة تآكل أدوات القطع باستعمال أجهزة الكترونية تسمح بقياس الاستطاعة المستهلكة أثناء عملية القطع ومعرفة أحسن اللقم المجربة في التفرير .

في آخر الدراسة تم تقديم جانب تقييمي و علاج مختلف نقاط البحث مع تقديم خلاصة عامة لهذا العمل و الأفق المرجوة منه.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	1
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES	5
LISTE DES FIGURE	8
LISTE DES TABLEAUX	12
RESUME	13
INTRODUCTION GENERALE	14
PROBLEMATIQUE	
CHAPITRE I	
ETUDE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	17
I.1 INTRODUCTION	17
I.2 Etude du fraisage et ses particularités	18
I.3 L'usinabilité	18
I.3.2 Evaluation de l'usinabilité	19
I.3.2.3 Méthodes d'évaluation de l'usinabilité	21
I.4.Critère principal d'endommagement des outils de coupe	21
I.4.1 Mécanismes d'endommagement des outils	
I.4.2 Mécanismes d'usure	28
Usure par abrasion	28
Usure par adhésion : arête rapportée et attrition	29
Usure par diffusion	30
Examens morphologiques de l'usure des outils de coupe	32
Lois d'usures des outils de coupe	33
I.5 Critères complémentaires d'évaluation de l'usinabilité	35
I.5.1 Le critère des efforts de coupe	36
- Modélisation des efforts de coupe (Merchant 1945)	36
I.5.2 Le critère de la rugosité de la surface usinée:	40
Principaux facteurs affectant l'outil	40
Principaux facteurs affectant la machine	40
Principaux facteurs affectant la pièce	40
Influence des paramètres géométriques de l'outil	42

Influence des paramètres du régime de coupe	42
Influence de la machine	44
Influence des facteurs métallurgiques	44
I.6 Microstructure et contraintes résiduelles	44
I.7 Analyse des travaux déjà réalisés	47
I.8 Evolution des matières de coupe	50
Evolution des matériaux à outil	50
Evolution des outils de fraisage	51
Texture des outils de coupe modernes	51
Les substrats	52
Les revêtements	53
L'intérêt de revêtement	54
I.9 Usinage à grande vitesse (UGV)	54
Pourquoi l'UGV ?	55
Exigences imposées par l'UGV	56
Matériaux de coupe et revêtements utilisés en UGV	56
Outils en carbures et leur revêtement de surfaces	57
Le Fraisage UGV	58
I.10 Fraisage grande vitesse à sec des couches de rechargement	59
STELLITE 6 sur les aciers de forgeage	
Le rechargement stellite 6 par le procédé PTA	59
L'usinage des couches de rechargement	60

CHAPITRE II METHODOLOGIE DE RECHERCHE ET PREPARATION DES EXPERIENCES

II.1 Méthodologie de recherche	
II.1.1 Méthode unifactorielle	63
II.1.2 Méthode multifactorielle	64
II.1.3 Traitement des résultats	66
II.2: Procédure expérimentale	70
II-2 .1 Fraisage conventionnel	70
Machines-outils	70
Matière usinée	71

Outil de coupe	71
Caractéristiques des plaquettes de coupe	72
<i>Appareil de mesure de l'usure</i>	73
<i>Principe de mise en position de la zone d'usure de la plaquette</i>	73
<i>Appareil de mesure de l'état de surface</i>	74
<i>Conditions de coupe</i>	74
II-2-2 Fraisage à grande vitesse	75
<i>Machine-outil</i>	75
<i>Eprouvettes testées</i>	75
<i>Le substrat</i>	76
<i>Outil de coupe employé</i>	76
<i>Plaquettes de coupe testées</i>	77
<i>Surveillance de l'usinage</i>	78
<i>Dispositifs Wattpilote</i>	78
<i>Mesure de l'usure</i>	79
CHAPITRE III TRAITEMENT ET ANALYSE DES RESULTATS	
III-1 Traitement des résultats: (Etude expérimentale sur le fraisage conventionnel)	80
III.1.1 Analyse des résultats d'usinage de l'acier C18	80
<i>Analyse des résultats d'usure</i>	80
<i>Analyse des résultats des efforts de coupe</i>	82
<i>Analyse des résultats de la rugosité</i>	84
III.1.2 Analyse des résultats d'usinage de l'acier C45	86
<i>Analyse des résultats d'usure</i>	86
<i>Analyse des résultats des efforts de coupe</i>	87
<i>Analyse des résultats de la rugosité</i>	89
III.1.3 Analyse des résultats d'usinage de l'acier 100Cr6	90
<i>Analyse des résultats d'usure</i>	90
<i>Analyse des résultats des efforts de coupe</i>	92
<i>Analyse des résultats de la rugosité</i>	93
III.2 Analyse globale de l'usinabilité des aciers testés	96
III.2.1 Analyse de l'usure	96
III.2.2 Analyse des efforts de coupe	98

<i>III.2.3 Analyse de la rugosité</i>	100
<i>III.2.4 Analyse de la rugosité en fonction du temps de coupe</i>	102
<i>III.2.5 Résultat de l'examen morphologique des plaquettes testées</i>	104
CHAPITRE IV TRAITEMENT ET ANALYSE DES RESULTATS	
<i>(Etude expérimentale sur le fraisage à grande vitesse)</i>	106
<i>IV.1 Traitement des données</i>	106
<i>Evolution des puissances et usures</i>	108
<i>Rechargement monocouche PTA</i>	
<i>Evolution des puissances</i>	108
<i>Usure des plaquettes</i>	109
<i>Traitement de l'usure des plaquettes au microscope</i>	110
<i>Images interférométries de l'usure sur les différentes plaquettes</i>	110
<i>Rechargement bicouche PTA</i>	112
<i>Evolution des puissance</i>	112
<i>Usure des plaquettes</i>	
<i>Traitement de l'usure des plaquettes au microscope</i>	113
<i>Images interférométriques</i>	113
<i>Evolution des puissances $V_c=190\text{m/min}$</i>	
<i>Usure des plaquettes $V_c=190\text{m/min}$</i>	114
<i>Evolution des puissances $V_c= 230 \text{ m/min}$</i>	
<i>Usure des plaquettes $V_c=230 \text{ m/min}$</i>	114
<i>Traitement de l'usure des plaquettes au microscope</i>	115
<i>Evolution des puissances $V_c= 120 \text{ m/min}$</i>	
<i>Usure des plaquettes $V_c=120 \text{ m/min}$</i>	115
<i>Traitement de l'usure des plaquettes au microscope</i>	116
<i>Images interférométriques</i>	117
<i>Vitesse de coupe V_c</i>	118
<i>IV-2.2 Analyse et discussion</i>	119
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	
	122
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
	126

Liste des tableaux

- I.1** Valeurs de l'effort spécifique de coupe
- II.1** Table de planification d'expériences d'après la méthode unifactorielle
- II.2** Table de planification d'expériences d'après la méthode multifactorielle
- II.3** Matrice de planification d'expériences pour un plan de 2^3
- II.4** Composition chimiques et caractéristiques mécaniques de l'Acier C18
- II.5** Composition chimiques et caractéristiques mécaniques de l'Acier C45
- II.6** Composition chimiques et caractéristiques mécaniques de l'Acier 100Cr6
- II.7** Plan d'expérience adopté pour les essais d'usinabilité des aciers testés
- II.8** Indications sur les plaquettes d'après les références Sandvik
- II.9** Paramètres de coupe rechargement monocouche
- II.10** Paramètres de coupe rechargement bicouche

- III.1** Valeurs des tenues de coupe pour les huit régimes testés (usinage de l'acier C18)
- III.2** Valeurs des Composantes de l'effort de coupe (Fraisage de l'acier C18)
- III.3** Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée (Fraisage de l'acier C18)
- III.4** Valeurs des tenues de coupe pour les huit régimes testés (usinage de l'acier C45)
- III.5** Valeurs des Composantes de l'effort de coupe (Fraisage de l'acier C45)
- III.6** Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée (Fraisage de l'acier C45)
- III.7** Valeurs des tenues de coupe pour les huit régimes (usinage de l'acier 100Cr6)
- III.8** Valeurs des Composantes de l'effort de coupe (Fraisage de l'acier 100Cr6)
- III.9** Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée (Fraisage de l'acier 100Cr6)
- III.10** Valeurs des tenues pour les différentes combinaisons du plan pour les trois aciers testés.
- III.11** Valeurs des composants F_y de l'effort de coupe pour les différentes combinaisons du plan pour les trois aciers testés.
- III.12** Valeurs de la rugosité Ra pour les différentes combinaisons du plan pour les trois aciers testés.

- IV.1** Traitement de l'usure des cinq plaquettes sélectionnées (rechargement monocouche)
 $V_c=190\text{m/min}$; $f_z=0,067\text{mm/d}$; $a_p= 3\text{mm}$; $a_e=0,3\text{mm}$; $N=3800\text{tr/mn}$;
 $A=512\text{mm/min}$.
- IV.2** Analyse de l'usure des plaquettes pour $V_c= 190 \text{ m/min}$ et rechargement bicouche
- IV.3** Analyse de l'usure des plaquettes pour $V_c= 230 \text{ m/min}$ et rechargement bicouche
- IV.4** Analyse de l'usure des plaquettes pour $V_c= 120 \text{ m/min}$ et rechargement bicouche

Liste des figures

- I.1** Schéma structurel de l'usinabilité
- I.2** Schéma d'évaluation de l'usinabilité
- I.3** Usure présentée comme une fonction de la température
- I.4** Contraintes au niveau des surfaces usées
- I.5** Distribution générale de la température dans la zone de coupe
- I.6** Limite d'élasticité des matériaux d'outil de coupe en fonction de la température
- I.7** Principaux critères d'usure des outils
- I.8** Image interférométrique de l'effondrement d'arête d'une plaquette de fraisage
- I.9** Image interférométrique de la plaquette avec un copeau adhérent
- I.10** Image interférométrique du bec d'une plaquette avant et après usure
- I.11** Photo d'une plaquette revêtue prise au microscope MEB
- I.12** Modélisation de MERCHANT
- I.13** Formation du copeau par cisaillement dans le plan AB
- I.14** Schéma représentant le mode de calcul du paramètre industriel Ra
- I.15** Mécanisme de génération de l'arête rapportée
- I.16** Rugosité Ra en fonction du temps de coupe outils cbn
- I.17** Ondulation sur le profil de la surface usinée
- I.18** Microstructure de la surface d'un acier 32 CrMoV13
- I.19** Evolution du gradient de contrainte : Fraisage en bout de l'Inconel 718
- I.20** Modèle de déformation élastique de la surface usinée
- I.21** Rugosité Ra de la surface usinée en fonction de Vc et fz
- I.22** Evolution de l'usure VB en fonction du temps de coupe
- I.23** Performances des revêtements testés
- I.24** Evolution de l'usure VB en fonction du temps de coupe pour différentes vitesses
- I.25** Evolution de la rugosité Ra en fonction de la vitesse de coupe
- I.26** Position des matériaux de coupe
- I.27** Zone de transition et vitesse de coupe selon le matériau usiné
- I.28** Schéma de principe du procédé PTA

- II.1** Fraiseuse verticale, modèle 6H11
 - II.2** Montage de mesure des efforts de coupe
 - II.3** Eprouvettes d'essai en acier C18, C45, 100Cr6
 - II.4** Photo de l'outil fraise utilisé pour les essais
 - II.5** Détails de l'outil fraise et de la plaquette.
 - II.6** Microscope optique modèle MMN-2
 - II.7** Mise en coordonnées de la plaquette
 - II.8** a) Microscope optique du laboratoire LPMM, b) Microscope électronique à balayage (M.E.B.)
 - II.9** Rugosimètre Mitutoyo SJ 201.M.
 - II.10** Spécifications techniques du centre d'usinage
 - II.11** Eprouvettes à tester
 - II.12** a) composition chimique du stellite 6, b) vue microscopique du stellite 6
 - II.13** a) Fraise coromill 390, b) détails plaquette
 - II.14** Schéma de principe de l'usinage
 - II.15** a) Photo d'une broche avec porte outil HSK, 10) bloc électronique Watt Pilote
 - II.16** Microscope de mesure de l'usure vidéo (TESA- Visio 300 DCC)
-
- III.1** Courbes d'usure des plaquettes P35 pour les huit régimes testés, fraisage de l'acier C18, a) Plaquettes P35 non revêtues, b) Plaquettes P35 revêtues
 - III.2** Valeurs des composantes de l'effort de coupe pour les huit essais Fraisage de l'acier ISO C18
 - III.3** Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée pour les huit essais Fraisage de l'acier ISO C18
 - III.4** Courbes d'usure des plaquettes P35 pour les huit régimes testés, fraisage de l'acier C45, Plaquettes P35 revêtues
 - III.5** Valeurs des composantes de l'effort de coupe pour les huit essais Fraisage de l'acier ISO C45

- III.6** Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée pour les huit essais Fraisage de l'acier ISO C45
- III.7** Evolution de l'usure VB moyenne en fonction du temps pour les huit régimes de coupe (Usinage de l'Acier ISO 100Cr6)
- III.8** Courbes des composantes de l'effort de coupe pour les huit essais Fraisage de l'acier ISO 100Cr6
- III.9** Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée pour les huit essais Fraisage de l'acier ISO 100Cr6
- III.10** Evolution de l'usure en dépouille pour le régime minimal pour les trois types d'acier testés
- III.11** Valeurs des tenues de coupe pour le régime minimal pour les trois types d'acier testés
- III.12** Evolution de l'usure en dépouille pour le régime maximal pour les trois types d'acier testés
- III.13** Valeurs des tenues de coupe pour le régime maximal pour les trois types d'acier testés
- III.14** Composantes de l'effort de coupe moyen pour les trois nuances d'acier testées à 60m/min, variation de l'engagement radial a_p .
- III.15** Composantes de l'effort de coupe moyen pour les trois nuances d'acier testées à 60m/min, variation de l'engagement radial a_p .
- III.16** Composantes de l'effort de coupe moyen pour les trois nuances d'acier testées à 150m/min, variation de l'engagement axial a_p
- III.17** Composantes de l'effort de coupe moyen pour les trois nuances d'acier testées à 150m/min, variation de l'engagement axial a_p
- III.18** Rugosité Ra de la surface usinée pour les trois aciers testés
- III.19** Influence du temps d'usinage sur la rugosité de la surface usinée carbure revêtue et non testées avec ($V_c= 150\text{m/min}$; $f_z= 0,02\text{mm/dent}$; $a_p= 1\text{mm}$, $a_e=98\text{mm}$)
- III.20** Influence du temps d'usinage sur la rugosité de la surface usinée Usinage de l'acier ISO C45 ($V_c=150\text{m/min}$ $f_z=0.02\text{mm/d}$ $a_p=1\text{m}$)
- III.21** Influence du temps d'usinage sur la rugosité de la surface usinée Usinage de l'acier ISO 100Cr6 ($V_c=150\text{m/min}$ $f_z=0.02\text{mm/d}$ $a_p=1\text{m}$)
- III.22** Photo M.E.B : Morphologie de l'usure de la plaquette P35 non revêtue

- III.23** Photo M.E.B : Montrant le détachement du revêtement TiN
- III.24** Photo M.E.B : Usure du bec de la plaquette et altération de la couche revêtue sur la face d'attaque
- III.25** Photo M.E.B : Usure de la plaquette par écaillage début du phénomène d'abrasion
-
- IV.1** Puissance broche
- IV.2** Puissance axe x et axes-y
- IV.3** Puissance axe z, $V_c = 120$ m/min
- IV.4** Evolution des puissances pour V_c 190 m/min et rechargement monocouche
- IV.5** Evolution de l'usure VB pour V_c 190 m/min et rechargement monocouche
- IV.6** a),b),c),d),e) Images interférométriques de l'usure des plaquettes testées
- IV.7** Evolution des puissances pour V_c 190 m/min et rechargement PTA bicouche
- IV.8** Evolution de l'usure VB pour V_c 190 m/min et rechargement bicouche
- IV.9** Images interférométriques de l'usure des plaquettes a) 1030 ; b) H13A
- IV.10** Evolution des puissances pour V_c 230 m/min et rechargement PTA bicouche
- IV.11** Evolution de l'usure VB pour $V_c = 230$ m/min et rechargement bicouche
- IV.12** Evolution des puissances pour V_c 120 m/min et rechargement PTA bicouche
- IV.13** Evolution de l'usure VB pour V_c 120 m/min et rechargement bicouche
- IV.14** Images interférométriques de l'usure des plaquettes a) 1030 ; b) H13A Revêtement bicouche $V_c = 120$ m/min
- IV.15** Evolution des puissances en fonction des vitesses de coupe
- IV.16** Courbe de Taylor application (Plaquette H13A à revêtement nanocristallin)
-

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

AB	Plan de cisaillement
a_e	Profondeur de coupe radiale [mm]
a_p	Profondeur de passe [mm]
COM	Couple Outil Matière
CVD	Chemical Vapor Deposition
D	Diamètre de l'outil [mm]
E_c	Energie de cohésion [J]
f	Avance par tour [mm/tr]
fz	Avance par dent [mm/dent]
$F_c - F_y$	Effort de coupe : composante dans la direction de coupe [N]
$F_f - F_x$	Effort de coupe : composante dans la direction d'avance [N]
$F_p - F_z$	Effort de coupe : composante dans la direction de profondeur de passe
F_s	L'effort de cisaillement [N]
H_E	Taux de contact [%]
h_u	Hauteur d'usure sur la face de dépouille de l'outil [mm]
Hv	Dureté en échelle Vickers
HB	Dureté Brinell
HR _B	Dureté en échelle Rockwell bille
H Rc	Dureté en échelle Rockwell cône
Kc	Effort spécifique de coupe
K_B	Largeur du cratère [mm]
K_M	Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil [mm]
K_t	Conductivité thermique
K_T	Profondeur d'un cratère [mm]
Lc	Longueur de l'arête de coupe [mm]
L_{AB}	Longueur du plan de cisaillement [mm]
n	Vitesse de rotation de la broche [tr/min]
N_p	Nombre de passes
P	Puissance de coupe [KW]
P_M	Puissance motrice [KW]

Liste des abréviations et symboles

PVD	Power Vapor Deposition
PTA	Plasma torche by arc transfered
Q	Volume de matière enlevé par unité de temps [mm^3/min]
r	Rapport avance axiale / épaisseur du copeau
r_p	Rayon de bec d'une plaquette [mm]
Ra	Rugosité arithmétique (μm)
Sc	Section du copeau [mm^2]
S_u	Surface d'usure sur la face de dépouille de l'outil
T	Tenue en service de l'outil [min]
t_1	l'avance ou épaisseur du copeau non déformé [mm]
t_2	Epaisseur du copeau [mm]
Tu	Temps d'usinage entre deux points de mesure d'usure plaquette [s]
UGV	Usinage grande vitesse
UTGV	Usinage très grande vitesse
v_x	Composante suivant l'axe x du champ des vitesses [m/min]
v_y	Composante suivant l'axe y du champ des vitesses [m/min]
V_B	Hauteur de l'usure en dépouille
V_{BC}	Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée
Vc	Vitesse linéaire de coupe [m/min]
Vf	Vitesse d'avance linéaire [m/min]
V_N	Profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale
V_u	Volume usiné (copeau) entre deux points de mesure d'usure [mm^3]
w	Largeur de coupe [mm]
z	Nombre de dents d'une fraise
α	Angle de dépouille
β	Angle de coupe
γ	Angle d'attaque
χ_a	Angle de direction auxiliaire
χ_r	Angle de direction principal
η	Rendement de la machine outil
θ_c	Température de coupe
σ	Contrainte normale [daN/mm^2]

Liste des abréviations et symboles

τ	Contrainte tangentielle [daN/mm ²]
ϕ	Angle de cisaillement
λ	Angle de frottement moyen à l'interface
μ	Coefficient de frottement
γ	Glissement dans la zone de cisaillement

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution continue du progrès technologique à imposé, et impose, d'importants changements d'orientation dans les techniques de fabrication mécanique, qui dérivent surtout de la nécessité de réaliser une production de haute qualité à des prix plus bas, avec des matériaux ayant des caractéristiques mécaniques toujours plus élevées et par conséquent plus difficiles à usiner.

En effet malgré le développement pris par d'autres techniques de mise en forme, l'usinage par enlèvement de copeaux conserve une importance économique considérable. 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 [32]. 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.

Les progrès réalisés dans le domaine de l'automatisation des machines-outils et le développement exceptionnellement rapide des techniques de commande numérique au cours de ces dernières années exigent des conditions optimales de coupe avec la nécessité d'avoir une stabilité de plus en plus élevée des paramètres et des critères sur lesquels ils influent. L'introduction dans le programme de commande numérique des machines-outils de données précises sur l'usinabilité qui augmentent la fiabilité du processus de coupe.

C'est pour cela que dans le domaine de la coupe des métaux le principal souci des chercheurs est celui de l'étude de l'usinabilité. Ces études déjà très nombreuses n'ont toujours pas permis de lever tout les mystères qui entourent cette caractéristique complexe qui est l'usinabilité. Pendant longtemps, c'est le tournage qui a bénéficié des développements les plus significatifs en matière d'outils et de recherche sur l'usinabilité. Actuellement le fraisage en tant que procédé d'usinage prend le devant en bénéficiant, parfois de conceptions modifiant fondamentalement la manière de travailler.

L'étude expérimentale que nous présentons dans ce document comporte deux parties distinctes. La première partie concerne le fraisage conventionnel dont les travaux expérimentaux ont été réalisés au sein du laboratoire d'usinage du département de mécanique de l'université d'Annaba et le laboratoire de coupe des métaux du département de mécanique

de l'université de Guelma. La deuxième partie de l'étude concerne le fraisage à grande vitesse des superalliages réalisée au laboratoire de physique et de mécanique des matériaux (LPMM) de l'université Paul Verlaine de Metz. Les recherches expérimentales ont été réalisées avec la collaboration de l'équipe de l'usinage grande vitesse du Centre d'Innovation et de Recherche Franco-allemand Associé de Metz (CIRAM).

Le premier chapitre introductif concerne l'étude bibliographique. Dans un premier temps, il permet de rappeler les bases scientifiques du phénomène de la coupe des métaux et ses particularités dans le procédé de fraisage. Dans un deuxième temps les travaux marquants dans le domaine du fraisage conventionnel des matériaux durs et le fraisage à grande vitesse sont présentés et analysés. Ces travaux permettent de mieux situer notre travail propre dans le vaste domaine du fraisage qui est peu exploré.

Dans le deuxième chapitre, nous indiquons les caractéristiques des matériaux testés ainsi que les caractéristiques des outils de coupe utilisés dans cette étude. Nous exposons l'ensemble des dispositifs expérimentaux utilisés pour mener cette recherche. Les équipements matériels et logiciels sont présentés ainsi que les techniques et méthodes de mesures mises en œuvre après avoir recherché les points de fonctionnement c'est-à-dire les conditions de coupe satisfaisantes.

Le troisième chapitre expose les résultats obtenus en termes de durée de vie des outils et évolution de l'usure par rapport au temps, de qualité de surfaces usinées et la variation des efforts de coupe. Nous nous sommes attachés à l'observation de l'usure des plaquettes par une technique d'investigation très développée utilisant le microscope électronique à balayage et l'analyse sous rayon X, le microscope optique d'interférence pour l'exploration des surfaces en 3D. Une étude de modélisation de l'usure des différents outils fraise à plaquettes employées dans le processus de coupe en se basant sur les méthodes de planification des expériences.

Dans le quatrième chapitre, nous nous attachons à l'observation des résultats des essais réalisés en fraisage conventionnel et le fraisage grande vitesse. Ce chapitre traite de l'analyse des résultats obtenus et l'étude de la modélisation des paramètres technologiques étudiés en fraisage. Il s'agit ici de proposer une image de l'évolution de l'usure des plaquettes en matériaux de coupe modernes. A partir de l'évolution des paramètres caractéristiques liés à cette image les modèles classiques sont reconsidérés pour juger de leur applicabilité.

Dans la dernière partie les conclusions de notre contribution sont soulignées. Le fraisage des matériaux durs avec les matériaux de coupe moderne est résumé avec les perspectives qu'ouvre cette étude expérimentale.

Problématique

De nos jours, les industries de fabrication ont pour objectifs, primordiaux, la réduction des coûts d'exploitation ainsi que l'amélioration de la qualité du produit. Dans les procédés d'usinage, par enlèvement de matière, le coût de l'opération d'usinage et la qualité du produit final sont des contraintes nécessaires à prendre en compte dans un environnement de plus en plus compétitif, où les investisseurs exigent un meilleur rendement de leurs investissements.

L'évolution continue des techniques d'usinage et les progrès remarquables réalisés en matière d'analyse de fabrication notamment dans le domaine des réglages des machines-outils automatiques et à commande numérique exigent des données très précises sur les paramètres du régime optimal de coupe. Ces données sont actuellement plus que nécessaires pour les techniciens de la programmation. Ils leur permettent d'augmenter la productivité des machines-outils sans être obligé d'arrêter le processus d'usinage pour le ré affûtage ou le changement de l'outil usé. La diversité des matières à usiner (composition chimique, caractéristiques mécanique, aptitude à la coupe), nécessite pour répondre aux conditions exigées des données très précises sur l'usinabilité de tel ou tel matériau.

L'intérêt de cette étude est la détermination de l'usinabilité de différentes nuances d'aciers testés au cours du fraisage conventionnel en se basant sur les critères d'évaluation qui sont la tenue de l'outil de coupe, les efforts qui accompagnent le processus et la qualité de la surface usinée. La détermination de l'usinabilité des superalliages par le fraisage à grande vitesse comme étant un nouvel axe qui contribue au développement de la recherche dans le domaine du prototypage rapide et la fabrication des outillages de forge.

Pour répondre à ces exigences et contribuer directement à l'enrichissement des résultats déjà obtenus, nous avons décidé de réaliser une étude relative à l'usinabilité des matériaux de plus en plus dur particulièrement l'acier de différentes nuances au cours du fraisage. L'outil de coupe étant une fraise équipée par des plaquettes en matériaux de coupe modernes.

ETUDE ET ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 INTRODUCTION

Depuis leur apparition, les techniques d'usinage ont subi de multiples améliorations. Les procédés de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de rester en phase avec les exigences industrielles, quelles soient économiques ou écologiques. Aujourd'hui, l'ingénieur de fabrication se doit donc de pouvoir répondre à une multitude de questions afin de réaliser rapidement des pièces avec une bonne qualité et à moindre coût.

Par exemple, dans le cas de l'usinage :

- ✓ Quel type de machine faut-il utiliser, suffira-t-elle en termes de puissance et précision ?
- ✓ Quelles sont les conditions de coupe à utiliser pour minimiser l'endommagement des outils ou du matériau usiné ?
- ✓ Quelles sont les solutions à adopter lors de la conception des outils et dans quels matériaux doivent-ils être fabriqués pour améliorer leur durée de vie et/ou la qualité des états de surface des pièces usinées ?
- ✓ Quelles sont les propriétés mécaniques de la pièce après usinage ?
- ✓ Est-il possible d'usiner sans apport de lubrifiant ? ...

Il y aurait encore un nombre considérable de questions, dont il est difficile d'établir une liste exhaustive. L'état d'avancement des connaissances sur le plan fondamental ne peut apporter de réponse à toutes ces questions. En revanche, la technologie et les techniques d'usinage ont permis de faire évoluer et d'optimiser la production.

Ainsi sont apparus et ont évolués en même temps que l'informatique, des centres d'usinage entièrement robotisés. L'émergence récente des machines UGV a été rendue possible grâce aux progrès réalisés dans le développement des outils de coupe, aux avancées très récentes et considérables au niveau des broches des machines outils, des guidages, de transmission de mouvement, des commandes numériques, etc.

Depuis la révolution industrielle du début du siècle dernier, les machines outils ont donc considérablement évoluées afin de répondre à des exigences telles qu'un meilleur rendement, une plus grande sécurité, une meilleure rigidité, de plus grandes vitesses de déplacement, une puissance accrue, une amélioration de la productivité, une diminution de l'usure des outils, etc.

En contre partie, l'amélioration de toutes ces performances fait ressortir un ensemble de phénomènes dont l'ignorance ne remettait pas en cause la fabrication traditionnelle des

pièces mais dont l'importance ne peut être ignorée pour des conditions d'usinage à Grandes Vitesses où les vitesses de rotation, des outils de fraisage par exemple, deviennent très importantes.

I.2 Etude du fraisage et ses particularités

Comme il est défini le **Fraisage** est un procédé d'usinage utilisant un outil comportant des arêtes tranchantes sur sa périphérie. Le mode de travail est tel que l'arête tranchante de l'outil parcourt pendant son mouvement rotatif de coupe une partie de sa trajectoire en plein matière à usiner et le reste est une rotation à vide.

Chaque dent de la fraise travaille de la même manière. Nous pouvons donc classer ce mode d'usinage dans le travail par **coupe interrompue [1, 2, 3,4,7]**.

Dans la coupe interrompue, le travail du matériau usiné est accompagné de chocs.

Aujourd'hui, toutefois 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 quantité de métal sous forme de copeaux. Les avantages du fraisage sont un rendement élevé, un bon fini de surface et une haute précision, ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la génération des différentes formes. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des gorges, mais son efficacité en contournage va croissante grâce à l'utilisation des techniques **CNC (Computerized Numerical Control)**.

Le fraisage est en passe de devenir une méthode d'usinage de plus en plus universelle, disposant d'une gamme toujours plus étendue de machines, de systèmes de commande et d'outils de coupe. Par exemple, les centres d'usinage utilisent largement le fraisage et ont donc besoin, dans ce domaine, d'une grande diversité d'outils. Le fraisage s'effectue donc sur différents types de machines, allant des fraiseuses conventionnelles dont la conception date du début du siècle jusqu'aux machines CNC sophistiquées à axes multiples **[1, 2, 3,4]**

I.3 L'usinabilité:

L'usinabilité ou capacité d'un matériau d'être travaillé par outil de coupe est une propriété mécanique très complexe.

Cette complexité vient du fait que l'usinabilité est une propriété qui est sensible à un nombre important de paramètres, que l'on peut mettre en évidence par le schéma suivant:

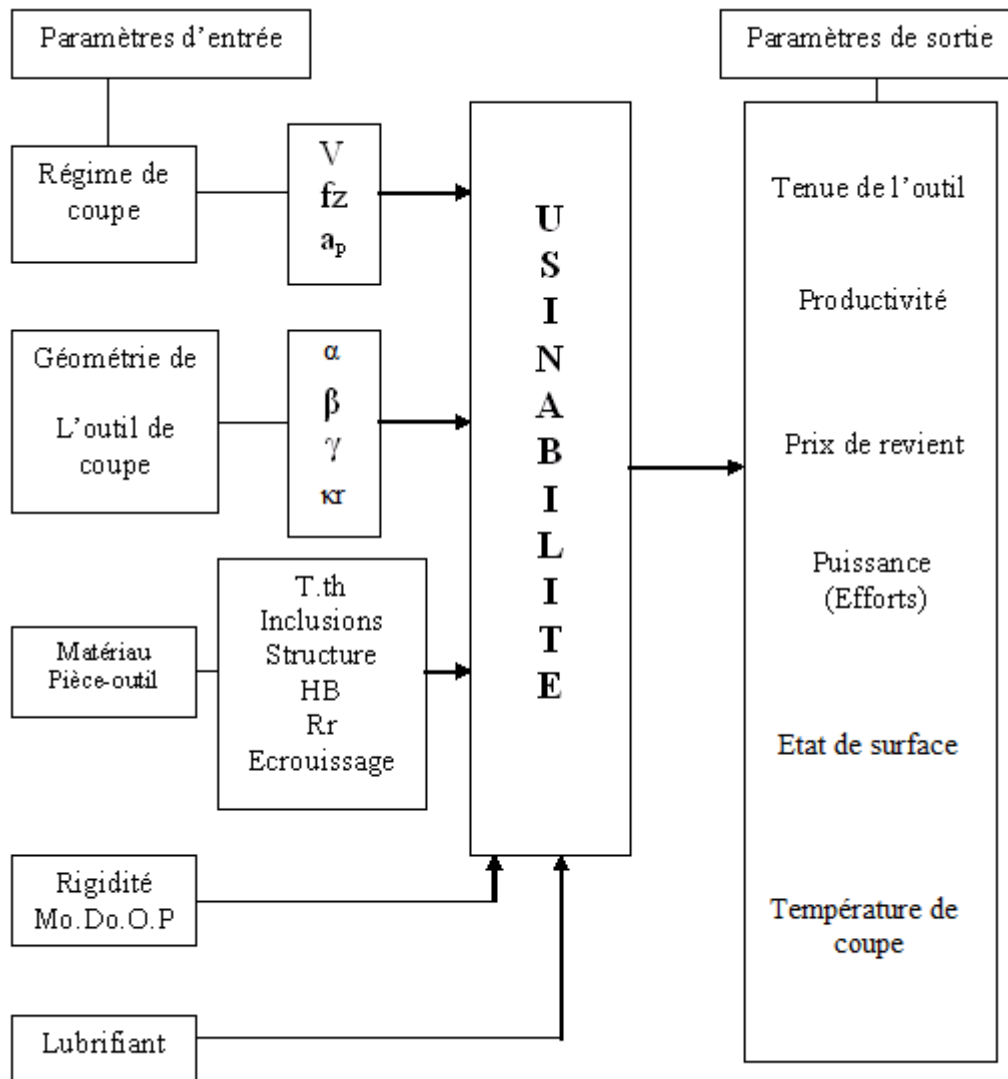


Figure I.1 – Schéma structurel de l'usinabilité

L'usinabilité n'est donc pas une propriété scientifiquement définie et régie par les lois mathématiques fixées. C'est une caractéristique qui devient insignifiante si les conditions dans lesquelles elle a été appréciée ne sont pas précises [4, 7, 9]

Plusieurs chercheurs dans le domaine de la coupe des métaux définissent l'usinabilité comme étant l'aptitude à la coupe par enlèvement de copeaux est l'ensemble de propriétés complexes dont l'effet peut se ramener à l'obtention de deux valeurs principales:

- Précision des cotes macro et micro géométriques,
- Prix de revient [5].

L'usinabilité est l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage.

L'usinabilité n'est pas une propriété simple de la matière, elle n'est pas directement mesurable. C'est une propriété mécanique complexe désignant la facilité plus ou moins grande d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux à une forme et cote fixées.

L'acier d'usinabilité optimale est celui permettant enlèvement le plus rapide de la plus grande quantité de copeaux avec un fini de surface satisfaisant et sans réaffûtage de l'outil [4, 5, 6]

I.3.1 Evaluation de l'usinabilité

En construction mécanique, la réalisation d'un produit quelconque nécessite l'emploi de divers matériaux. La connaissance exacte des différentes caractéristiques du matériau est primordiale. Lorsqu'un matériau est transformé par usinage (enlèvement de copeaux), il est important de connaître son usinabilité. Plusieurs chercheurs et constructeurs notamment dans le domaine de la métallurgie ont étudié et évalué cette caractéristique.

L'usinabilité des matériaux est évaluée par un certain nombre de critères. Ces critères ont été classés différemment par les chercheurs en coupe des métaux, le schéma général sur lequel l'ensemble des études s'est basé pour évaluer l'usinabilité d'un matériau peut-être comme suit :

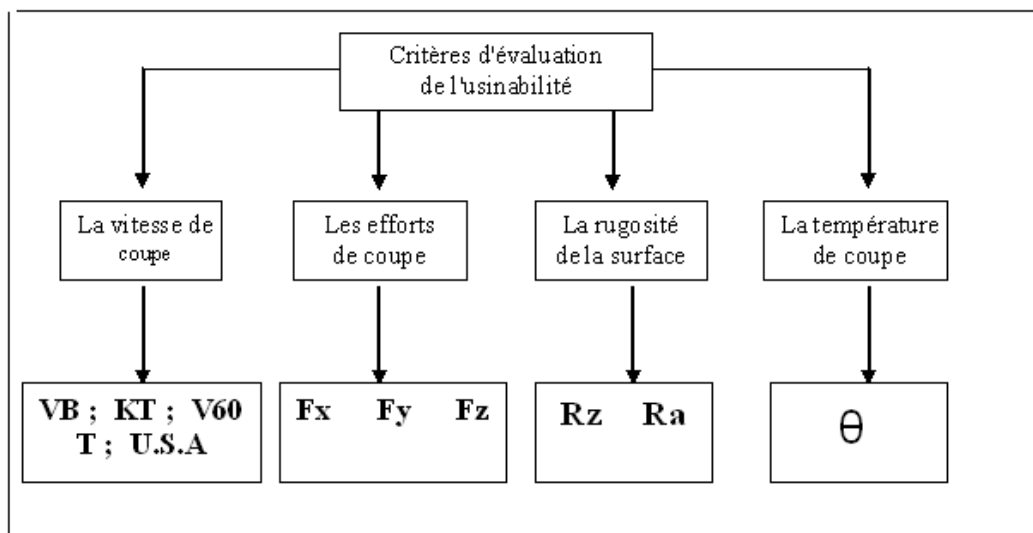


Figure I.2 – Schéma d'évaluation de l'usinabilité [4,7, 9]

Les conclusions présentées par les chercheurs montrent que les critères d'évaluation de l'usinabilité peuvent être ordonnés comme suit :

- La vitesse de coupe,
- Les efforts de coupe,
- La rugosité de la surface usinée,
- La température de coupe.

Les différentes études présentées par les spécialistes de la coupe des métaux et relatives à l'évaluation de l'usinabilité des matériaux montrent que parmi tout les critères, le

critère de la vitesse de coupe caractérisé par la tenue de l'outil ou par un critère dépendant soit (VB, KT ou V60) est le critère prépondérant de l'évaluation de l'usinabilité ; les autres critères sont considérés comme complémentaires [4, 5, 6, 9].

I.3.2 Méthodes d'évaluation de l'usinabilité

L'usinabilité est une caractéristique mécanique complexe propre au matériau. Elle est évaluée par la réalisation d'un certain nombre de tests (essais pratiques). Ces tests consistent à l'étude de l'influence des critères considérés sur l'usinabilité.

Pour déterminer l'usinabilité d'un matériau, plusieurs méthodes ont été mises au point. Les plus significatives sont celles basées sur la mesure de l'usure plus réalisables en pratique. Selon la durée de l'essai nous avons deux types :

- Essais de longue durée,
- Essais rapides (accélérés).

I.4 Critère principal d'évaluation de l'usinabilité

I.4.1 Endommagement des outils de coupe

Dans le domaine de la coupe des métaux, l'usure des outils de coupe constitue un phénomène important qui a une influence sur l'état de surface de la pièce, son état de contraintes superficielles, le respect des côtes dimensionnelles demandées, les efforts de coupe, la puissance nécessaire et naturellement la durée de vie de l'outil. Les fabricants sont depuis toujours intéressés par le choix du meilleur outil pour un usinage donné et la détermination des conditions de coupe optimales.

Certes, les lois d'usure des outils de coupe de nature phénoménologique telle que la loi de Taylor (1905) ont permis aux industriels de prévoir l'évolution de l'usure en fonction du temps pour des paramètres de coupe déterminés. Cela a permis l'estimation de la durée de vie de l'outil et l'optimisation des paramètres de coupe pour une meilleure tenue de l'outil. Cependant, ces lois restent valables seulement dans le cas d'usure stable, sont limitées à des cas particuliers d'usure et demandent des expérimentations longues et coûteuses pour en fixer les paramètres. Ces techniques posent problème à l'heure actuelle où on est face à une grande variabilité de matières usinées et de types d'outils.

Une autre voie consiste à étudier et modéliser les phénomènes générant l'usure de l'outil de coupe : physiques, chimiques ou mécaniques. En fait, l'usure d'un outil est un phénomène complexe. Sa description en tant que phénomène global est certainement utopique. Cependant pour mieux l'appréhender et la quantifier, il faut distinguer les mécanismes et les traiter au mieux tout en recherchant les possibilités de leur conjonction.

L'usure des outils de coupe est localisée au niveau de l'arrête tranchante, la face de coupe et les faces en dépouille de l'outil de coupe où les contraintes, la déformation, la vitesse et la température sont au-dessus des seuils critiques [6,7, 9]. Ces sollicitations mécaniques et thermiques très sévères provoquent l'usure de l'outil et sa détérioration dans un temps relativement limité. L'usure d'un outil commence dès le début du processus d'usinage, c'est-à-dire qu'un outil, n'ayant travaillé que quelques secondes est déjà usé à un certain point.

L'usure est un processus de destruction des couches superficielles de la partie active d'un outil, qui conduit à la modification progressive de sa forme et de son état de surface. C'est aussi l'altération de la zone de coupe qui se traduit par la modification de la structure macro géométrique.

L'usure se manifeste suivant trois principaux mécanismes à savoir :

- L'usure due aux frottements mécanique (usure à faible vitesse et température élevée).
- L'usure par adhésion (micro soudure) phénomène qui prend naissance aux environs des températures 180°C à 360°C
- L'usure par diffusion (arrachement intermoléculaire dans la zone de coupe) c'est une pénétration mutuelle observée au niveau des températures de 600°C à 700°C

Pendant le processus de coupe les recherches ont montré que dans la zone de contact les trois phénomènes ont lieu simultanément [7,8, 9, 10, 14]

L'usure de l'outil de coupe est définie par la norme ISO 3685-1977 comme « un changement de la forme de l'outil par rapport à sa forme initiale, se produisant lors de la coupe et résultant de la perte progressive ou du déplacement de matière de l'outil ». La géométrie de l'outil peut être modifiée de différentes façons : par écoulement plastique (pratiquement sans perte de masse), par usure (lorsque l'outil subit une perte continue de masse), par écaillage (lorsque l'outil subit une perte discontinue de masse), par défaillance instantanée (brutale) et finalement par formation d'une arête rapportée.

L'usure des outils est aussi un processus de modification des couches superficielles, qui conduit à des changements de propriétés de l'outil, ce qui diminue sa capacité d'usinage.

L'usure des outils a une influence sur le déroulement de l'usinage, notamment sur :

- L'état de surface (de la surface usinée) ;
- Les contraintes résiduelles ;
- Le respect des cotes dimensionnelles ;
- Les efforts d'usinage et la puissance consommée ;
- La fragmentation du copeau.

L'augmentation de l'usure conduit à une dégradation des paramètres précédents. Le respect d'une limite acceptable de ces paramètres exige la connaissance de l'évolution des différentes formes d'usure des outils pour prédire le moment où la partie active devra être changée ou réaffûtée [14].

L'usure est générée par plusieurs mécanismes : physiques, chimiques ou mécaniques, indépendants ou non. En fait, l'usure considérée comme un phénomène global est très difficile à décrire du point de vue quantitatif. Il en résulte que les différentes approches théoriques sont faites à partir d'hypothèses simplificatrices tenant à dissocier les processus mis en jeu pour mieux les appréhender. Les usures d'outils peuvent être décrites de plusieurs manières :

- Par leur situation sur l'outil: usure en dépouille, sur la face de coupe, etc.
- Par l'aspect de l'usure : usure en cratère, usure en entaille, écaillage, fissures en peigne, effondrement d'arête, déformation plastique ;
- Par le mécanisme d'usure : adhésion, abrasion, diffusion, etc. ;
- Par le paramètre de mesure de l'usure: V_B , K_T , V_B , etc. [14].

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

La prédominance d'un des mécanismes ou l'effet combiné de plusieurs d'entre eux dépend à la fois du type d'opération d'usinage, des conditions de coupe et des propriétés physico-chimiques des matériaux mis en jeu. Les phénomènes tribologiques aux interfaces contrôlent alors la nature et la sévérité des usures. Par exemple, quand la température à l'interface outil-copeau atteint des valeurs suffisamment élevées, l'adhésion et l'abrasion font généralement place aux phénomènes de diffusion, (Figure I.3)

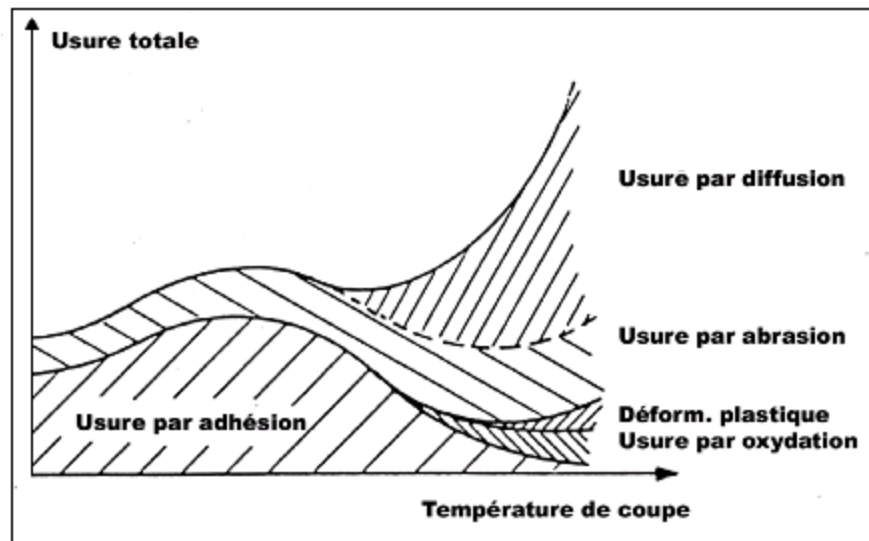


Figure I.3 - Usure présentée comme une fonction de la température [12, 13]

La figure I.4 montre la distribution approximative des contraintes normales et tangentielles au niveau des surfaces d'usure de l'outil de coupe. La contrainte normale, σ_n , est due à l'action des forces normales le long de la face de coupe, de l'arrête tranchante et de la face en dépouille. La contrainte tangentielle, τ agit le long des surfaces de l'outil, elle est associée aux processus de cisaillement par adhérence et par glissement. Au niveau de la zone d'adhérence, la force normale est si élevée que le copeau a tendance à adhérer plutôt qu'à glisser sur la surface de coupe et se sépare périodiquement suivant les plans de fracture par cisaillement. Cela induit une contrainte de cisaillement égale à la limite d'écoulement plastique du matériau écroui de la pièce usinée, τ_y . L'existence et la taille de la zone d'adhérence dépendent à la fois de la grandeur des forces normales et du coefficient de frottement le long de ces surfaces.

Les zones de glissement sont gouvernées par les forces de frottement, qui varient en fonction de l'effort normal et du coefficient de frottement. Le frottement de glissement à l'interface outil-copeau est intense et conduit à des températures élevées. Cette zone est appelée zone de cisaillement secondaire. Au niveau de l'interface outil-pièce, le frottement est moins énergétique. Sous l'action des forces de frottement, la couche superficielle de la pièce à usinée est fortement comprimée, la structure du matériau se modifie et un état de contrainte subsiste. L'amplitude et l'état des contraintes au niveau de la zone de coupe varient aussi en fonction du temps, ce qui provoque la rupture par fatigue de l'outil.

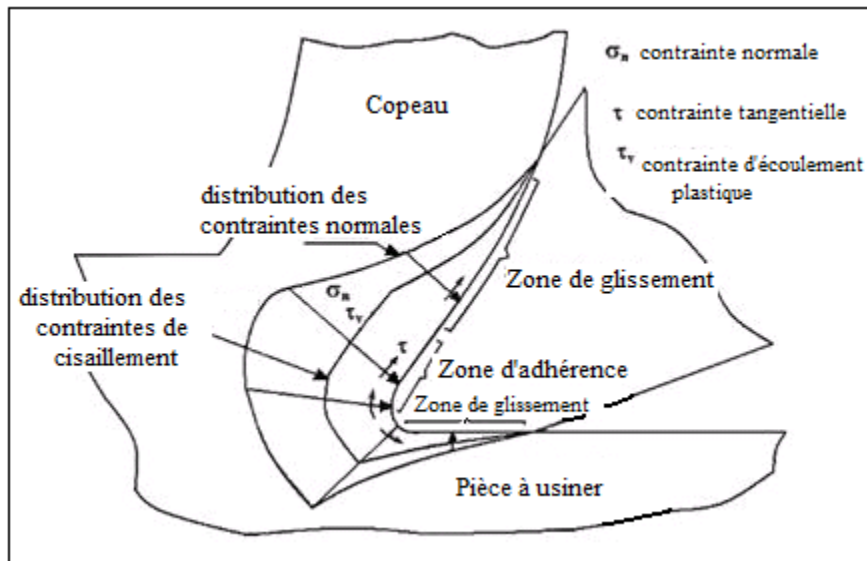


Figure. I.4 - Contraintes au niveau des surfaces usées, d'après [11,52].

L'amplitude de la vitesse de coupe et de la vitesse de copeau et les contraintes de cisaillement déterminent la quantité d'énergie thermique dégagée par unité de surface au niveau des interfaces outil-copeau et outil-pièce. L'amplitude de la vitesse de cisaillement provoque un taux élevé de déformation au niveau de la zone de cisaillement primaire et de la zone d'adhésion. Le volume du matériau écroui par cette vitesse de déformation conduit à une augmentation du dégagement d'énergie thermique.

La différence entre le taux d'énergie thermique dégagée et le taux d'énergie thermique dissipée détermine la température dans la zone de coupe. La dissipation de l'énergie thermique dépend des conductivités thermiques des matériaux de l'outil et de la pièce à usiner. Elle dépend également de la capacité calorifique de la pièce, qui est fonction de sa taille et de sa chaleur spécifique. Si un fluide de coupe est utilisé, sa conductivité et le coefficient de transfert convectif ont une influence significative sur l'énergie thermique dissipée. La figure I.5 montre la distribution typique de la température au niveau de la zone de coupe. Au cours de l'usinage à grande vitesse des métaux avec des outils en aciers rapides supérieurs, la température atteinte au niveau de l'interface outil-copeau est de l'ordre de 750°C. Dans le cas des outils en carbure fritté, cette température dépasse 1200°C. Avec l'augmentation de la température la dureté, la résistance mécanique et la stabilité chimique

diminuent. La figure I.6 montre le changement de la limite d'élasticité en fonction de la température de trois matériaux courants d'outil de coupe [15].

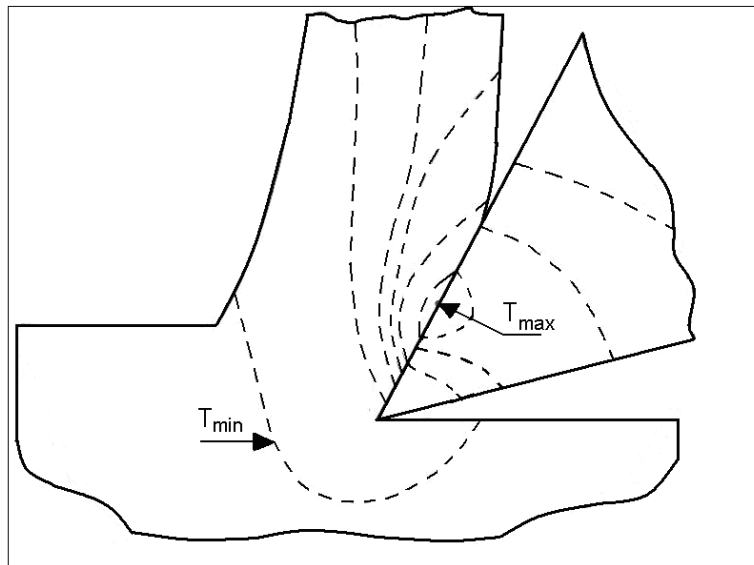


Figure I.5 - Distribution générale de la température dans la zone de coupe, [11, 16].

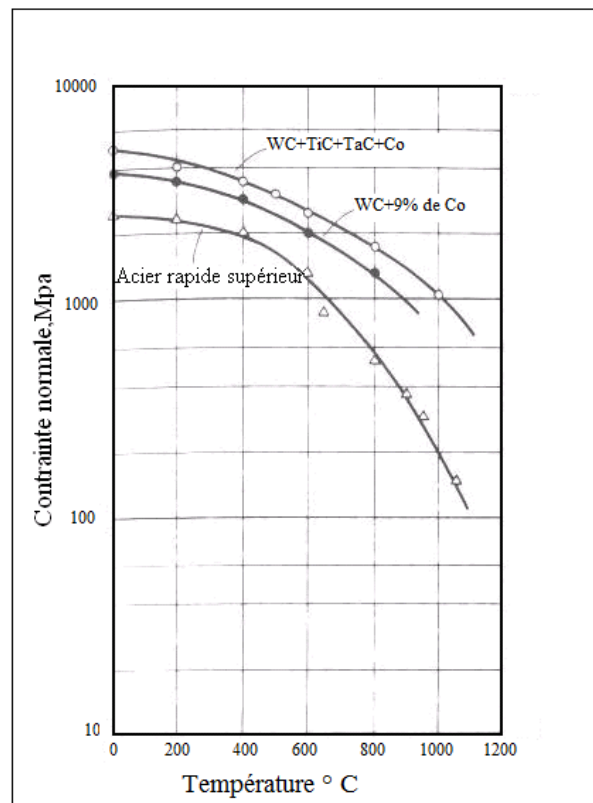


Figure I.6 - Limite d'élasticité des matériaux d'outil de coupe en fonction de la température, d'après [11].

L'usure est souvent définie comme la quantité de matière perdue par l'outil. Lorsque l'usure se caractérise par la formation d'un cratère (formé par abrasion, adhésion ou diffusion) sur la face de coupe ou l'apparition de bandes striées sur la face en dépouille, des critères de durée de vie peuvent être établis à partir d'observations directes sur l'outil.

Sur la face de coupe, deux mesures sont habituellement faites pour évaluer le niveau de l'usure en cratère. La première est la profondeur du cratère notée KT et la deuxième est la distance du centre du cratère à partir de l'arête de l'outil notée KM (Figure 1-7).

Le frottement de la pièce contre la face en dépouille fait apparaître une zone d'usure frontale, dont la hauteur VB est plus ou moins régulière. Une entaille de hauteur VN peut également apparaître sur l'arête tranchante de l'outil affaiblissant considérablement cette dernière.

Il est également possible d'évaluer l'état d'endommagement d'un outil de coupe à partir de critères indirects basés sur les performances ou la qualité de l'usinage. Ainsi, l'état de surface et les tolérances géométriques des pièces peuvent servir d'indicateurs du niveau d'usure. En perçage, on peut par exemple définir la durée de vie d'un foret par le nombre de trous percés respectant certains critères de qualité.

D'autres systèmes de surveillance sont également mis au point pour informer l'opérateur sur l'état d'endommagement de l'outil au cours de l'usinage. Ils sont basés sur le contrôle de l'évolution des efforts de coupe ou de la température mesurée dans les zones de coupe. Ces dernières années, des méthodes de surveillance d'usure par l'étude des signaux d'émission acoustique se sont également développées. Les signaux étudiés proviennent des ondes générées par la libération brutale d'énergie durant la déformation de matière, [17].

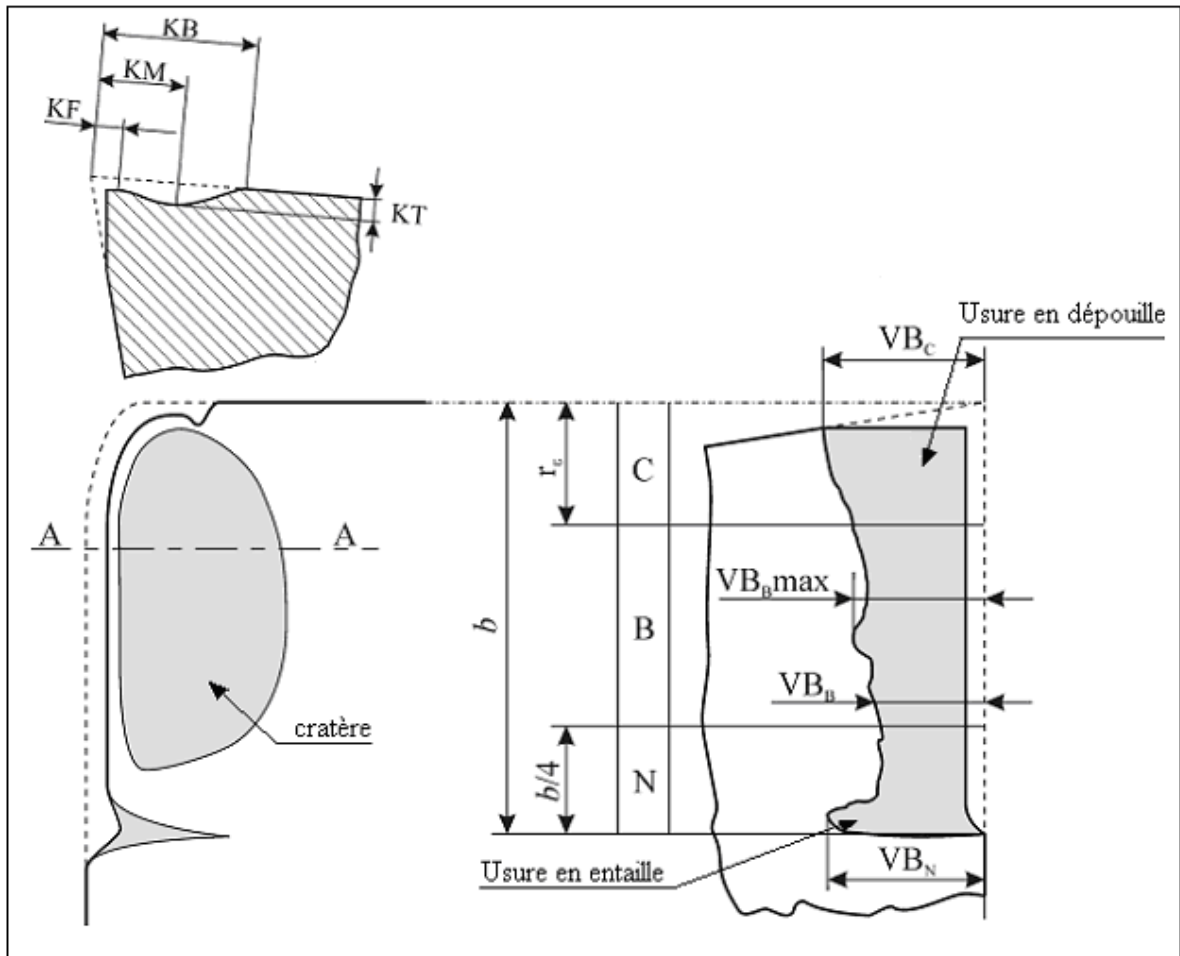


Figure I.7 - Principaux critères d'usure des outils, (extraits de norme ISO 3856).

Les critères usuellement utilisés pour les outils en carbures et notamment ceux recommandés par la norme en vigueur sont classés en deux catégories :

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

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

I.4.2 Mécanismes d'usure

- Usure par abrasion

L'usure par abrasion se caractérise par la formation de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou dans la direction du copeau qui glisse le long de la face de coupe [18]

. L'usure par abrasion apparaît donc à la fois sur la face de coupe et sur la face de dépouille des outils. Ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure. Elles peuvent être présentes dans la pièce sous la forme d'inclusions et de précipités ou provenir de l'outil lui-même par d'autres mécanismes d'usure telle que l'adhésion. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage. L'usure par abrasion est l'usure dominante quand le contact à l'interface outil-copeau est essentiellement du glissement. L'usure par abrasion étant le type idéal d'usure, peu de choses demandent donc à être modifiées dans le processus d'usinage lorsqu'elle se manifeste. Cependant, certaines nuances ou certains revêtements possèdent la propriété d'offrir une résistance supérieure à l'usure, notamment aux plus grandes vitesses de coupe. Lorsque l'outil s'use par abrasion, passer à l'une de ces nuances ou à l'un de ces revêtements a toutes les chances de prolonger sa durée de vie.

C'est là le seul type de défaillance progressive qui soit tolérable puisque aucune plaquette ne peut assurer une tenue éternelle.

- **Usure par adhésion : arête rapportée et attrition**

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

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

L'évacuation des fragments de copeaux adhérents ou de l'arête rapportée peut s'accompagner d'arrachement d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle

s'est constitué le dépôt, ce phénomène d'usure est appelé attrition. Il est encore plus néfaste vers la fin de l'usinage au moment où l'outil se désengage de la pièce et l'arête rapportée expulsée.

Le mécanisme de formation d'arête rapportée est encore mal connu, mais il est généralement associé au phénomène d'écrouissage de la matière qui semble être prédominant dans la formation du copeau aux faibles vitesses de coupe.

D'une certaine manière, la formation d'arête rapportée peut être un problème facile à éradiquer et, qui plus est, profitable. En effet, la solution peut consister, tout simplement, à augmenter la vitesse de coupe, ce qui aboutit à améliorer la productivité. On sait qu'une arête rapportée se forme par soudure de la matière de la pièce sur l'outil. Le copeau atteint une température permettant de le rendre "collant" mais, à ce stade, il se refroidit suffisamment vite pour adhérer à la plaquette. Les solutions possibles consistent à prendre les mesures nécessaires pour éviter que le copeau n'atteigne une telle température ou bien, au contraire, pour obtenir que cette température monte encore plus afin d'éviter qu'il se refroidisse avant d'avoir quitté l'outil. [18, 19, 20]

Pour empêcher que le copeau ne s'échauffe suffisamment pour se souder, on peut essayer d'utiliser un arrosage. D'autres solutions consistent à utiliser un angle radial ou axial plus positif afin de réduire l'effort de coupe ou bien à sélectionner une nuance revêtue mieux appropriée. Le revêtement peut diminuer la friction tout en limitant la tendance à une réaction chimique entre l'outil et la pièce.

A l'inverse, on obtient un plus fort échauffement du copeau en accroissant la vitesse de coupe. Accroître la vitesse et /ou l'avance peut être la solution pour générer dans le copeau le surplus de chaleur suffisant pour éviter la formation par soudage d'une arête rapportée.

Elle est due à un accroissement de la température du copeau qui le rend collant et se soude sur la plaquette de coupe. Elle est facile à éliminer par modification de la vitesse de coupe, voire par arrosage. A l'inverse, on obtient un plus fort échauffement du copeau en accroissant la vitesse de coupe. Accroître la vitesse et /ou l'avance peut être la solution pour générer dans le copeau le surplus de chaleur suffisant pour éviter la formation par soudage d'une arête rapportée.

- **Usure par diffusion**

La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène d'usure qui ne peut se produire qu'à des températures élevées. Ces zones de températures élevées se situent à l'endroit du frottement du copeau sur l'outil. De plus, ce sont aussi des zones de forte pression car le copeau applique des contraintes sur l'outil.

Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil au copeau. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil.

Aux vitesses de coupe très élevées, les phénomènes de diffusion prédominent. Sous l'effet de la température et de la pression, les atomes diffusent de l'outil vers le copeau ou vice-versa. Dans le cas des aciers, l'usure par diffusion a été expérimentalement mise en évidence par l'existence de gradients de concentration des différents éléments de l'outil dans les copeaux et par l'observation de la formation rapide d'un cratère sur la face de coupe de l'outil. La dégradation des outils WC-Co pendant l'usinage d'un acier par diffusion mutuelle du cobalt et du carbone de l'outil et du fer de la pièce usinée [17, 18,19].

Le cobalt migrant vers le copeau change le potentiel chimique du carbone dans l'austénite et vient se localiser à l'interface pour former un nouveau carbure dispersé ($Fe_xCo_yW_z$) C aux dépens des carbures initiaux WC. La couche intermétallique formée, de petites fissures sont amorcées sous la forte pression exercée à la surface de l'outil. L'écoulement continu du copeau sur la surface de l'outil s'accompagne alors d'une décohésion des grains de carbures les plus superficiels. La couche d'alliage métallique ($Fe_xCo_yW_z$) C et des grains en WC de l'outil sont ainsi évacués avec le copeau créant un cratère sur la face de coupe de l'outil.

L'évolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction du temps présente en général trois stades distincts. Plus la vitesse augmente plus l'usure de l'outil est rapide. Les trois stades d'usure en fonction du temps sont représentés par la courbe de l'évolution de l'usure en fonction du temps à une vitesse V_c [11].

- Examens morphologiques de l'usure des outils de coupe

L'analyse de la morphologie de l'usure est une technique d'investigation qui est devenue très employée dans la recherche de la coupe des métaux [26, 27, 31].

L'utilisation de l'interféromètre à lumière blanche et du microscope électronique à balayage dans les investigations permet d'observer avec une grande précision la zone de coupe altérée. Les possibilités d'agrandissements conférés par le M.E.B. et l'analyse spectrale sous rayons X ont aussi permis de résoudre plusieurs problèmes relatifs aux mécanismes d'usure qui accompagnent la formation du copeau.

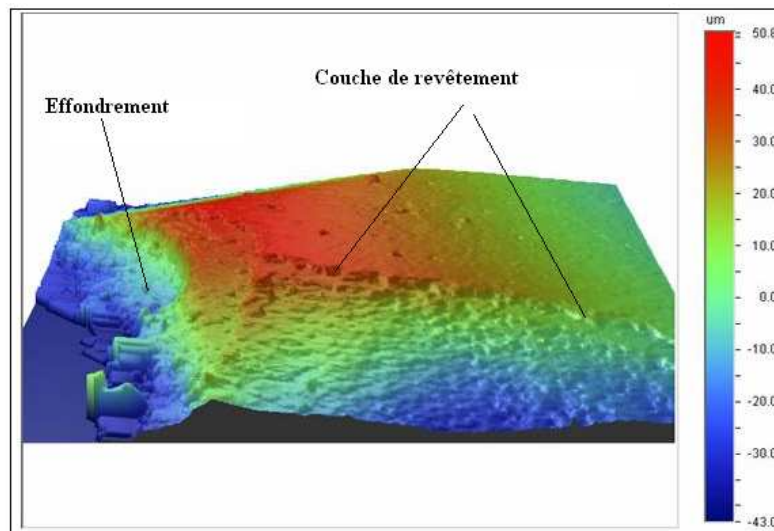


Figure I.8 Image interférométrique de l'effondrement d'arête d'une plaquette de fraisage

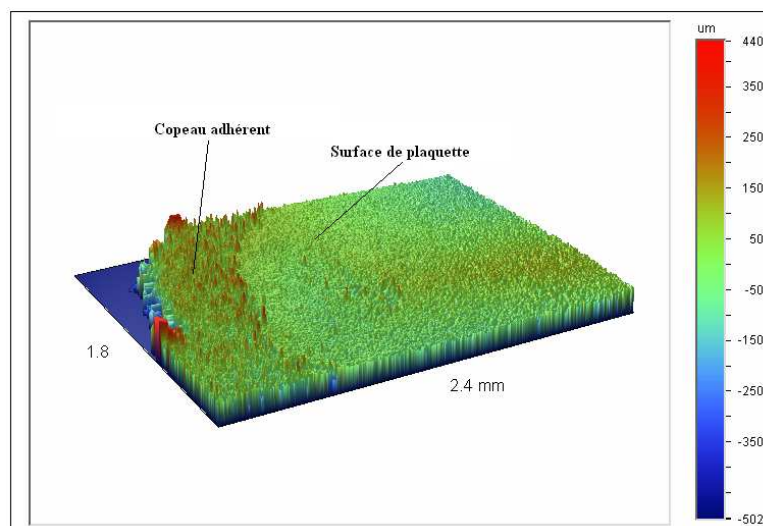


Figure I.9 Image interférométrique de la plaquette avec un copeau adhérent

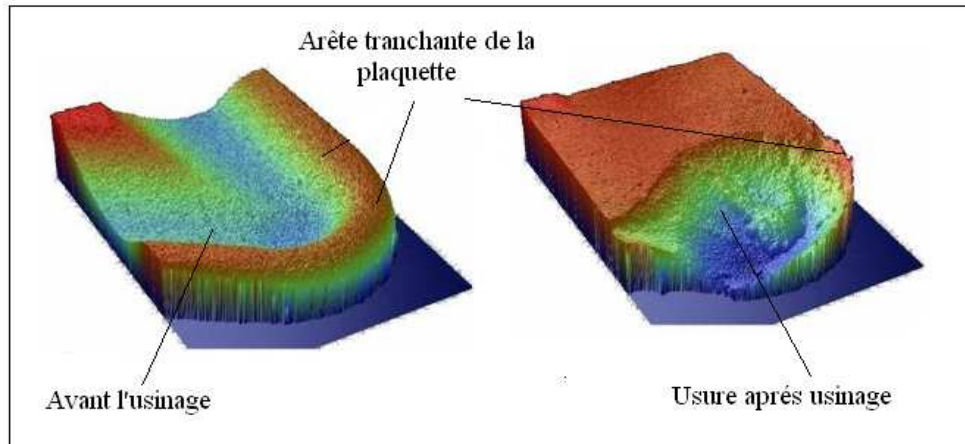


Figure I.10 Image interférométrique du bec d'une plaquette avant et après usure

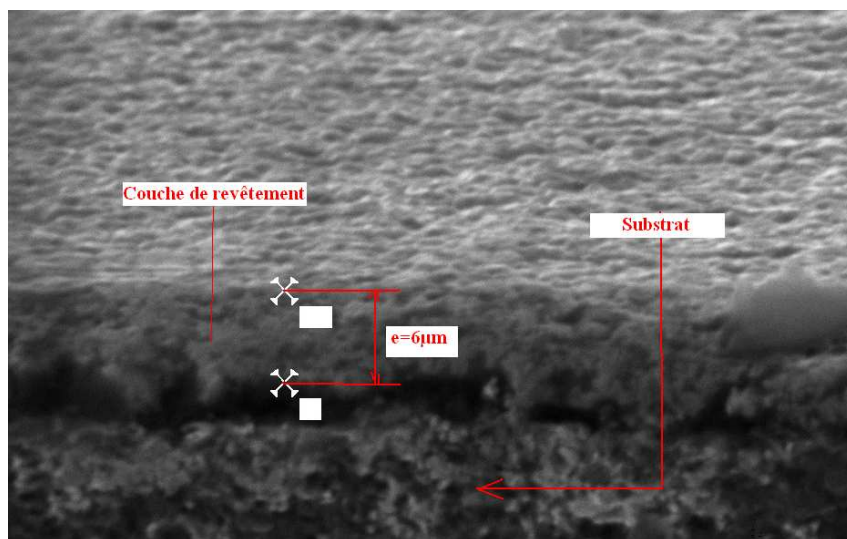


Figure I.11 Photo d'une plaquette revêtue prise au microscope MEB

L'analyse spectrale sous rayons X permet d'avoir avec une grande précision sur la composition chimique du couple outil - matière. Cette technique d'investigation a permis d'éclaircir beaucoup de points obscurs relatifs à l'étude des phénomènes d'usure, la structure micrographique de la surface usinée et la morphologie du copeau.

- Lois d'usures des outils de coupe

Au cours des dernières décennies un grand nombre de recherches a été fait concernant l'usure des outils dans les opérations de coupe en adoptant le modèle de la durée de vie de l'outil de coupe de F.W. Taylor et ses équations généralisées. Ces équations décrivent la relation entre la durée de vie de l'outil et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, etc.) et comportent quelques constantes et exposants qui doivent être déterminés expérimentalement pour un couple outil-pièce. En plus des modèles de la durée de vie des outils de coupe, des modèles de taux d'usure ont été aussi développés afin d'évaluer la résistance à l'usure de l'outil de coupe. [12,25]

Compte tenu de la complexité du phénomène d'usure de l'outil, il n'existe pas de loi mathématique simple permettant de calculer la durée de vie de l'outil de coupe. Cette durée de vie est caractérisée par le temps mis pour attendre la valeur limite du critère d'usure considéré dans des conditions données de coupe. Les trois critères généralement utilisés sont:

- La défaillance brutale : Cette défaillance est due à la déformation plastique de l'arête de coupe. Ce critère n'est employé que pour les outils en acier rapide ou en céramique.
- Usure frontale : Employé pour tous les outils, caractérisés soit par une usure frontale moyenne (VB_B) soit par l'usure frontale maximale (VB_{Bmax}). Dans ce cas la norme française NF E 66-505 définit comme valeur critique pour l'usure frontale moyenne $VB_B = 0,3$ mm et pour l'usure frontale maximale $VB_{Bmax} = 0,6$ mm.
- Usure en cratère : caractérisée par la profondeur du cratère (K_T), la norme française NF E 66-505 donne comme valeur critique de profondeur du cratère : $K_T = 0,06 + 0,3 \cdot f$.

En fait la durée de vie de l'outil est fonction des conditions de coupe, du matériau, de la géométrie de l'outil, du matériau coupé et de la lubrification. Généralement seules les conditions de coupe sont prises en considération et les lois d'usure sont établies pour des outils parfaitement définis pour un matériau usiné donné et dans des conditions de lubrification déterminées [25]. Ces lois sont de la forme :

$$T = f (V_C, f, a_P). \quad (I-1)$$

Avec:

T : La durée de vie

V_C : La vitesse de coupe ;

f : La vitesse d'avance ;

a_P : La profondeur de passe.

Vu que la vitesse de coupe est le paramètre le plus important, on trouve aussi des lois d'usure de la forme :

$$T = f(V_C).$$

Loi de Taylor

Ce modèle, établi par F.W. Taylor en 1906, est caractérisé par l'équation suivante :

$$T = C_V V^n . \quad (I-2)$$

Avec :

C_V constante, qui semble être une caractéristique du matériau à usiner et des conditions de coupe.

L'exposant n , souvent appelé coefficient de Taylor, qui est influencé par le matériau de l'outil, le matériau usiné, ainsi que le type d'usinage.

Cette loi peut s'écrire aussi sous forme de l'équation (3), ce qui permet de tracer cette loi sous forme linéaire dans un repère en coordonnées logarithmiques.

$$\text{Log}(T) = n \cdot \text{Log}(V) + \text{Log}(C_V). \quad (\text{I-3})$$

Bien que l'influence de l'avance et de la profondeur de passe ne soient pas prises en considération ce modèle est toujours très employé.

Loi de Gilbert

Ce modèle, qui date de 1950, est en fait une généralisation de la loi de Taylor pour prendre en considération l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il est caractérisé par l'équation suivante :

$$T = K \cdot V_c^k \cdot f^x \cdot a_p^y \quad (\text{I-4})$$

Loi de Kronenberg

Ce modèle, qui date de 1968 ne prend pas en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il est caractérisé par l'équation :

$$T + K = C_V V^n \quad (\text{I-5})$$

Loi de König-Depiereux

Ce modèle, qui date de 1969, tient compte de l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il est caractérisé par l'équation :

$$T = \exp(\alpha V^v, \gamma f^u, \delta a^{\lambda}). \quad (\text{I-6})$$

Remarque :

- Il est important de noter que le modèle de Taylor implique d'avoir un mode d'usure stable et reproductible. Seules les usures en dépouille et en cratère sont stables. Cependant, seule l'usure en dépouille est facilement quantifiable. Cela implique que seul le mode d'usure en dépouille peut être retenu pour définir le domaine de fonctionnement de l'outil et pour identifier les paramètres du modèle de Taylor.
- Dans la pratique, le modèle de Taylor est le seul modèle utilisé au plan industriel. La plupart du temps la complexité des autres modèles les rends très longs et donc très coûteux à identifier [14, 25].
 - Les modèles que nous proposons dans notre étude sont les modèles de Gilbert (loi de Taylor généralisée) et qui sont de la forme : $T = C \cdot V_c^{k_1} \cdot f_z^{k_2} \cdot a_p^{k_3}$ (I-7)

I.5 Critères complémentaires d'évaluation de l'usinabilité

I.5.1 Critère des efforts de coupe:

La coupe du métal suppose la pénétration de l'outil dans la pièce et le mouvement relatif de la pièce par rapport à l'outil. Au contact de la pièce avec l'outil des actions mutuelles prennent naissance sur la surface d'attaque. Pendant l'opération d'usinage, le changement de l'aspect physique de l'arête tranchante entraîne une variation des efforts agissant dans la zone de coupe. L'étude et l'approximation des efforts de coupe sont nécessaires pour choisir les outils et dimensionner le porte pièce; leurs directions permettent de déterminer le sens de déplacement des outils afin que les appuis du montage s'opposent à ces efforts.

- **Modélisation des efforts de coupe**

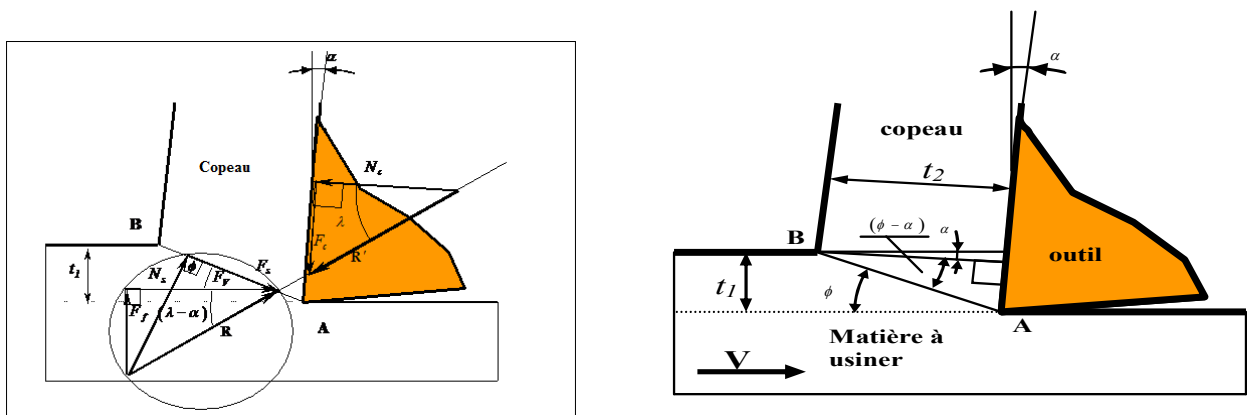


Figure I.12 : Modèle de la coupe orthogonale (Merchant 1945)

Angle de cisaillement

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad \text{avec} \quad r = \frac{t_1}{t_2} \quad (1.8)$$

Force de cisaillement

$$Fs = \tau \omega l_{AB} = \tau \frac{\omega t_1}{\sin \theta} \quad (1.9)$$

τ : est la contrainte de cisaillement, ω la largeur de coupe.

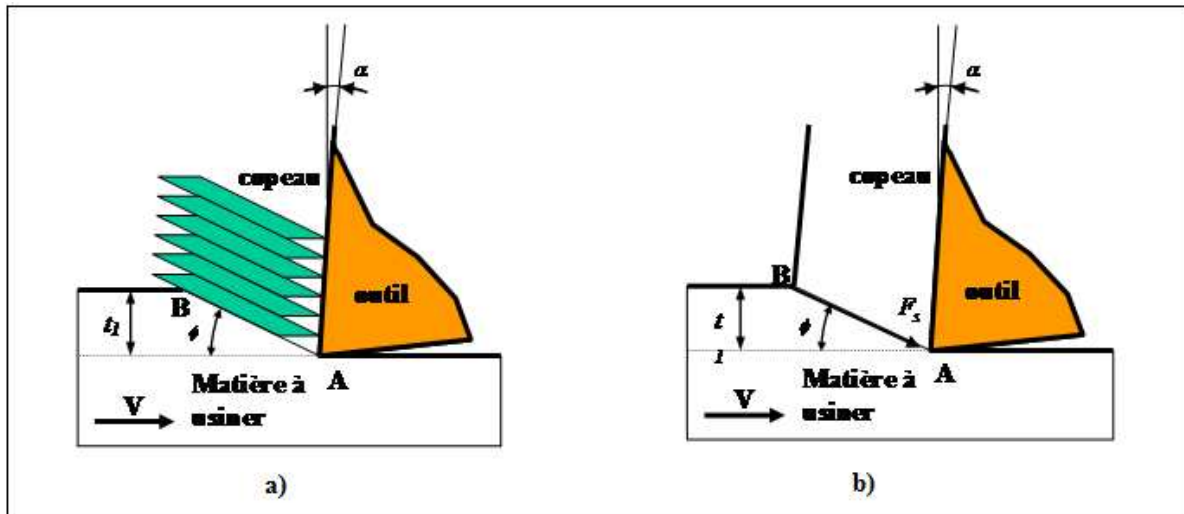


Figure I.13-a) formation du copeau par cisaillement dans le plan AB, b) Coupe orthogonale

Bien que la plupart des opérations d'usinage soient tridimensionnelles avec des géométries complexes, la coupe orthogonale est la coupe élémentaire qui regroupe tous les mécanismes de la coupe. Lors de la coupe orthogonale, la matière se déplace vers l'outil suivant une direction perpendiculaire à l'arête de coupe de l'outil, l'avance ou épaisseur du copeau non déformé, $f = t_1$, est petite devant la largeur de coupe w et le processus peut être supposé comme bidimensionnel.

Merchant [5] décrit dans son modèle la formation d'un copeau continu en coupe orthogonale, Figure I.19. Il suppose que celui-ci est le résultat d'un cisaillement intense limité à un plan appelé plan de cisaillement, incliné d'un angle ϕ (angle de cisaillement). ϕ est déterminé par minimisation de l'énergie de coupe. Les autres zones de déformation ne sont pas considérées. Le frottement à l'interface outil-copeau est choisi de type Coulomb défini par un coefficient moyen $\mu = \tan \lambda$, où λ est l'angle de frottement moyen à cet interface.

Dans le plan de cisaillement, les contraintes tangentielles sont supposées uniformes et l'effort de cisaillement F_s exercé par la matière sur le copeau est donné par l'expression :

$$F_s = \omega \tau l_{AB} \quad (I.10)$$

Où τ est la contrainte de cisaillement à l'écoulement plastique du matériau usiné. Le comportement du matériau usiné est supposé rigide parfaitement plastique et τ est alors une constante. w est la largeur de coupe, l_{AB} est la longueur du plan de cisaillement et t_1 est l'épaisseur du copeau non déformé. [28]

À partir de la connaissance de τ , du frottement $\mu = \tan \lambda$ à l'interface outil-copeau, de l'angle ϕ qui sera déterminé par la suite, les efforts de coupe et d'avance sont respectivement calculés par les relations :

$$F_V = \frac{F_S \cos(\lambda - \alpha)}{\cos(\phi + \lambda - \alpha)} - \frac{\omega \tau t_1 \cos(\lambda - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \lambda - \alpha)} \quad (\text{I.11})$$

$$F_f = \frac{F_S \sin(\lambda - \alpha)}{\cos(\phi + \lambda - \alpha)} - \frac{\omega \tau t_1 \sin(\lambda - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \lambda - \alpha)} \quad (\text{I.12})$$

L'angle de cisaillement ϕ est obtenu par la minimisation de la puissance de coupe, c'est à dire lorsque :

$$\frac{\partial(F_V V_c)}{\partial \phi} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2(F_V V_c)}{\partial \phi^2} > 0 \quad (\text{I.13})$$

L'angle ϕ correspondant est:

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \lambda}{2} \quad (\text{I.14})$$

Merchant a été le premier à développer un modèle de coupe. Ce modèle présente l'avantage d'être simple, mais il est néanmoins limité par certains points : Le cisaillement primaire se produit dans une zone d'une certaine épaisseur et non de façon brutale dans un plan. Le comportement du matériau ne peut être rigide parfaitement plastique en raison des conditions thermomécaniques sévères existant dans la zone primaire de cisaillement. Enfin, le frottement moyen à l'interface outil-copeau dépend à la fois du comportement thermomécanique du couple pièce-outil et des conditions de coupe. [28, 29]

Énergie spécifique de coupe

A partir du modèle défini précédemment, il est possible de définir la puissance nécessaire à la coupe, elle est égale à :

$$P = F_V V \quad (\text{I.15})$$

L'énergie spécifique ou effort spécifique de coupe correspond au rapport entre cette puissance de coupe et le débit-volume de matière arrivant dans la zone de formation du copeau :

$$k_c = \frac{P}{q_v} \text{ avec } q_v = V t_1 w \quad (\text{I.16})$$

ou tout simplement, elle est égale à l'effort de coupe divisé par l'aire du copeau non déformé, soit :

$$k_c = \frac{F_v}{t_1 w} \quad (\text{I.17})$$

Cette énergie spécifique ou effort spécifique de coupe dépend du matériau usiné et des conditions de coupe. Nous donnons dans le tableau ci-dessous, à titre indicatif, quelques valeurs d'efforts spécifiques de coupe.

Tableau I.1 Valeurs de l'effort spécifique de coupe

Matériau	Énergie spécifique de coupe (10^6 W/m^3) ou effort spécifique de coupe (MPa)
Alliages d'aluminium	400 - 1400
Fontes	1600 - 5500
Alliages réfractaires	3800 - 9600
Alliages base Nickel	4900 - 6800
Alliages base Titane	3000 - 4100
Aciers	1500 - 9300
Aciers Inox	2000 - 5200

Dans leurs travaux, Molinari et Dudzinski [28, 29, 30] ont modélisé la zone primaire de cisaillement, en supposant que celle-ci est assimilée à une bande d'épaisseur constante h , inclinée d'un angle ϕ par rapport à la direction de coupe.

Les hypothèses du modèle sont les suivantes :

- la déformation plastique de la matière ne se produit que dans la bande de cisaillement,
- le copeau formé est supposé continu,
- l'écoulement de la matière à travers la bande est supposé unidimensionnel et stationnaire,
- la zone secondaire de cisaillement n'est pas prise en compte, ce qui revient à supposer que le contact outil-copeau est totalement glissant, cette hypothèse est appropriée à la

grande vitesse. Le copeau est ainsi supposé indéformable se déplaçant comme un bloc rigide sur la face de coupe

- le cisaillement dans la bande est supposé adiabatique,
- le matériau usiné est supposé isotrope, viscoplastique et thermo-adoucissant. Le comportement thermomécanique est décrit par une loi de Johnson-Cook.

Les résultats des calculs avec ce modèle ont été comparés avec satisfaction aux efforts mesurés lors d'essais de coupe orthogonale de l'acier 42 CrMo4 réalisés par l'équipe de (Molinari et Dudzinski) et ceci pour une large gamme de conditions de coupe et pour différentes morphologies de copeaux, [30, 31,32].

I.5.2 Critère de la rugosité de la surface usinée:

Une surface usinée est considérée comme l'enveloppe des positions successives prises par le tranchant de l'outil durant le mouvement relatif outil-pièce. Cette définition concerne seulement l'aspect purement géométrique du processus de la formation de la surface usinée.

Une surface usinée ne peut être parfaite; elle présente généralement des défauts de très faible amplitude correspondant aux sillons laissés par l'outil. Ce sont les défauts micro géométriques qui caractérisent l'état de surface.

Chaque type d'outil de coupe laisse des traces plus ou moins caractéristiques sur la surface usinée. La direction de ces traces est influencée par la méthode d'usinage adoptée. La géométrie de la surface de la pièce peut être calculée théoriquement pour les opérations de fraisage et de tournage. Ce calcul donne une valeur approximative de ce qu'il est possible d'obtenir dans des conditions idéales, le résultat pratique étant bien entendu affecté par un certain nombre de paramètres intervenant dans le processus. De plus, la stabilité dynamique et statique du système dans son ensemble revêt une importance décisive pour la qualité de surface obtenue [33, 34, 35].

- Principaux facteurs affectant l'outil:

Les facteurs affectant l'outil sont :

La stabilité, le porte-à-faux, la géométrie de coupe, la matière de la pièce, l'usure de l'outil les conditions de coupe, la formation des copeaux, la température de coupe.

- Principaux facteurs affectant la machine

La stabilité, l'environnement, l'adduction de liquide de coupe, l'état de la machine, la puissance et la rigidité.

- Principaux facteurs affectant la pièce

La stabilité, la qualité de la matière usinée, la configuration, la fixation, l'état de l'ébauche, les phases d'usinage précédentes, les tolérances de cotes et de forme.

Les générateurs de l'état de surface étant les outils et les paramètres de coupe.

Dès les débuts de l'usinage industriel, il a fallu définir la qualité de la surface usinée. Outre les aspects dimensionnels, il est aussi nécessaire de définir l'état de rugosité de la surface. Le critère le plus couramment utilisé dans le milieu industriel est le paramètre statistique R_a [ISO 4287, ISO 4288]

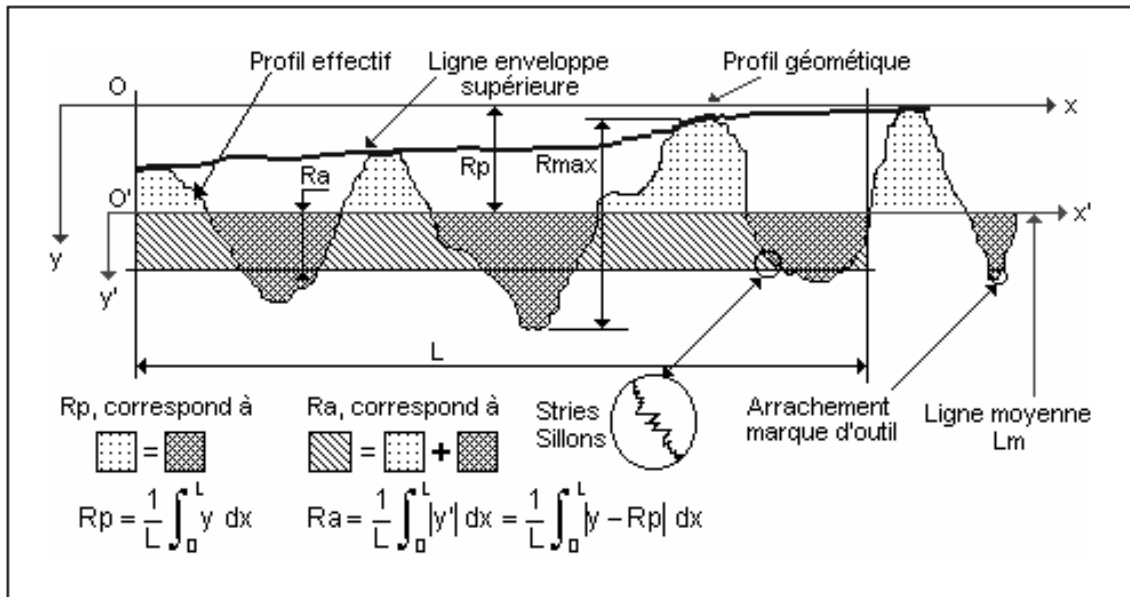


Figure I-14 Schéma représentant le mode de calcul du paramètre industriel R_a

Ce critère est contesté par les chercheurs [36, 37, 38], car il ne représente en fait que la moyenne d'un signal redressé (équivalent en électricité au courant efficace). La pertinence de cette contestation se répand petit à petit dans le milieu industriel. Une preuve en est donnée par les tableaux qui inventorient les grandeurs tribologiques importantes retenues par une entreprise du secteur automobile (Peugeot par exemple). On peut se rendre compte que le critère R_a n'est pas indiqué, mais que d'autres comme le R_p sont préconisés.

Le critère R_a reste encore le plus répandu dans l'industrie, seules les entreprises de pointe utilisent d'autres paramètres pour caractériser les états de surface des pièces usinées car sa sensibilité permet de faire la distinction entre des surfaces de qualités différentes.

Le niveau de qualité de surface demandé à l'usinage, a évolué dans le temps, notamment pour l'usinage d'aciers traités thermiquement avec l'avènement des outils pour matériaux durs. Cependant, le procédé de finition dit de tournage dur ne pouvait se développer car le coût des outils (plus de 120 € l'arête de coupe en 1994 pour des outils en carbure, céramique ou en, C-BN) rendait ce procédé trop onéreux par rapport à la rectification. Les industriels ne se sont intéressés à cette technique d'usinage qu'à partir de la crise du début des années 90.

Pendant cette période de récession économique, les procédés devaient être encore plus performants pour rester compétitif. Les progrès réalisés dans la fabrication des outils ouvraient alors la voie au tournage dur comme tournage de finition et la rectification cylindrique. Désormais, il est courant de voir des pièces ayant une qualité de surface de $0,15 \mu\text{m}$ (Ra) obtenue directement par usinage sans rectification.

D'autres caractéristiques de la surface ont évolué rapidement dans le temps. Dans le cas de l'usinage traditionnel comparé à l'Usinage à Grande Vitesse (UGV), l'état des contraintes à la surface de la pièce varie fortement. Cette variation des contraintes résulte de deux effets de natures totalement différentes [39, 40] :

- Effet thermique dépendant de l'évacuation des calories durant l'usinage,
- Effet mécanique de génération de contraintes résiduelles par enlèvement de matière qui dépend de la vitesse d'usinage.

- **Influence des paramètres géométriques de l'outil :**

- La géométrie de la partie active de l'outil par la valeur des angles et formes des plaquettes

La microgéométrie de l'outil est également un facteur important alors que la rugosité de l'arête produite pendant l'affûtage ou par l'usure s'imprime dans la surface travaillée (en coupe libre) La rugosité des surfaces actives de l'outil intervient indirectement, modifiant les conditions de coupe par variation des efforts, du coefficient de frottement et des facteurs provoquant la naissance de l'arête rapportée.

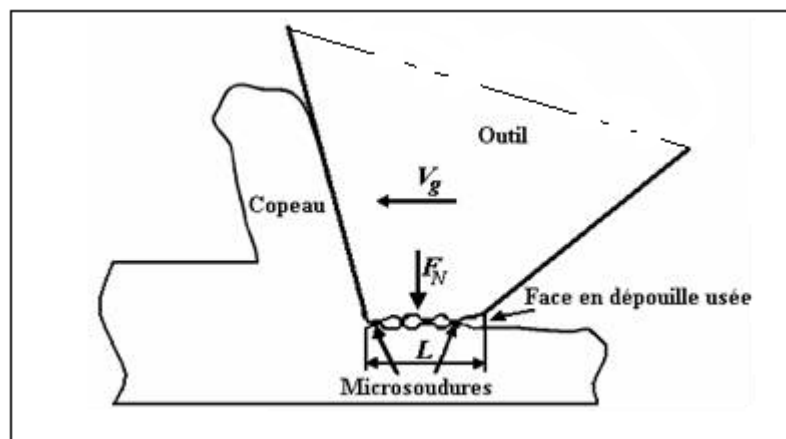


Figure I.15- Mécanisme de génération de l'arête rapportée.

L'influence de l'arête rapportée est favorable aux travaux d'ébauche par la protection qu'elle offre contre l'usure par érosion et nuisible en ce qui concerne l'état de surface à cause des vibrations et des ressauts que produit son évacuation. On cherchera donc à travailler soit à très basse vitesse, soit à vitesse élevée. [36]

- **Influence des paramètres du régime de coupe**

Le facteur dont l'influence sur la rugosité est primordiale est la **vitesse de coupe**, son rôle est lié à l'existence de l'arête rapportée.

L'état de surface évolue au cours de l'usinage avec l'usure de l'outil. Si les conditions de coupe sont excessives et conduisent à une détérioration du bec on observe une augmentation régulière de la rugosité avec la durée d'usinage. [38]

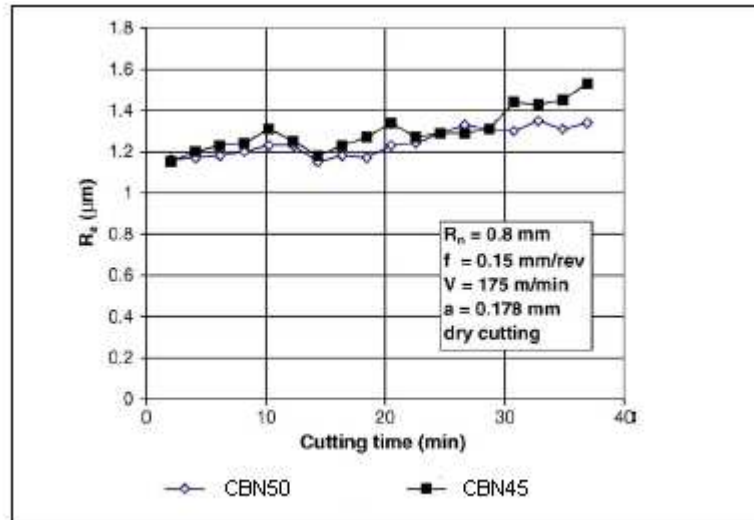


Figure I.16 Rugosité R_a en fonction du temps de coupe d'après [36]

- **profondeur de passe :**

Les expériences montrent que la profondeur de passe a_p n'affecte pas les aspérités dans leur géométrie tant que $a_p > R_a$ ce qui est vérifié en pratique.

- **Influence du lubrifiant :**

Les trois fonctions principales d'un fluide de coupe sont :

La réduction du coefficient de frottement pièce/outil, éviter la formation de l'arête rapportée, évacuer la chaleur dégagée. D'autres fonctions auxiliaires sont à rattacher aux trois premières:

Le pouvoir anticorrosif pour les machines et les pièces pendant le stockage, l'évacuation des copeaux. La réduction du coefficient de frottement, une opération d'usinage nécessite le contact entre la pièce et l'outil. Le fluide de coupe contribuera à une lubrification mixte équilibre lubrifiant/refroidissement. Il empêche la formation d'arête rapportée.

L'opération de coupe engendre le contact outil/pièce ; ce contact provoque une élévation de la température et une résistance mécanique élevée ; la conjonction de ces deux phénomènes (température et charge) conduit à un ramollissement du métal avec, pour conséquence, le collage des surfaces des particules métalliques sont arrachées de la pièce et se soudent au métal de l'outil; il en résulte une formation d'amas métallique sur l'arête de l'outil et un mauvais état de surface de la pièce. Les conséquences principales de l'arête rapportée sont une diminution de l'arrivée d'huile au point de contact outil/pièce et un mauvais état de

surface. Comme nous l'avons vu plus haut, le contact outil/pièce/copeaux engendre un dégagement de chaleur important. Le lubrifiant devra donc évacuer ces calories, c'est-à-dire qu'il devra être très mouillant, le plus fluide possible, avoir un débit suffisant.

Dans ce domaine, les fluides aqueux ont un très net avantage sur les huiles entières, la conductivité thermique de l'eau étant quatre fois plus élevée que celle de l'huile minérale. Le refroidissement et la lubrification qu'assurent les fluides de coupe, atténuent l'usure de la partie active de l'outil en réduisant le frottement entre les surfaces en contact. Cela se traduit par une amélioration de l'état de surface.

Aux grandes vitesses de coupe, le liquide d'arrosage n'agit ni par refroidissement, ni par lubrification. Des états de surfaces remarquables ont été obtenus par refroidissement à l'oxygène, la formation d'oxydes métalliques entraîne une diminution spectaculaire des frottements et les déformations plastiques, c'est avec cet artifice que l'on a obtenu les rugosités plus faible.

- **Influence de la machine:**

Une grande rigidité de la machine-outil est évidemment 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).

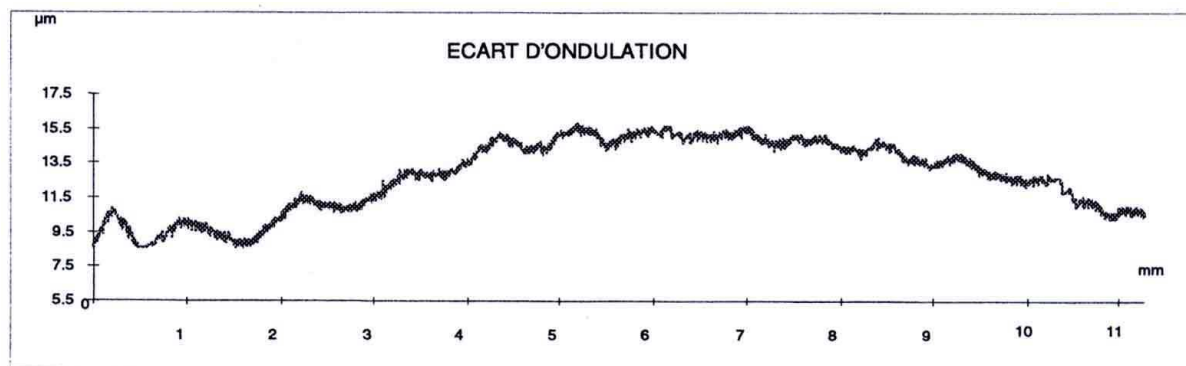


Figure I.17 Ondulation sur le profil de la surface usinée

- **Influence des facteurs métallurgiques:**

L'aspect métallurgique de la surface usinée a été pris en considération à peine ces dernières années, surtout pour la grande influence que les altérations de la couche superficielle exercent sur la fiabilité de la pièce mécanique.

L'étude de l'aspect métallurgique de la surface usinée, examinée, doit être complétée par la recherche sur les autres caractéristiques physiques de la couche superficielle et précisément:

- La microstructure des différentes couches superficielles de l'élément usiné.
- L'érouissage produit, par le procédé de coupe, aux différentes profondeurs, au-dessous de la surface et les conséquentes variations de la dureté.

-Les tensions résiduelles et leur répartition dans les couches superficielles et dans le noyau

I.6. Microstructure et contraintes résiduelles après usinage

Les changements possibles de microstructure à la surface extrême de la pièce, s'ils ont lieu, et les contraintes résiduelles sont dus à un écrouissage localisé de la couche superficielle ; la cause thermique étant écartée compte tenu de la faible température de la pièce tout au long de l'usinage. Ils sont causés par l'action mécanique du rayon de bec et de la surface de dépouille, sous la forme de talonnement de l'outil. Les contraintes résiduelles naissent aussi à partir du moment où il y a des arrachements de matière.



Figure I.18 Microstructure de la surface d'un acier 32 CrMoV 13 (Hv270) usinée à l'outil céramique à 300 m/min et 0,2 mm/tr D'après [42].

Calvez [42], montre que la microstructure dépend du couple outil-matière. Pour les couples acier/cermet et acier/carbure, la surface de la pièce ne présente pas de zone de frottement comparable à la bande blanche déjà observée sur le copeau. Par contre, pour le couple acier/céramique, une fine bande blanche apparaît, d'épaisseur comprise entre un et deux microns. On observe également une légère modification de la courbure des lignes d'alignement des défauts. A moins de 20 microns de la surface, elles ont tendance à se courber et devenir tangentes à la frontière.

L'analyse micrographique montre que les directions principales des contraintes résiduelles sont les directions axiales et circonférentielles. Les cisaillements sont quasi nuls. L'extrême surface est en traction, puis en sous-couche (entre 20 et 50 mm) le matériau est en forte compression. Elle ne se stabilise pas avant 300 mm de profondeur. Les valeurs des contraintes circonférentielles restent supérieures à celles des contraintes axiales.

Le niveau des contraintes de surface usinée croît lorsque la vitesse de coupe et l'avance augmentent. La profondeur du gradient de contraintes augmente en plus avec la dureté du matériau. L'écrouissage de la surface suit l'augmentation de l'avance et dépend de la nature du matériau de coupe. En prenant des vitesses de coupe supérieures, on diminue la profondeur

écrouie. C'est pourquoi, le frottement joue un rôle fondamental pour les propriétés mécaniques finales de la pièce. Mais l'inaptitude des modèles existants à le traiter rend la prévision de l'état final difficile à établir.

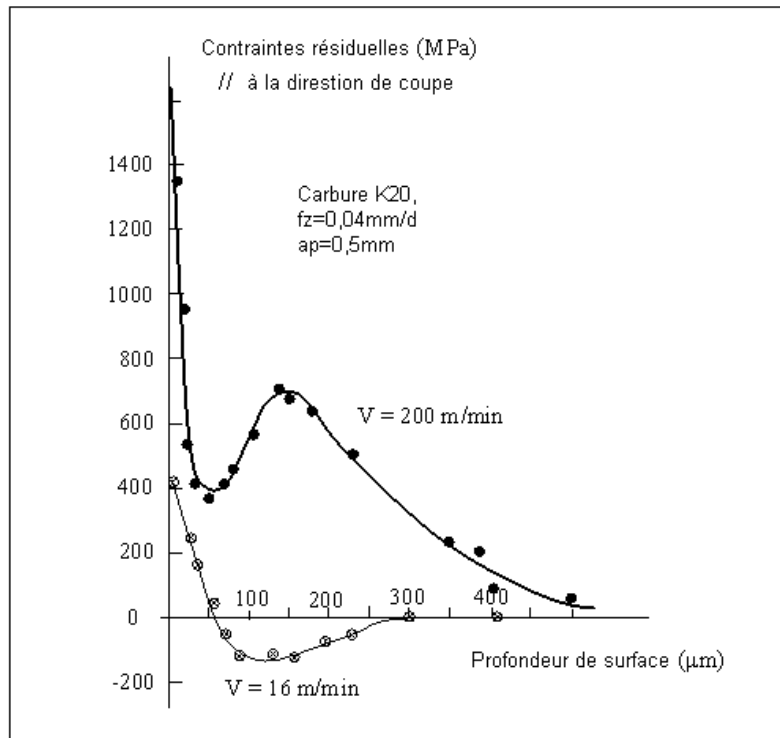


Figure I.19 Evolution du gradient de contrainte : Fraisage en bout de l'Inconel 718 avec un outil en carbure K20, comparaison des profils des contraintes résiduelles obtenus en usinage à grande vitesse (200 m/min, à sec) et à vitesse conventionnelle (16 m/min à sec). [40,41,52]

D'un autre côté, Nakayama [45] propose un modèle de déformation élastique de la pièce au passage de l'outil. Il permet d'approcher l'erreur dimensionnelle due au retour élastique après le passage de l'outil ou aux oscillations de l'ensemble outil – porte outil.

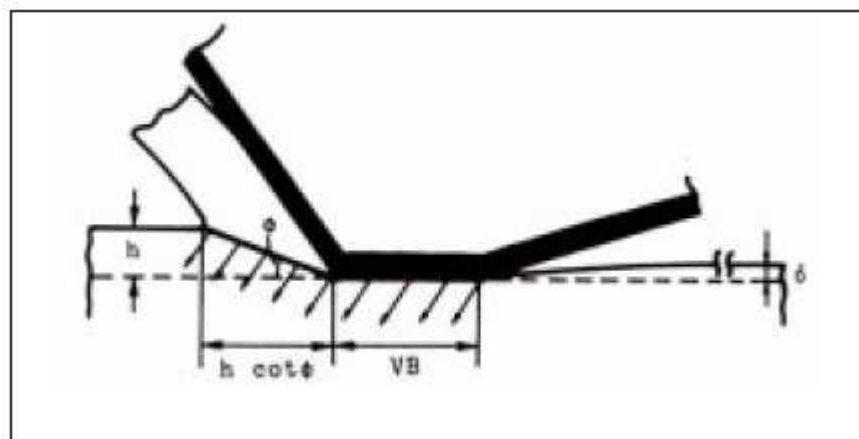


Figure I.20 Modèle de déformation élastique de la surface usinée [45]

Les métaux durs sont caractérisés par un rapport élevé entre la dureté et le module d'élasticité. Les contraintes élevées à la pointe de l'outil génèrent des retours élastiques variant entre un et dix microns. Pour minimiser cette erreur il va falloir trouver un compromis avec l'état de contraintes obtenues. En effet, elle peut être limitée en diminuant la profondeur de passe et la longueur du contact sur la dépouille, ou en augmentant l'angle de cisaillement. Les conséquences de chaque modification sont donc contradictoires.

I.7 Analyse de quelques travaux réalisés par les chercheurs:

H.K. Tonshoff, W.Kaestner et al, [46] ont étudié l'usinabilité de cinq types d'aciers forgés en coupe interrompue (Fraisage et Tournage interrompu).

Des expériences d'usinabilité en coupe interrompue ont été réalisées sur quatre (04) types d'acier traités à chaud et un (01) acier de grande dureté. Ces aciers possèdent une microstructure différente, ils ont été obtenus par le traitement à chaud suivant différents procédés. Les essais d'usinabilité sont effectués à vitesses et avances variables, ils sont arrêtés lorsque l'usure de l'outil atteint la valeur de l'un des deux critères $VB= 0,35\text{mm}$ ou la profondeur du cratère $KT=0,1\text{mm}$. Les critères sont choisis conformément à la norme I.S.O DIS 6888 1.

L'acier 42CrMoS4 a donné la tenue la plus faible par rapport aux autres aciers. C'est le plus difficile à usiner.

H. Shao et al [41], ont étudié l'usinabilité de l'acier inoxydable avec 10% de chrome à l'aide de fraises à plaquettes carbure revêtues TiCN/TiN multicouches. Les critères d'évaluation considérée dans cette étude sont la durée de vie de l'outil et la rugosité de la surface usinée. Différentes vitesses de coupe et avances ont été testées pour deux carbures M20 et M30 avec deux géométries de coupe bien définies (ISO Standard APCT et APCR). La profondeur de passe est maintenue constante. La figure I.36 montre l'évolution du critère de rugosité R_a en fonction de la vitesse de coupe et l'avance pour les deux géométries testées.

Pour la géométrie APCT des plaquettes testées, le graphe a) montre que la valeur de la rugosité R_a de la surface usinée augmente progressivement dans l'intervalle des vitesses de (70-100m/min). Dans l'intervalle des vitesses de (100-140m/min), la rugosité R_a diminue d'une manière très significative notamment pour la valeur de f_z la plus faible. Le graphe b) montre l'évolution de la rugosité R_a de la surface usinée en fonction de l'avance par dent pour différentes vitesses de coupe. La rugosité R_a augmente avec l'augmentation de la valeur de l'avance par dent.

Pour la géométrie APCR des plaquettes testées, le graphe c) montre que la rugosité Ra atteint une première valeur maximale de 2,7 μm au voisinage de la vitesse de coupe de 90m/min. Une deuxième valeur maximale de 2,2 μm est atteinte au voisinage de 120m/min. La valeur la plus faible de la rugosité est obtenue à la vitesse de coupe de 140m/min avec une valeur d'avance par dent de 0,05mm/d. La figure d) montre l'évolution de la rugosité Ra pour différentes valeurs d'avance par dent et pour différentes vitesses de coupe. La géométrie APCR a donné de meilleurs résultats.

Ce résultat n'est pas inédit parce que le matériau usiné est un acier inoxydable avec une forte teneur de chrome et de cobalt. Ces deux matériaux augmentent la soudabilité de l'acier usiné et favorise la formation de l'arête rapportée [33,38]

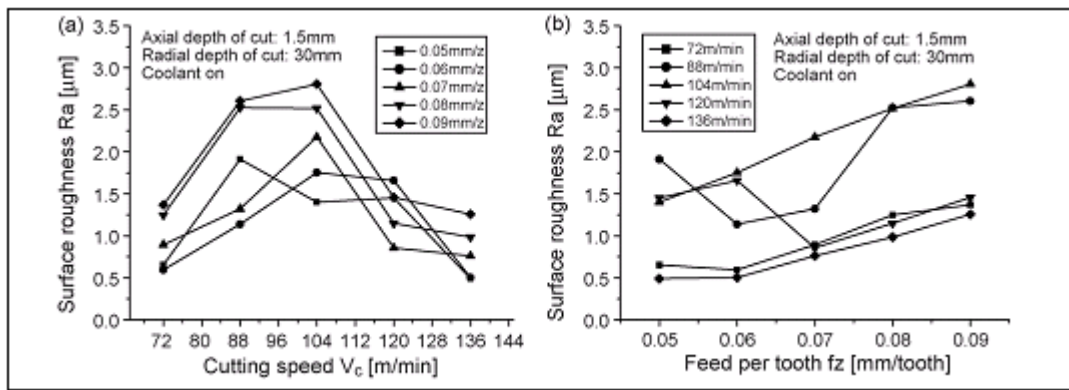


Figure I.21 Rugosité Ra de la surface usinée en fonction de V_c et f_z ,

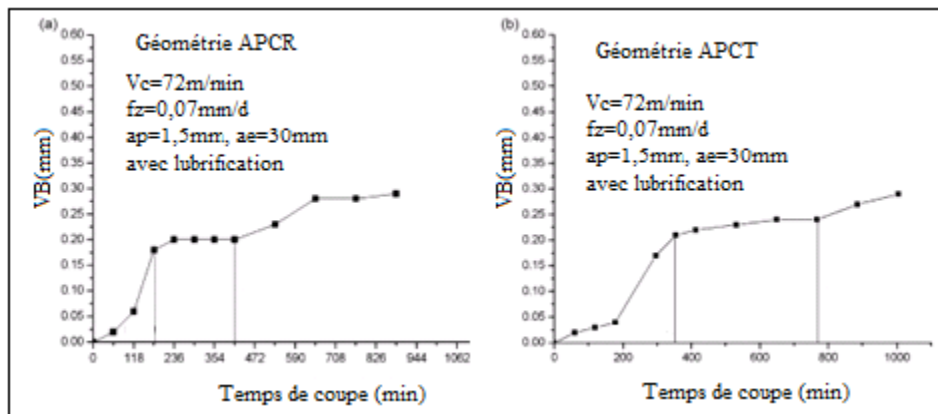


Figure I.22 Evolution de l'usure VB en fonction du temps de coupe
a) plaquette APCR, b) plaquette APCT.

b)

La figure I.22 montre l'évolution de l'usure frontale VB en fonction du temps de coupe. Pour la plaquette APCR, les intervalles d'usure de rodage et l'usure normale sont plus courts que ceux de l'usure de la plaquette APCT. Pour les mêmes conditions d'usinage, la géométrie de la plaquette APCT se comporte mieux à l'usure.

H. Shao et al. [41] ont aussi montré dans leur étude, l'évolution de la rugosité Ra en fonction du temps de coupe. La figure I.22 montre que par rapport au temps de coupe la rugosité de la surface usinée augmente pour les deux cas. Ces résultats confirment les conclusions des autres chercheurs qui ont montré que l'usure de l'outil de coupe provoque la dégradation de la surface usinée.

M. Nordin et al [47], ont étudié les performances de fraisage de l'acier inoxydable AISI 316 de cinq types de plaquettes revêtues. La figure I.23 montre les performances des revêtements exprimées par la longueur de coupe et la longueur fraisée.

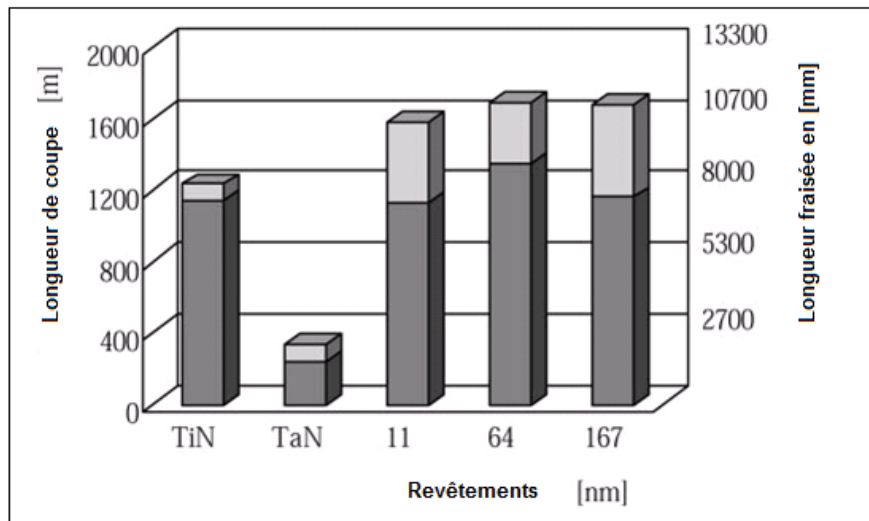


Figure I.23 Performances des revêtements testés

L'usinage de l'acier inoxydable AISI 316 est accompagné d'une forte adhésion du copeau sur l'arête tranchante de l'outil. Cela provoque le détachement prématuré du revêtement des plaquettes et accélère l'usure.

T.V. Sreerama Reddy et al [48] ont étudié l'usinabilité de l'acier C45 à l'aide de plaquettes en carbure métallique P30 sans et avec traitement thermique.

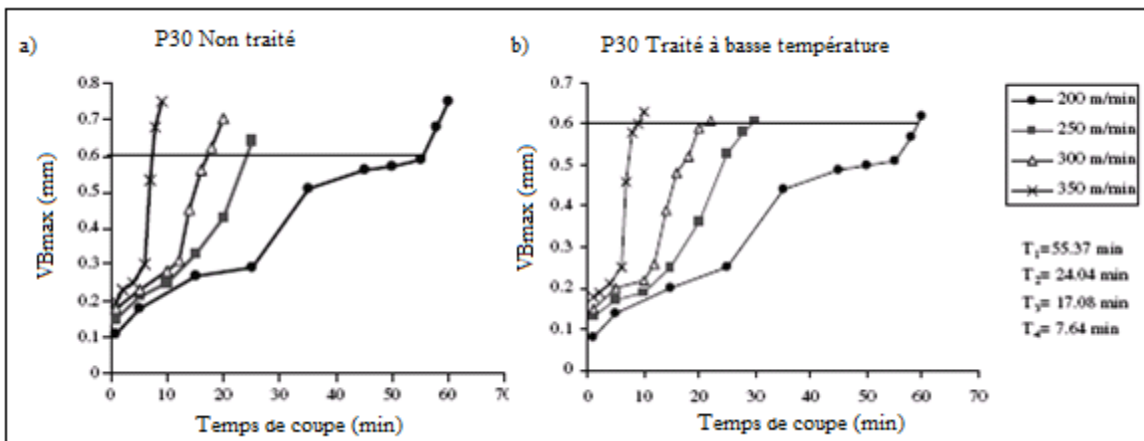


Figure I.24 – Evolution de l'usure VB en fonction du temps de coupe pour différentes vitesses de coupe plaquette P30 non traitée, b) plaquette P30 traitée à basse température.

L'étude a montré que la plaquette en carbure ISO P30 traitée à basse température se comporte mieux à l'usure.

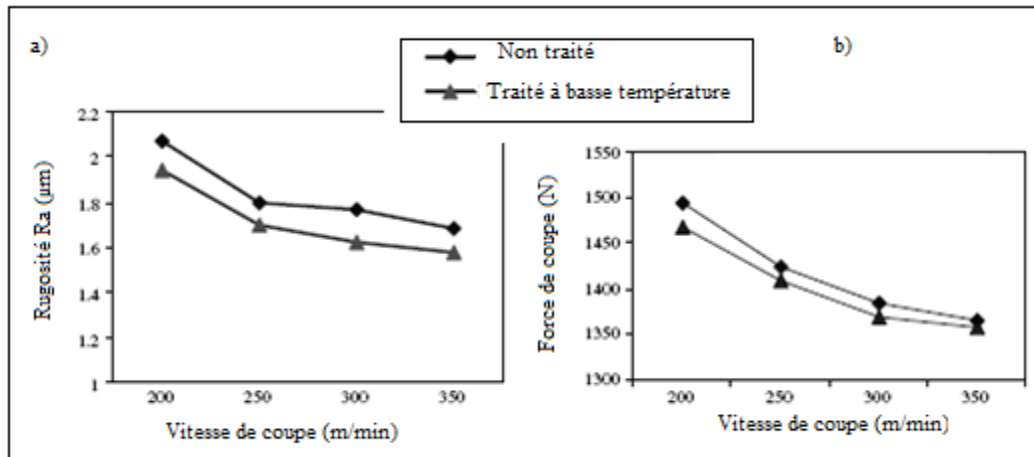


Figure I.25 a) Evolution de la rugosité Ra en fonction de la vitesse de coupe, b) Evolution de la force de coupe en fonction de la vitesse de coupe.

Les figures I.25 a) et b), montrent que pour les plaquettes de coupe en P30 traitées testées pour l'usinage de l'acier C45, les résultats sont meilleurs que ceux des plaquettes non traitées.

I.8 Evolution des matières de coupe

Dans le courant du vingtième siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces.

D'une manière générale, un matériau est d'autant plus tenace que les contraintes, statiques ou dynamiques (chocs), provoquant sa rupture sont plus élevées. Plus précisément, on caractérise cet aspect des matériaux de coupe par leur ténacité, leur contrainte de rupture en flexion ou leur résilience (rupture par chocs)

Un matériau de coupe doit posséder une dureté permettant de résister à l'usure et à la déformation, posséder une ténacité élevée pour résister à la rupture, être chimiquement inerte vis à vis du matériau usiné, être chimiquement stable pour résister à l'oxydation et à la dissolution, offrir une bonne résistance aux chocs thermiques.

- **Evolution des matériaux à outil [49, 50, 51]**

La figure I.26 est planche représentative de l'évolution des matières de coupe employée pour la fabrication des outils modernes

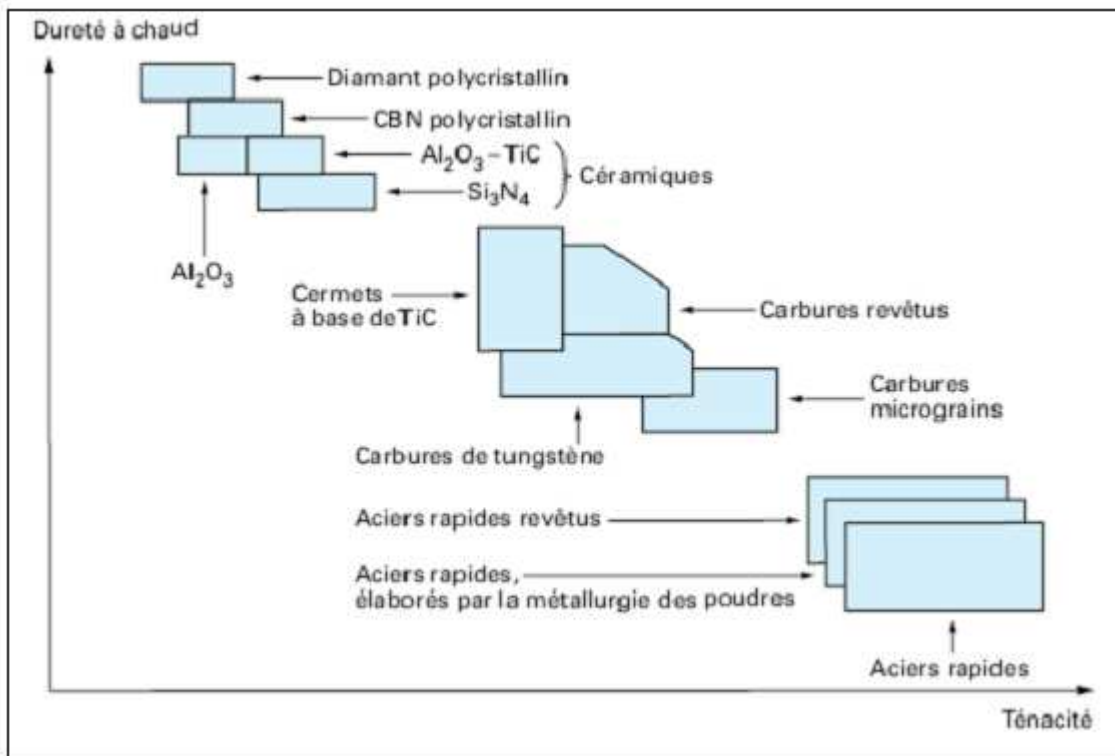


Figure I.26 Position des matériaux de coupe, dureté par rapport à la ténacité [49]

- **Evolution des outils de fraisage**

Les fraises monoblocs en acier rapide travaillent avec des vitesses de coupe limitées à 60 m/min. Les opérations de réaffûtage sont longues et onéreuses. L'avènement des carbures métalliques frittés sous forme de plaquettes insérées dans les corps de fraises avec des géométries de coupe appropriées, a permis l'usinage des aciers avec des vitesses de coupe allant jusqu'à 200m/min [51,52].

Le progrès réalisé dans le domaine du traitement des surfaces par les revêtements par dépôts chimiques (CVD) et physiques (PVD) a permis d'usiner les matériaux les plus difficiles à façonner avec de grandes vitesses de coupe [51].

Les revêtements simple couche et multicouches des plaquettes en carbure métallique sont actuellement très employés pour l'usinage des métaux durs comme les aciers à outil traités et les fontes trempées [50,53, 54, 55].

- **Texture des outils de coupe modernes**

Les outils de coupe modernes sont composés de deux parties distinctes afin d'augmenter leurs performances et leurs durées de vie. Un substrat qui a pour rôle d'encaisser les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage (haute résistance à la pression et à la flexion et ténacité suffisante) et un revêtement qui a pour fonction d'améliorer la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur l'outil pour son évacuation.

- **Les substrats**

Les substrats actuels appartiennent à des familles de matériaux très diverses :

- **les aciers rapides** : substrats obtenus par frittage de poudres métalliques avec une prédominance du fer. Ces poudres sont fortement chargées en carbone 0,7 à 1,6 % mais aussi en éléments tels que le Tungstène (12 à 20 % pour le type T) ou le Molybdène (3,5 à 10% pour le type M) qui caractérisent des familles différentes possédant des propriétés différentes (Type T : arête de coupe résistante à l'abrasion ou Type M : grande résistance à la chaleur). D'autres éléments en additifs viennent renforcer les propriétés de ces matériaux (Chrome, Vanadium ou Cobalt par exemple). On obtient avec ces matériaux des duretés de l'ordre de 740 à 1000 HV. Ils sont beaucoup utilisés pour :

- le tournage (10% du marché),
- le perçage (80% du marché)
- le fraisage (40% du marché).

- **Les carbures cémentés** : substrats obtenus par frittage de poudres métalliques sans fer. Ces matériaux sont souvent formés de carbure de tungstène, de titane ou de silicium pour les plus utilisés. Afin de lier les grains de carbure entre eux on utilise des éléments métalliques comme le cobalt, qui allie sa ductilité à la dureté des carbures. On obtient avec ces matériaux des outils présentant des duretés variables comprises entre 1250 et 1800 HV. Ils sont utilisés pour usiner des matériaux durs car ils possèdent une ténacité accrue par rapport aux aciers rapides. Il existe un grand nombre de possibilités d'usinage avec ces matériaux. En effet, selon les proportions de carbure et de liant, les propriétés et les capacités de l'outil changent beaucoup.

- **Les cermets** : sont des carbures, des nitrures, des carbonitrures ou des borures liés par un métal ou un alliage ferreux. Les liants sont donc de plusieurs types (cobalt, nickel, nickel-fer, nickel-chrome, etc.). La dénomination de cermets est peu utilisée dans l'industrie car souvent ils sont assimilés à des carbures cémentés. On obtient avec ces matériaux des outils pouvant avoir des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Leur dureté à chaud permet de faire des usinages dans des conditions extrêmes : 1000°C. Les cermets ont des applications très diverses, (tournage, fraisage, etc.), et ont une très bonne résistance mécanique [50], une faible

conductivité thermique et une bonne résistance à la diffusion et à l'usure. Ils sont donc souvent utilisés en tournage de semi-finition ou de finition des aciers.

- **Les céramiques** : sont des matériaux frittés à base de céramiques : alumines, nitrures de siliciums, etc. Ce sont des matériaux qui ont une très grande dureté et une très grande résistance à l'usure. En contre partie, ce sont les outils les plus fragiles. Les céramiques sont très utilisées pour l'usinage des fontes par exemple et pour les aciers durcis.

- **Le Nitrure de bore cubique**

Contrairement au diamant, il ne se trouve pas dans la nature. On l'élabore donc **par synthèse** (première synthèse en 1957 aux États-Unis). Suivant les conditions, on obtient deux formes :

- **Nitrure de bore à structure cubique (CBN)** qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant) ;

- **Nitrure de bore à structure hexagonale** de faible dureté (même structure que le graphite).

La forme dure est très difficile à obtenir et les techniques sont voisines de celles utilisées pour la synthèse du diamant. Les cristaux obtenus sont très petits (< 0,5 mm) utilisables pour la réalisation de meules.

C'est le matériau connu le plus dur après le diamant. Il présente une résistance mécanique élevée dépendant de la nature et de la quantité de liant. Sa dureté se maintient à chaud (jusqu'à 1 000 °C), ce qui permet de travailler à des vitesses de coupe très élevées et d'usiner des matériaux durs. Comme pour le diamant, la réactivité chimique liée au couple matériau usiné/outil de coupe en limite les applications.

- **Diamant**

Les premiers furent réalisés en Suède en 1953 par Von Platen, puis en 1954 par Hall aux États-Unis, en soumettant du graphite à des températures et pressions très élevées. Les cristaux obtenus étaient petits (< 0,5 mm) et servaient à la fabrication de meules en diamant synthétique.

• **Les revêtements**

Le rôle principal attribué aux revêtements est de protéger l'outil durant l'usinage. Il est incontestable que les revêtements permettent d'améliorer la durée de vie des outils [56]. Cependant peu de littérature existe pour expliquer le processus de protection du revêtement.

Le rôle recherché dans l'application de revêtements sur les outils est de limiter l'usure des outils durant l'opération d'usinage.

Le dépôt étant d'épaisseur très faible (quelques microns), on ne peut envisager que le revêtement apporte des caractéristiques de résistances mécaniques, permette de protéger le substrat par une couche indestructible. L'apport du revêtement doit avoir un rôle plus subtil.

Les propriétés recherchées sont de type protection thermique [57, 58] : formation du copeau, frottement du copeau ou de barrière chimique : oxydation ou affinité chimique [55, 57, 58]. De fait actuellement les fabricants spécialisés ont tendance à rechercher les caractéristiques suivantes:

Une bonne adhésion au substrat, propriétés mécaniques permettant de résister aux pressions superficielles importantes, faible conductivité thermique (barrière thermique), faible affinité chimique avec les éléments constitutifs du matériau usiné, bonne résistance à l'oxydation à haute température, bon coefficient de frottement pour éviter l'usure par le frottement du copeau.

Les revêtements nouveaux sont à base de :

- carbure (titane, hafnium, zirconium, niobium, etc.) ; nitrure (bore, aluminium, chrome, titane, etc.) ; titane (bore, carbone, etc.) ; diamant

Ils permettent d'atteindre les caractéristiques physiques suivantes :

Une dureté comprise entre 1800 à 4500 Hv, conductivité thermique de l'ordre de 11 à 35 W m-1K-1, module d'Young compris entre 300 et 600 daN/mm²

- **Intérêt de revêtement :**

Un revêtement idéal devrait avoir les propriétés suivantes :

- ✓ Limiter les contraintes d'écoulement des copeaux : adhésion et/ou frottement ;
- ✓ Limiter la quantité de chaleur induite dans le coeur de l'outil (barrière thermique en vue du maintien des caractéristiques mécaniques) ;
- ✓ Limiter l'abrasion ;
- ✓ Inhiber l'oxydation ;
- ✓ Inhiber la diffusion des composés de l'outil vers la matière usinée ;
- ✓ Bloquer la fissuration ;
- ✓ Rendre le mode d'usure en dépouille prépondérant afin de faciliter la maîtrise et la prédétermination des opérations d'usinage.

I.9 Usinage à grande vitesse (UGV)

Il existe aujourd'hui de nombreuses interrogations sur l'Usinage à Grande Vitesse et on peut lire de multiples définitions plus ou moins complexes caractérisant ce terme. Tout d'abord, il convient de rappeler ce que l'on entend par Usinage à Grande Vitesse, la bonne définition ne peut qu'être celle s'attachant aux phénomènes directement liés au couple outil - matière.

L'usinage à grande vitesse (UGV ou High Speed Machining (HSM)) est une technologie d'usinage mettant en jeu des vitesses de coupe, pour des matériaux donnés, qui sont cinq à dix fois plus élevées que celles conventionnellement utilisées pour ces mêmes matériaux et de rotation de l'outil (de dix mille à cent mille). Ces grandes vitesses de coupe entraînent des températures, dans le plan de cisaillement du copeau, qui sont suffisamment élevées pour que les propriétés mécaniques du matériau usiné soient très diminuées lors de son usinage.

L'expérience montre que la force de coupe diminue lorsque la vitesse de coupe V_c augmente. 80% de l'énergie est récupérée par le copeau et 20% par l'outil. Lorsqu'on coupe de la matière avec un outil sur une machine outil, il faut choisir une vitesse de coupe (V_c). Lorsqu'on augmente cette vitesse, on s'aperçoit rapidement qu'il existe une limite qu'il ne faut pas dépasser, faute de quoi on détruit l'outil très rapidement. En multipliant ces vitesses de coupe par un facteur de 5 à 10, on retrouve des points de fonctionnement de l'UGV qui est aujourd'hui technologiquement et économiquement exploitable. [59]

D'autres caractéristiques de l'UGV sont, l'usinage à grande vitesse de coupe (V_c), l'usinage à grande vitesse de broche (N), l'usinage à forte avance (V_f), l'usinage haut productivité.

- Pourquoi l'UGV ?

Dans la théorie, pour le même effort de coupe, l'UGV permet d'enlever un volume de matière par unité de temps supérieure à un usinage avec des vitesses conventionnelles.

L'UGV ayant pour but d'augmenter le taux d'enlèvement du métal et réduire les efforts de coupe, il peut être une solution pour satisfaire la nécessaire amélioration du procédé de fabrication en coûts, délais et qualité. Cependant, pour de nombreux mécaniciens, l'application et le champ d'action de l'UGV paraissent limités. Qu'en est-il réellement ?

La question mérite d'être posée.

L'UGV est une technologie de production accessible aux PME à condition de bien évaluer les besoins en interne, au niveau matériel et compétences, ainsi que les besoins externes, c'est à dire étudier la demande du marché et de ses clients [59, 60].

Il est clairement établi, que la température dans la zone de coupe augmente quand la vitesse de coupe augmente [60, 61]. Ainsi, la grande vitesse de coupe peut être définie comme étant celle induisant dans la pièce (dans le plan de cisaillement) une température suffisante pour entraîner une diminution significative des propriétés mécaniques du matériau usiné, sa coupe étant ainsi facilitée. Cela signifie que la grande vitesse (GV) dépend du matériau usiné et que l'outil de coupe doit supporter des températures élevées.

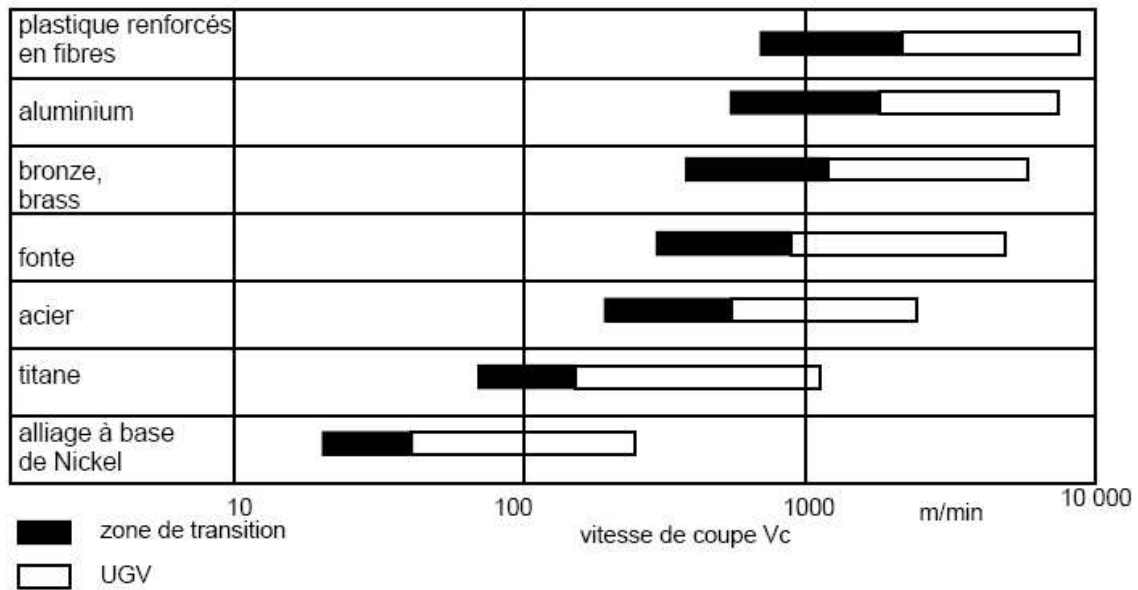


Figure I.27 Zone de transition et vitesse de coupe selon le matériau usiné

- Exigences imposées par l'UGV

En UGV, non seulement, les outils sont sollicités mécaniquement par les efforts de coupe (comme lors d'un usinage conventionnel), mais aussi par des forces centrifuges et des vibrations. L'usure (surtout dans le cas de l'usinage de l'acier) est également un paramètre important. Mais l'UGV exige de l'outil un comportement optimal aux grandes vitesses de coupe [60, 61,62]. Ceci impose donc une adaptation des géométries d'outil, un bon choix des matériaux de coupe et des revêtements de surface, un équilibrage soigné des outils tournants et une conception innovante de l'attachement plaquette sur le corps de l'outil.

L'UGV se caractérise également par une épaisseur moyenne de copeau faible. De plus, afin de garantir une répartition homogène des efforts de coupe sur chaque dent de l'outil, les écarts de positionnement (radial et axial) et d'orientation des arêtes de coupe entre elles doivent être minimisés. Ceci étant fait, l'écart coaxial entre la partie attachement de l'outil et l'ensemble des parties actives (faux-rond) doit également être réduit au maximum.

Enfin, les performances des outils en UGV et leur tenue aux contraintes thermiques dépendent de la lubrification. Celle-ci a donc également dû s'adapter du fait de l'évolution du couple outil/matière et des conditions d'usinage.

La réduction des forces de coupe et l'augmentation du pourcentage de chaleur évacuée avec les copeaux ont des conséquences importantes :

Le temps réduit de contact ne permet pas un échange de chaleur entre le copeau, la pièce et l'outil comme celui qui se produit dans le cas de l'usinage traditionnel. La chaleur évacuée avec le copeau augmente par rapport à la chaleur vers l'outil et la pièce. La différente distribution de la chaleur permet l'usinage à sec.

- Matériaux de coupe et revêtements utilisés en UGV :

Le corps de l'outil est relativement fin pour minimiser les masses en mouvements. En conséquence, les sollicitations mécaniques du couple outil/matière et les effets dynamiques accrus engendrent des déformations à prendre en compte dans les stratégies d'usinage. En ce qui concerne la pointe des outils, il ne faut pas perdre de vue le couple « outil/matière » pour le choix, mais il faut aussi tenir compte des spécificités de l'UGV. On usine avec une faible épaisseur de coupe (une section de copeaux réduite) ce qui nécessite un affûtage précis garanti par l'emploi de grain de carbure fin, outil cher à l'achat. La température de coupe élevée engendre une usure prépondérante par diffusion et abrasion ; les carburiers proposent des produits nombreux et de plus en plus pointus, répondant à des applications quasi spécifiques pour chaque usinage.

Les outils employés en UGV sont fabriqués par les matériaux coupants comme :

Les carbures, Les revêtement TiN, TiAlN, TiCN ...etc, Les céramiques, Les nitrures de bore cubique (CBN), Les diamants polycristalins (PCD)

L'utilisation de la grande vitesse - 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.

- Outils en carbures et leur revêtement de surfaces :

Les outils carbures (de nuances ISO P et K revêtus) peuvent être utilisés en UGV, surtout dans le cas de la réalisation d'outillages. En effet, à la différence des outils en acier rapide, le module de Young élevé des carbures permet l'obtention d'une précision et d'un état de surface acceptables. 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. 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.

Parmi les revêtements de surface utilisés citons le revêtement TiN (relativement peu utilisé car ses performances thermiques sont généralement faibles). Par contre, le revêtement TiCN apporte une solution à l'usure rapide et progressive des outils non revêtus. Il apporte plus de stabilité à ce dernier lors de l'usinage. 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 [47, 63, 64].

On peut trouver aussi le revêtement TiAlN qui, malgré un comportement excellent aux vitesses de coupe et aux températures élevées, est moins performant que le revêtement TiCN puisqu'il se dégrade au cours de l'usinage [47, 55, 63, 65].

- Le Fraisage UGV

Grâce au progrès enregistré dans l'application des nouveaux matériaux de coupe et la conception d'outil de plus en plus performant, l'évolution des machines-outils à commande numérique et l'intégration de broches tournant aux grandes vitesses (60000 tr/min) [60, 61, 62], il est maintenant possible de fraiser à grande vitesse les matériaux durs. Les applications du fraisage UGV ne cessent de se répandre en particulier dans l'industrie automobile (fabrication d'empreintes de moule de matriçage), dans l'aéronautique et l'aérospatial (fraisage de pâles de turbines, usinage des superalliages). Dans le domaine du fraisage une vraie révolution se déclencha en peu de mois après les années 92- 93. L'utilisation de l'UGV gagnait les domaines de production de moules de grandes et moyennes dimensions, l'industrie aérospatiale et la production d'automobiles.

L'introduction de l'UGV dans la production des petites pièces, par contre, n'est pas encore complètement atteinte mais la transformation est actuellement en train de se produire. Dans le domaine de l'horlogerie et des petites pièces en général, on rencontre des limites techniques spécifiques. Pour faire de l'UGV avec des outils de petit diamètre, on est obligé à avoir une vitesse de rotation de la broche très élevée. Ces vitesses de rotations amènent, aussi, à des vitesses d'avance élevées qui doivent être atteintes en un espace très limité, à cause des dimensions des pièces. Par conséquent, les accélérations devraient aussi être particulièrement élevées. De telles machines n'existent pas, pour le moment, sur le marché.

Plusieurs chercheurs en coupe des matériaux ont étudié les performances d'usinage des nouvelles matières de coupe. Les résultats obtenus sont encourageants pour les fabricants des outils de coupe.

J.A. Ghani et al [69], ont étudié les performances de coupe d'un carbure métallique P10 revêtu TiN au cours du fraisage grande vitesse de l'acier AISI H13. Ils ont présenté les résultats pour différentes combinaisons du régime de coupe, la vitesse de coupe maximale utilisée est de l'ordre de 355m/min.

M. Nordin et al [47,55], T.I. Selinder et al [53] ont étudié les mécanismes d'usure des carbures métalliques à revêtement multicouche en nitrure de titane TiN et en nitrure de tantale TaN au cours du fraisage de l'acier inoxydable austénitique AISI 316. Les résultats montrent qu'il est possible d'augmenter la tenue en service même aux grandes vitesses de coupe.

M. Nordin et al [47,55, 53] ont testé le revêtement par dépôt PVD du carbure de titane TiC-C et les revêtements multicouches au TiN/TaN et les revêtements TiN/NbN aux grandes vitesses de coupe lors de l'usinage des aciers durcis. Ils ont pu démontrer qu'il est possible de travailler l'acier durcis à 60HRC à des vitesses de coupe allant jusqu'à 200m/min pour des longueurs fraisées de 3000mm en utilisant les revêtements TiN/TaN et le revêtement PVD TiC-C. N. Camuscu et E. Aslan [70] ont réalisé une étude comparative sur les performances de coupe des carbures revêtus simple et multicouches avec différents revêtements et les plaquettes à insert en CBN au cours du fraisage UGV. Les résultats obtenus montrent que les outils à revêtement multicouches et les CBN peuvent être utilisés pour l'usinage des aciers fortement alliés et durcis jusqu'à 62HRC. Le CETIM, dans son rapport [71] a présenté les conclusions de plusieurs études sur le fraisage grande vitesse avec les nouvelles matières de coupe en particulier les revêtements céramiques et les nitrure de bore cubique. L'usinage de finition de la surface de joint de la culasse des blocs moteur en fonte et la finition des empreintes de moules de matriçage avec ces outils s'est révélé très prometteur pour les industriels en particulier les constructeurs automobiles.

I.10 Fraisage grande vitesse à sec des couches de rechargement en superalliages STELLITE 6 sur les aciers de forgeage

- Le rechargement stellite 6 par le procédé PTA

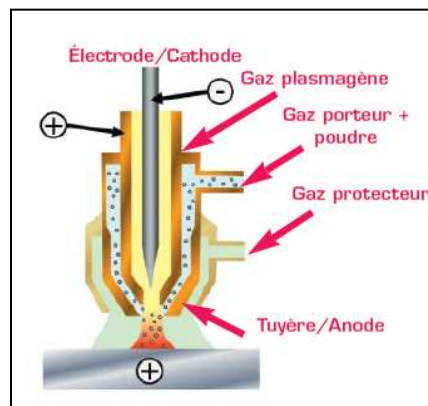


Figure I.28 Schéma de principe du procédé PTA [75]

- **Caractéristiques Générales**

Dérivé de la technique de projection par plasma soufflé et des techniques de rechargement soudé (M.I.G., T.I.G.), le P.T.A permet d'obtenir des dépôts d'une excellente qualité métallurgique. Le matériau d'apport est injecté sous forme de poudre dans la colonne plasma tandis que l'arc est transféré sur la pièce afin d'obtenir une parfaite métallurgie du

rechargement. Les vitesses de fusion et de solidification élevées permettent d'obtenir des structures extrêmement fines et résistantes.

- **Avantages de la technologie**

Par rapport aux autres moyens de rechargement à l'arc électrique, ce procédé présente plusieurs avantages :

- Travail sous courant de 30 ampères pour une équivalence T.I.G. de 100 ampères,
- Meilleure gestion du bain de soudage, limitation de la zone du substrat affectée thermiquement et de la dilution du métal (- de 3% pour PTA contre 8 à 13% pour TIG),
- Vitesse de rechargement élevée,
- Grande fiabilité du procédé (contrôle des paramètres et automatisation),
- Adapté pour les pièces à faible capacité thermique.

- **Applications industrielles**

- Automobile (sièges de soupapes)
- Plastiques d'extrusion, moules (vannes anti retour, sommets de vis)
- Forage (outils)
- Nucléaire (pompes, sièges de vanne...)
- BTP, agricole (socs, dents)
- Travail à chaud (matrice de forge, nez, ogive)

- **Usinage des couches de rechargement**

La précision géométrique et l'état de surface des formes fonctionnelles sont soumis à des tolérances très strictes. L'usinage des couches de rechargement est donc inévitable. , c'est pourquoi il faut chercher les meilleures conditions de travail pour garantir la rentabilité de cette nouvelle technique.

Compte tenu du rôle prépondérant des opérations d'usinage, il est important de pouvoir bénéficier d'une bonne usinabilité. Les superalliages sont caractérisés par leur usinabilité difficile. La productivité de l'usinage traditionnel reste relativement faible par rapport aux autres procédés de fabrication.

Le développement ces dernières années des techniques de fabrication des matériaux de coupe a permis aux spécialistes de l'usinage de travailler avec une grande vitesse des matériaux qui étaient autrefois très difficiles à façonner à l'outil coupant. En effet, il est possible maintenant et grâce aux carbures revêtus, les céramiques, les nitrures de bore cubique et les diamants polycristallins d'usiner des aciers fortement alliés traités ayant des duretés de l'ordre de (60 HRC). Le deuxième facteur qui a facilité ce développement et le progrès réalisé dans la fabrication de la machines- outil.

La dernière de ces évolutions est certainement l'introduction de l'usinage à grande vitesse (UGV). Cette technologie n'est pas récente comme l'on pourrait s'imaginer, bien que ses réelles applications industrielles remontent seulement à la fin des années 1980. L'UGV a acquis une véritable importance industrielle seulement dans les années 1990. L'usinage grande vitesse des couches de rechargements stellites n'est qu'à ses premiers pas.

El Mansouri et al [71,73] ont étudié l'usinabilité à grandes vitesses des couches de rechargements déposées par soudage pour des outils de forge. L'usinage à grande vitesse des rechargements Base-Nickel, est présenté comme une solution pour diminuer le coût de la fabrication des pièces. L'usinabilité à grande vitesse et à sec des pièces rechargées base-nickel est limitée par l'usure prématurée d'outil. L'usinage est accompagné par une action d'adhésion du copeau et d'écaillage de l'arête et par une action d'abrasion qui se manifeste par un labourage et un écrouissage de la couche usinée.

X.J. Ren et al. [74] ont étudié l'usinabilité en tournage d'un rechargement base-chrome sur une couche de 6mm d'un acier doux. Le critère d'évaluation considéré est la température à l'interface pièce outil. Le matériau de coupe testé est le CBN. L'étude a montré qu'au-delà de 600°C la structure de la couche superficielle de la surface usinée présente une couche hétérogène carbure-chrome. Cet état rend l'usinage difficile et limite les paramètres de coupe de l'outil.

Lors d'une des journées techniques organisées par le CETIM, Stéphane GUERIN [75] a présenté une étude portant sur l'usinage des outillages rechargés. L'étude se compose d'une enquête sur les usinages réalisés par les forgerons français et d'essais d'usinage sur des rechargements base cobalt et base fer.

L'étude menée par l'équipe usinage grande vitesse du laboratoire de physique et mécanique des matériaux sous la direction du professeur D. Dudzinski et A. Devillez sur l'usinage du rechargement base cobalt, Stellite grade 21 est effectuée sur des matrices d'ébavurage, sur une épaisseur moyenne de 6mm au moyen d'un procédé MIG. La matière de base est un acier X38CDV5. Les conditions de coupe utilisées à la fois pour l'ébauche et la finition pour des outils Ø8 mm (4 et 2 dents) sont une vitesse de coupe $V_c=60\text{m/min}$ et une avance par dent $f_z=0,1$, une profondeur de passe $a_p=3\text{mm}$ et une avance axiale $a_e=0,3\text{mm}$.

Le rechargement base fer est opéré sur des matrices d'ébavurage, sur une épaisseur moyenne de 2 à 8mm au moyen d'un procédé MIG. La matière de base est un acier X38CDV5

Les conditions de coupe utilisées à la fois pour l'ébauche et la finition avec un outil $\varnothing 12$ mm (2 dents) sont une vitesse de coupe $V_c = 94$ m/min et une avance par dent $f_z = 0,2$ mm/d, une profondeur de passe $a_p = 2$ mm et une avance axiale $a_e = 0,5$ mm.

Les conclusions de l'étude préconisent que pour une augmentation de la productivité et une réduction des coûts il faut utiliser des attachements rigides, des outils avec une acuité d'arête importante, avec un affûtage soigné, usiner sur une hauteur de coupe importante pour une répartition de l'usure, une réduction des sections de copeaux (en épaisseur), une augmentation de la durée de vie des outils coupants ainsi que pour permettre de pallier les irrégularités de l'épaisseur.

Ainsi la stratégie adaptée aux rechargements est un « Forte a_p / Faible a_e » afin d'augmenter le débit copeaux et la durée de vie des outils.

Choix des facteurs

A partir des travaux sur la modélisation du fraisage réalisés par Molinari et al [32], nous avons pu mettre en évidence les paramètres principaux intervenants lors de l'usinage. Ainsi, il s'avère que les paramètres influençant les grandeurs énergétiques de la coupe sont la profondeur de passe a_p , l'avance par dent f_z , la vitesse de coupe V_c , la stratégie d'usinage (*avalant ou opposition*) et le taux engagement latéral de la fraise a_e .

Les essais auront donc pour but de découvrir et de comprendre les phénomènes présents lors de la coupe en fraisage. Ensuite, au travers d'une étude de sensibilité, les paramètres les plus influents seront introduits dans la future modélisation.

II. METHODOLOGIE DE RECHERCHE ET PREPARATION DES EXPERIENCES

II - 1 Méthodologie de recherche

Comme nous l'avons déjà précisé l'usinabilité d'un matériau est une propriété complexe du fait qu'elle est sensible à un grand nombre de facteurs tels que :

Le régime de coupe (V_c , f_z , a_p), la géométrie de l'outil (r , α , β , γ , ... etc.) et de sa nature, les caractéristiques du matériau (HB, Rr, %C, ... etc.), les conditions d'usinage et la rigidité du système MO.D.O.P.

Ces facteurs représentent les paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, la précision, les efforts, la rugosité, la productivité, ... etc. ; représentent les paramètres de sortie.

Considérons x_1, x_2, \dots, x_n les paramètres d'entrée ; et y_1, y_2, \dots, y_m ; ceux de sortie.

Pour déterminer l'action d'un ou plusieurs facteurs d'entrée (x_1, x_2, \dots, x_n) sur un paramètre de sortie y nous pouvons mathématiquement utiliser les deux méthodes suivantes:

- Méthode unifactorielle,
- Méthode multifactorielle.

II.1.1 Méthode unifactorielle :

Cette méthode est utilisée lorsqu'il faut déterminer l'action d'un seul paramètre d'entrée x sur un facteur de sortie y . Il s'agit de déterminer une relation de la forme $y = f(x)$, les autres x_i sont maintenus constants.

Tableau II.1 - Table de planification d'expériences d'après la méthode unifactorielle

N° essai	Paramètres d'entrée x	Facteurs de sortie			y_{moy}
		y_1	y_2	y_3	
1	x_1	y_{11}	y_{21}	y_{31}	y_{moy1}
2	x_2	y_{12}	y_{22}	y_{32}	y_{moy2}
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
i	x_i	y_{1i}	y_{2i}	y_{3i}	y_{moyi}
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
N-1	-	-	-	-	-
N	x_N	y_{1N}	y_{2N}	y_{3N}	y_{moyN}

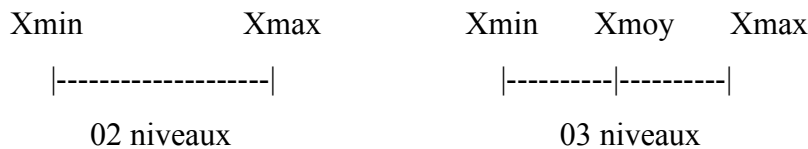
II.1.2 Méthode multifactorielle :

Cette méthode est utilisée lorsqu'il faut étudier l'action simultanée de plusieurs paramètres d'entrée sur le paramètre de sortie y. Ce qui permet d'exprimer la relation sous la forme $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Tableau II.2 - Table de planification d'expériences d'après la méthode multifactorielle

N°	Paramètres d'entrée						Paramètres de sortie			
	X ₁	X ₂	.....	X _j	.....	X _m	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y _{moy}
1	X ₁₁	X ₂₁	.....	X _{j1}	.....	X _{m1}	Y ₁₁	Y ₂₁	Y ₃₁	Y _{moy1}
2	X ₁₂	X ₂₂	.....	X _{j2}	.....	X _{m2}	Y ₁₂	Y ₂₂	Y ₃₂	Y _{moy2}
...
i	X _{1i}	X _{2i}	.....	X _{ji}	.....	X _{mi}	Y _{1i}	Y _{2i}	.....	Y _{moyi}
...
n	X _{1n}	X _{2n}	.....	X _{jn}	.....	X _{mn}	Y _{1n}	Y _{2n}	Y _{3n}	Y _{moyn}

Notons que chaque facteur d'entrée x_j ne varie que dans un intervalle bien défini soit [X_{min} ; X_{max}], lorsque le facteur est considéré par ces valeurs nous avons une expérience à deux niveaux. Pour une expérience à trois (03) niveaux le facteur est considéré par [X_{min} ; X_{moy} ; X_{max}] soit l'intervalle,



Si le nombre d'expériences est N, le nombre de facteurs considérés est m et le nombre de niveaux p nous avons la relation

$$N = p^m \tag{II.1}$$

Dans notre cas le nombre de facteurs d'entrée considérés est m = 3 ; (V_c, f_z, a_p) le nombre de niveaux adopté est p = 2, le nombre d'expériences nécessaires est donc $N = p^m = 2^3 = 8$, soit (08) huit expériences. Par conséquent la matrice de planification aura la forme du tableau II.3:

Tableau II.3 – Matrice de planification d'expériences pour un plan 2^3

N°	Paramètres d'entrée			Paramètre de sortie
	X_1	X_2	X_3	Ymoy
1	-1	-1	-1	Y_1
2	+1	-1	-1	Y_2
3	-1	+1	-1	Y_3
4	+1	+1	-1	Y_4
5	-1	-1	+1	Y_5
6	+1	-1	+1	Y_6
7	-1	+1	+1	Y_7
8	+1	+1	+1	Y_8

En coupe des métaux, les lois liant la sortie y d'un système d'usinage aux paramètres d'entrée (x_1, x_2, \dots, x_n) sont de la forme :

$$\underline{Y = C \cdot X_1^{k_1} X_2^{k_2} \dots X_n^{k_n}} \quad (\text{II.2})$$

où C est une constante tenant compte de l'influence des facteurs ne figurant pas dans la relation (II.2)

k_1, k_2, \dots, k_n sont des exposants reflétant, respectivement les degrés d'influence des facteurs x_1, x_2, \dots, x_n sur le paramètre y .

Cette relation peut être établie par les produits combinés des paramètres, ce qui permet d'élever la précision du modèle mathématique et avoir une bonne adéquation en particulier pour les matériaux à usinabilité difficile [6,21]

Le modèle prend donc la forme

$$Y = C(X_1; X_2; \dots; X_n) \cdot X_1^{\alpha(X_1, X_2, \dots, X_n)} \cdot X_2^{\beta(X_1, X_2, \dots, X_n)} \cdot \dots \cdot X_n^{\delta(X_1, X_2, \dots, X_n)} \quad (\text{II.3})$$

où $C(x_1, x_2, \dots, x_n)$ est une fonction tenant compte des conditions de travail

$\alpha(X_1, X_2, \dots, X_n); \beta(X_1, X_2, \dots, X_n); \dots; \delta(X_1, X_2, \dots, X_n)$ sont des fonctions reflétant respectivement les degrés d'influence de $x_1, x_2 \dots x_n$ sur y .

Pour définir le modèle mathématique [II.3] il faut déterminer les fonctions:

$$\alpha(X_1, X_2, \dots, X_n); \beta(X_1, X_2, \dots, X_n); \dots; \delta(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

pour cela nous considérons la méthode reposant sur le principe de minimisation des écarts quadratiques (Méthode des moindres carrés).

II.1.3 Traitement des résultats :

Nous avons considéré la tenue de la plaquette de la fraise comme étant le paramètre de sortie du système d'usinage et les éléments du régime de coupe (V_c , f_z , a_p) comme étant les paramètres d'entrée.

$$\text{Notre modèle prend donc la forme: } T = C \cdot V_c^{K_1} \cdot f_z^{K_2} \cdot a_p^{K_3} \quad (\text{II.4})$$

Le modèle [2.4] ci dessus doit être linéarisé en prenant le logarithme de chaque terme.

$$\ln T = \ln C + k_1 \ln V_c + k_2 \ln f_z + k_3 \ln a_p \quad (\text{II.5})$$

soit le changement de variable : $\ln T = Y$; $\ln C = C_0$; $\ln V = X_1$; $\ln f = X_2$; $\ln a = X_3$. Par conséquent l'expression [II, 5] prend la forme :

$$Y = C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3 \quad (\text{II.6})$$

pour que la relation [II, 6] soit définie il est nécessaire de déterminer les coefficients: C_0 , k_1 , k_2 et k_3 .

$Z = \sum (Y_i - Y_e)^2$ soit minimale, où Y_i est et Y_e sont les grandeurs de sortie expérimentales et d'après le modèle

$$Z = \sum [Y_e - (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3)]^2 \rightarrow \min \quad (\text{II.7})$$

pour que la quantité Z soit minimale il suffit que les dérivées partielles de la relation (II,7) par rapport aux inconnues C_0 , k_1 , k_2 et k_3 soient nulles.

c'est à dire:

$$\frac{\partial Z}{\partial C_0} = 0; \quad \frac{\partial Z}{\partial k_1} = 0; \quad \frac{\partial Z}{\partial k_2} = 0 \text{ et } \frac{\partial Z}{\partial k_3} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Déterminons chaque dérivée:

$$\frac{\partial Z}{\partial C_0} = -2 \sum [Y_e - (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3)] \quad (\text{II.9})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial k_1} = -2 \sum X_1 \cdot [Y_e - (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3)] \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial k_2} = -2 \sum X_2 \cdot [Y_e - (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3)] \quad (\text{II.11})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial k_3} = -2 \sum X_3 \cdot [Y_e - (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3)] \quad (\text{II.12})$$

Les dérivées partielles sont nulles d'où les équations:

$$\frac{\partial Z}{\partial C_0} = 0 \Leftrightarrow -2 \sum [Y_e - (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3)] = 0$$

$$\sum Y_e = \sum (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3) \quad (\text{II.13})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial k_1} = 0 \Leftrightarrow -2 \sum X_1 \cdot [Y_e - (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3)] = 0$$

$$\sum X_1 \cdot Y_e = \sum X_1 (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3) \quad (\text{II.14})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial k_2} = 0 \Leftrightarrow -2 \sum X_2 \cdot [Y_e - (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3)] = 0$$

$$\sum X_2 \cdot Y_e = \sum X_2 (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3) \quad (\text{II.15})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial k_3} = 0 \Leftrightarrow -2 \sum X_3 \cdot [Y_e - (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3)] = 0$$

$$\sum X_3 \cdot Y_e = \sum X_3 (C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3) \quad (\text{II.16})$$

Les équations (II.9) à (II.16) forment le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \sum Y_e = N \cdot C_0 + k_1 \sum X_1 + k_2 \sum X_2 + k_3 \sum X_3 \\ \sum X_1 \cdot Y_e = C_0 \sum X_1 + k_1 \sum X_1^2 + k_2 \sum X_1 \cdot X_2 + k_3 \sum X_1 \cdot X_3 \\ \sum X_2 \cdot Y_e = C_0 \sum X_2 + k_1 \sum X_1 \cdot X_2 + k_2 \sum X_2^2 + k_3 \sum X_2 \cdot X_3 \\ \sum X_3 \cdot Y_e = C_0 \sum X_3 + k_1 \sum X_1 \cdot X_3 + k_2 \sum X_2 \cdot X_3 + k_3 \sum X_3^2 \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Pour résoudre le système d'équation (II.17), il n'est pas nécessaire de reporter les valeurs naturelles des X_{ij} , nous remplaçons le X_{ij} par leurs valeurs codifiées (Tableau II.3) nous aurons le système d'équations suivant :

$$\sum Y_e = N \cdot C_0 \quad (\text{II.18})$$

$$\sum X_{1j} \cdot Y_e = N \cdot k_1 \quad (\text{II.19})$$

$$\sum X_{2j} \cdot Y_e = N \cdot k_2 \quad (\text{II.20})$$

$$\sum X_{3j} \cdot Y_e = N \cdot k_3 \quad (\text{II.21})$$

Les coefficients C_0, k_1, k_2, k_3 sont définis par :

$$C_0 = \frac{\sum Y_e}{N} \quad (\text{II.22})$$

$$k_1 = \frac{\sum X_{1j} \cdot Y_e}{N} \quad (\text{II.23})$$

$$k_2 = \frac{\sum X_{2j} \cdot Y_e}{N} \quad (\text{II.24})$$

$$k_3 = \frac{\sum X_{3j} \cdot Y_e}{N} \quad (\text{II.25})$$

L'équation [II.6] est donc définie :

$$Y = C_0 + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3 \quad (\text{II.26})$$

Il faut décodifier l'équation [II.6] en remplaçant les X_{ij} par leurs valeurs selon la relation :

$$X_i = \frac{2(\ln X_i - \ln X_{\max})}{(\ln X_{\max} - \ln X_{\min})} + 1 \quad (\text{II.27})$$

Nous avons pour les paramètres (V_c, f_z, a_p)

$$X_1 = \frac{2(\ln V_c - \ln V_{c \max})}{(\ln V_{c \max} - \ln V_{c \min})} + 1 \quad (\text{II.28})$$

$$X_2 = \frac{2(\ln f_z - \ln f_{z \max})}{(\ln f_{z \max} - \ln f_{z \min})} + 1 \quad (\text{II.29})$$

$$X_3 = \frac{2(\ln a_p - \ln a_{p \max})}{(\ln a_{p \max} - \ln a_{p \min})} + 1 \quad (\text{II.30})$$

Simplifions la forme de ces équations en posant :

$$\ln X_{\max} - \ln X_{\min} = A_i \quad (\text{II.31})$$

$$\ln X_{\max} + \ln X_{\min} = B_i \quad (\text{II.32})$$

Nous aurons :

$$X_1 = \frac{2}{A_1} \cdot \ln X_1 - \frac{B_1}{A_1} \quad (\text{II.33})$$

$$X_2 = \frac{2}{A_2} \cdot \ln X_2 - \frac{B_2}{A_2} \quad (\text{II.34})$$

$$X_3 = \frac{2}{A_3} \cdot \ln X_3 - \frac{B_3}{A_3} \quad (\text{II.35})$$

L'équation [II, 6] prendra la forme suivante une fois les valeurs des X_i injectées :

$$Y = C_0 + k_1 \left[\frac{2}{A_1} \cdot \ln X_1 - \frac{B_1}{A_1} \right] + k_2 \left[\frac{2}{A_2} \cdot \ln X_2 - \frac{B_2}{A_2} \right] + k_3 \left[\frac{2}{A_3} \cdot \ln X_3 - \frac{B_3}{A_3} \right]$$

Le développement de cette forme nous donne :

$$Y = C_0 + \frac{2k_1}{A_1} \cdot \ln X_1 - k_1 \frac{B_1}{A_1} + \frac{2k_2}{A_2} \cdot \ln X_2 - k_2 \frac{B_2}{A_2} + \frac{2k_3}{A_3} \cdot \ln X_3 - k_3 \frac{B_3}{A_3}$$

$$\text{Posons : } C_0 - k_1 \frac{B_1}{A_1} - k_2 \frac{B_2}{A_2} - k_3 \frac{B_3}{A_3} = d_0$$

$$\frac{2k_1}{A_1} = d_1 ; \quad \frac{2k_2}{A_2} = d_2 ; \quad \frac{2k_3}{A_3} = d_3$$

Le modèle prendra la forme :

$$Y = d_0 + d_1 \ln X_1 + d_2 \ln X_2 + d_3 \ln X_3 \quad (\text{II.36})$$

ce qui permet d'écrire

$$Y = e^{d_0} \cdot X_1^{d_1} \cdot X_2^{d_2} \cdot X_3^{d_3} \quad (\text{II.37})$$

Avec l'intervention des produits combinés des paramètres notre modèle prendra la forme suivante :

$$Y = d_0 + d_1 X_1 + d_2 X_2 + d_3 X_3 + d_{12} X_1 X_2 + d_{13} X_1 X_3 + d_{23} X_2 X_3 \quad (\text{II.38})$$

II-2: Procédure expérimentale

II-2 .1 Fraisage conventionnel

Les expériences nécessaires à l'étude du fraisage conventionnel des matériaux durs ont été effectuées dans les laboratoires d'usinage du département de Génie Mécanique de l'université Badji Mokhtar d'Annaba et le laboratoire de mécanique des structures LMS l'université de Guelma.

Pour augmenter la fiabilité des résultats et satisfaire le caractère complexe et aléatoire du processus de coupe, les essais ont été réalisés d'après la méthode classique de longue durée, associée à celle de planification des expériences Thèse de L.Boulanouar [6].

- **Machines-outils**

Nous avons réalisé les essais de fraisage conventionnel sur les matériaux à étudier sur une Fraiseuse verticale de type **6H11**, de grande rigidité et de Puissance 4,5 kW.

Les mesures des efforts de coupe ont été réalisées sur une fraiseuse universelle modèle **ALMO 2.5**



Figure II.1 - Fraiseuse verticale, modèle 6H11

Les efforts de coupe sont mesurés à partir de la plate forme d'acquisition schématisée (Figure II.2)

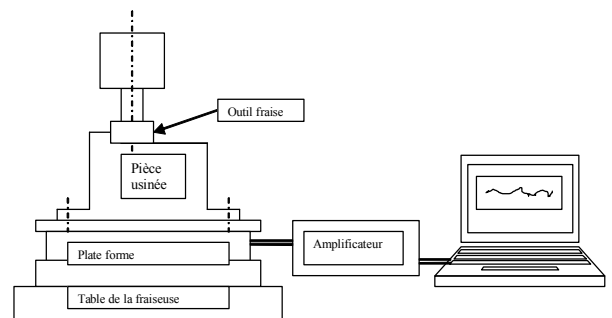


Figure II.2 – Montage de mesure des efforts de coupe

- **Matière usinée**

Les éprouvettes des essais (figure II.3) sont en acier C18, C45, 100Cr6, La composition chimique et les caractéristiques mécaniques de ces aciers sont données dans les tableaux (II.4, II.5, II.6)

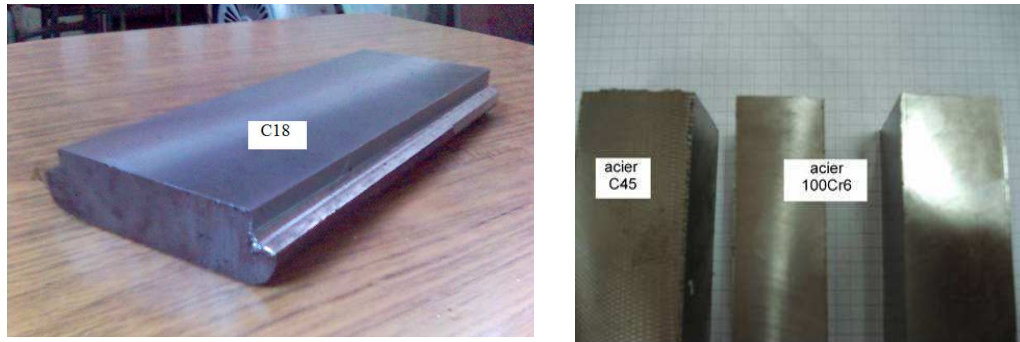


Figure II.3 - Eprouvettes d'essai en acier C18, C45, 100Cr6

Tableau II.4 : Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'Acier C18.

Composition Chimique							Caractéristiques Mécaniques		
C	Si	P	Cr	V	Ni	Mo	HRB	Rm	ΔL
0,18	0,174	0,05	0,035	traces	traces	0,2	77	60 MPa	10%

Tableau II.5 : Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'Acier C45.

Composition Chimique								Caractéristiques Mécaniques		
C	Si	P	Mn	Cr	Ni	Mo	V	HRB	Rm	ΔL
0,45÷0,51	0.15÷0.35	Max 0.03	0.5÷0.8	1.35÷1.60	trace	0.1	trace	180	600 MPa	17 %

Tableau II.6 : Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'Acier 100Cr6.

Composition Chimique								Caractéristiques Mécaniques			
C	Si	P	Mn	Cr	Ni	Mo	V	HRB	HRC	Rm	ΔL
0.95÷1.1	0.15÷0.35	Max 0.03	0.2÷0.4	1.35÷1.60	0,15	0.1	traces	230	30	770	10 %

- **Outil de coupe**

L'outil de coupe utilisé (figure II.4) est une fraise à surfacer de 100 mm de diamètre, ayant huit dents en carbure métallique de nuance ISO P35. Elle a respectivement la géométrie et les désignations ISO suivantes: $\alpha_0=11^\circ$, $\gamma_0=3^\circ$, $\kappa_r=75^\circ$ et SPMR 12 03 08, (pour les plaquettes non revêtues) et SPMR 12 03 12, (pour les plaquettes revêtues).

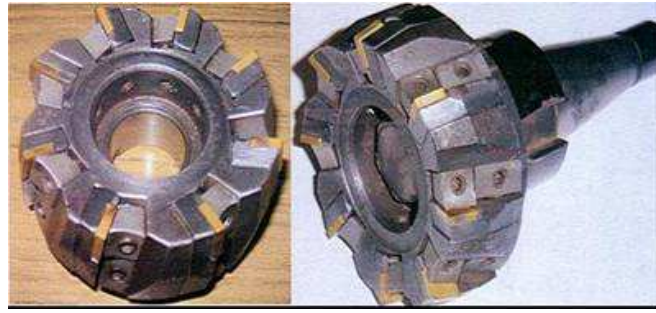


Figure II.4 - Photo de l'outil fraise utilisé pour les essais

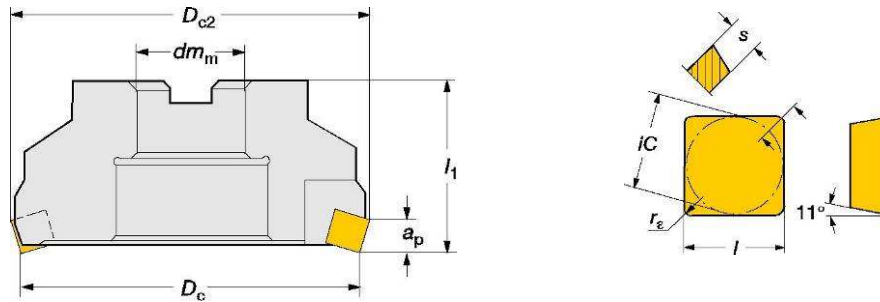


Figure II.5 - Détails de l'outil fraise et de la plaquette.

- **Caractéristiques des plaquettes de coupe :**

L'outil fraise utilisé pour réaliser les expériences d'usinage est équipé par huit (08) plaquettes amovibles

Deux nuances de carbure métallique de type P35 selon la norme I.S.O, et de désignation : S.P.M.R .12. 03 1,2 FR de composition chimique 68% de WC 18% de TIC + TAC et 14% de Co. La première nuance est non revêtue et la deuxième est revêtue par une couche de nitrure de titane TiN d'une épaisseur de 6 μ m environ.

Caractéristiques mécaniques : 77 HRC, Rm= 2250 N/ mm.

- **Appareil de mesure de l'usure**

Pour mesurer l'usure des dents de la fraise, un microscope optique d'atelier modèle MMN-2 ayant une précision de mesure de l'ordre de 5 μ m (figure II.7) a été utilisé. L'appareil est équipé d'un dispositif spécialement conçu et réalisé par nos soins permettant le contrôle des plaquettes sans nécessité de démontage de ces dernières du corps de la fraise.



Figure II.6 - Microscope optique modèle MMN-2

Pour donner des mesures d'usure exactes, la plaquette est mise en coordonnées grâce à l'oculaire du microscope d'après le schéma de la figure II.8.

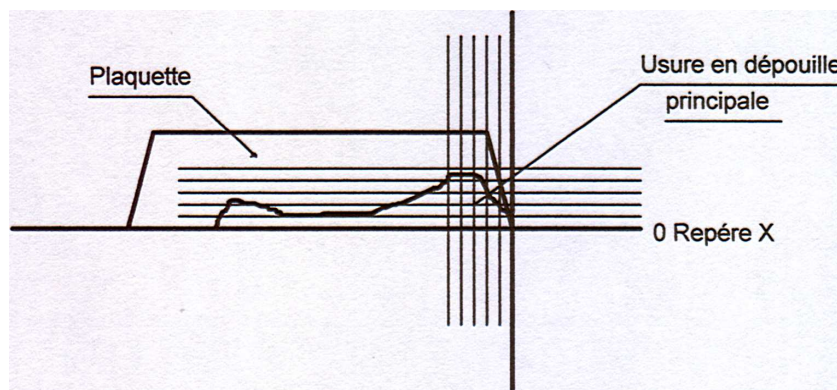


Figure II.7 - Mise en coordonnées de la plaquette :

Les examens morphologiques de l'usure des plaquettes testées sont réalisés au laboratoire de physique et mécanique des matériaux LPMM de l'université de Metz.

Les microscopes optiques et le microscope électronique à balayage sont montrés sur la figure II.8

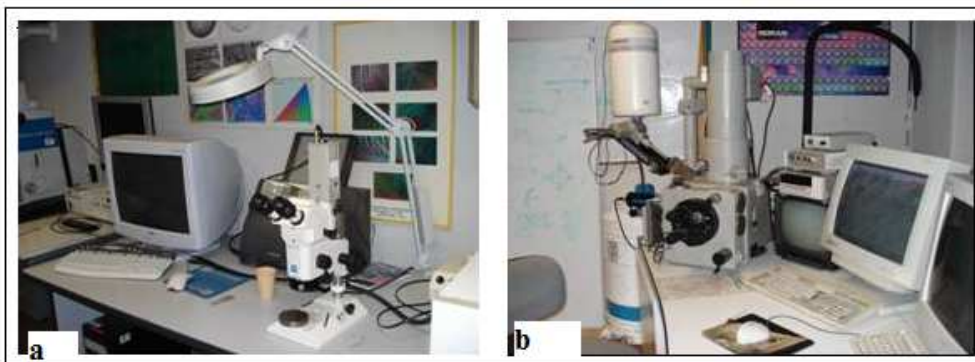


Figure II.8 – a) Microscope optique du laboratoire LPMM,
b) Microscope électronique à balayage (M.E.B.)

- **Appareil de mesure de l'état de surface.**

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.9 - Rugosimètre Mitutoyo SJ 201.M.

- **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 suivants :

$V_c = (60 \div 150)$ m/min ; $f_z = (0,02 \div 0,2)$ mm/dent, $a_p = (1 \div 2,5)$ mm et une valeur constante $a_e = 98$ mm. Les essais ont été effectués à sec.

La valeur de l'indice d'usure admissible VB retenue selon la norme ISO est 0,35 mm.

Tableau II.7 Plan d'expérience adopté pour les essais d'usinabilité des aciers testés

N° Essais	Paramètres d'entrée						Paramètres de sortie Y_i
	Valeurs codifiées			Valeurs réelles			
	X_1	X_2	X_3	V_c	f_z	a_p	
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	Y_1
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	Y_2
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	Y_3
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	Y_4
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	Y_5
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	Y_6
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	Y_7
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	Y_8

II-2-2 Fraisage à grande vitesse

Les essais d'usinage grande vitesse sont réalisés par le procédé de fraisage UGV des couches de rechargement en stellite 6 des blocs d'acier X38CrMoVa5 utilisés pour la fabrication de matrices et des moules. L'outil employé est une fraise cylindrique de dressage et de rainurage à deux plaquettes en carbure revêtu.

- **Machine-outil**
- centre d'usinage RP600 instrumenté au moyen des contrôleurs de puissance Wattpilote.




	<h3>Spécifications</h3>
	<p>Centre d'usinage 3 axes Puissance 17 Kw Vitesse de rotation Maxi 36000 tr/min Vitesse d'avance maxi 60000mm/min HSK E50 30 outils Diamètre maxi 20mm Courses maxi X= 600mm, Y=540mm, Z=300mm Commande numérique RMS6, programmation ISO</p>
	

Figure II.10 - Spécifications techniques du centre d'usinage instrumenté au moyen de waytpilotes

Eprouvettes testées

Les éprouvettes testées sont des blocs en acier fortement allié X38CrMoVa5 revêtues par chargement monocouche et bicouche en stellite 6 par procédé PTA.

La dureté moyenne de la couche du rechargement est de 600 HV 0.2

• **Le substrat**

C'est un bloc en acier X38CrMoVa5 de dimensions en mm (180x100x65) rechargé par couche en stellite 6.

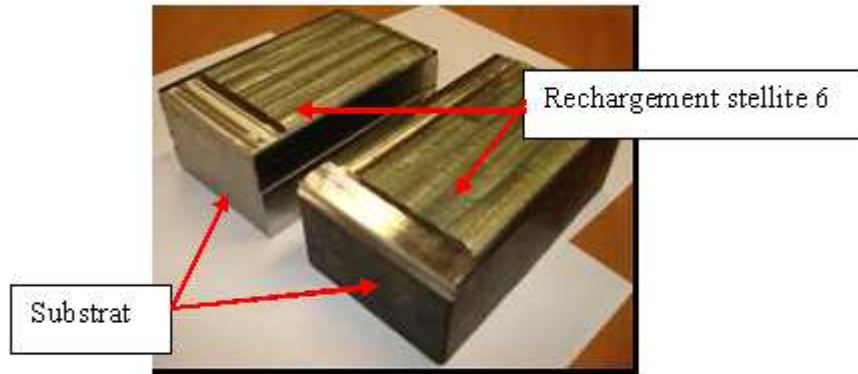


Figure II.11 : Eprouvettes à tester

(a)

Element	% Weight	Element	% Weight
C	1,09	W	5,17
Si	1,07	Ti	0,01
Mn	0,48	Fe	2,88
Cr	28,17	Ta	0,04
Ni	1,92	Co	Balanced
Mo	0,96		

(b)

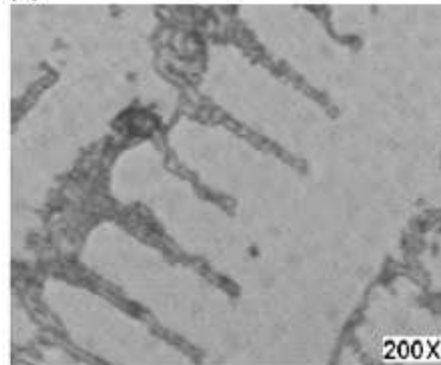


Figure II.12 a) composition chimique du stellite 6, b) vue microscopique du stellite 6

• **Outil de coupe employé**

L'outil de coupe une fraise cylindrique à deux plaquettes en carbure. Cinq nuances de substrat avec différents revêtements sont testées. (voir tableau II.7)

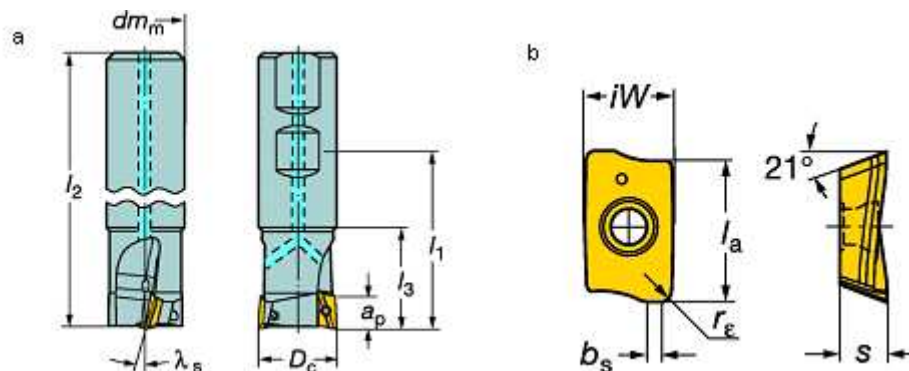


Figure II.13 - a) Fraise coromill 390, b) détails plaquette

- **Plaquettes de coupe testées**

Les plaquettes sélectionnées pour les tests sont présentées au tableau II.8

Tableau II.8 : Indications sur les plaquettes d'après les références Sandvik

Plaquettes	Substrat	Revêtement	Procédé revêtement
3040	Bicarbure à grains fin Riche en cobalt	Multicouches TiN	PVD
1030	Bicarbure à grains fin Haute tenacité	Multicouches TiN+TiCN+TiAlN	PVD
4240	Bicarbure à grains fin Riche en cobalt	Multicouches TiN+ TiCN+Al ₂ O ₃	CVD
4030	Bicarbure à grains fin Riche en cobalt	Multicouches TiN+ TiCN	PVD
H13.A	Bicarbure à grains moyens	AlTiN nanocristallin	PVD

- **Technique d'usinage adoptée**

Fraisage en avalant suivant l'axe Y, usinage par passes sur ae.

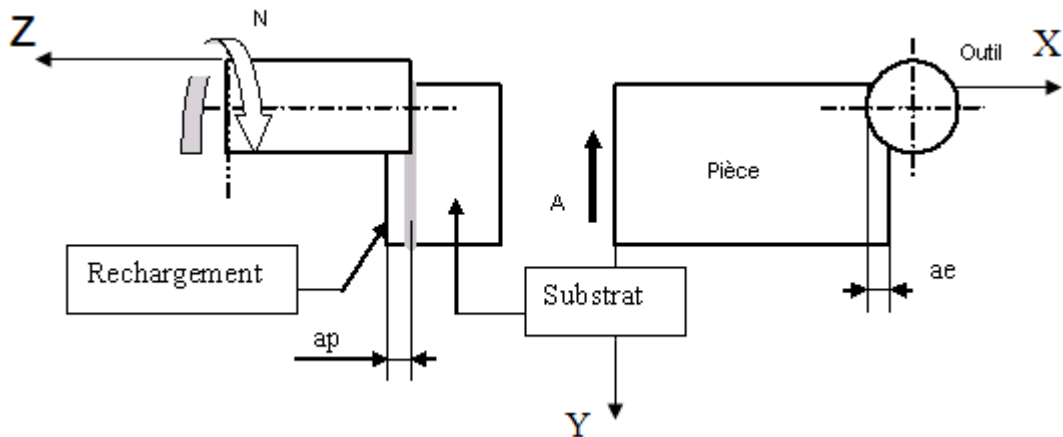


Figure II.14 - Schéma de principe de l'usinage

Tableau II.9 : Paramètres de coupe rechargement monocouche

Vc m/min	Df mm	N tr/min	fz mm/d	ae mm	ap mm	A mm/min
190	16	3800	0,067	0,3	3	512
Plaquettes testées		3040, 1030, 4240, 4030, H13.A				

Les plaquettes testées ont travaillé dans les mêmes conditions et avec les mêmes paramètres de coupe

Tableau II.10 : Paramètres de coupe rechargement bicouches

Vc m/min	Df mm	N tr/min	fz mm/d	ae mm	ap mm	A mm/min
190	16	3800	0,067	0,3	5	512
Plaquettes testées		1030			H13.A	
Vc m/min	Df mm	N tr/min	fz mm/d	ae mm	ap mm	A mm/min
230	16	4600	0,067	0,3	5	650
Plaquettes testées		1030,			H13.A	
Vc m/min	Df mm	N tr/min	fz mm/d	ae mm	ap mm	A mm/min
120	16	2400	0,067	0,3	5	321
Plaquettes testées		3040, 1030, 4240, 4030, H13.A				

- Surveillance de l'usinage
- Dispositifs Wattpilote

WattPilote Single a été spécialement conçu pour les machines de production monobroche utilisant un grand nombre d'outils : centre d'usinage, machine spéciale avec changeur d'outils.

Surveillance des usinages critiques

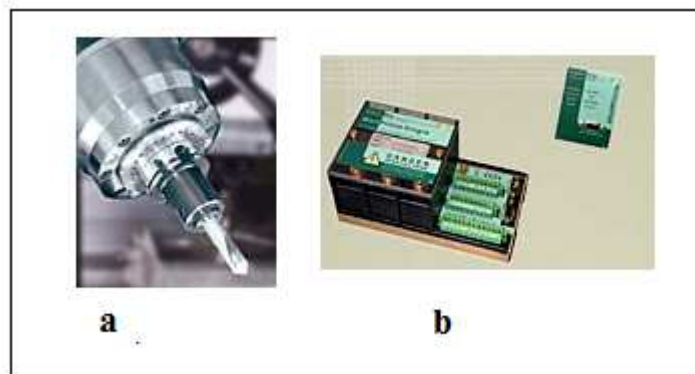


Figure II.15 - a) Photo d'une broche avec porte outil HSK, b) bloc électronique WattPilote

L'affichage des courbes en temps réel, la visualisation des courbes d'usinage, le réglage graphique des paramètres, la sauvegarde des paramètres

Dans le cadre de la gamme de produits pour la surveillance de l'usure et du bris d'outil, un logiciel de supervision des appareils WattPilote est proposé. Développé pour les ordinateurs PC sous environnement Windows, WP-VISU est un complément indispensable pour la visualisation et l'interprétation graphique des cycles d'usinage. D'une utilisation très simple, cet outil d'analyse d'usinage permet non seulement de visualiser et d'optimiser les réglages du

WattPilote, mais aussi d'archiver les courbes d'usinage pour les comparer au fil du temps. Le dialogue avec WattPilote est réalisé au moyen d'une liaison série différentielle (RS422). Le logiciel est livré avec un coupleur RS422/RS232 pour connecter WattPilote sur tout PC standard.

- **Caractéristiques** : Nombre maximum d'usinages surveillés : 120 Durée minimum des cycles d'usinage : 0,07 sec. Durée maximum des cycles d'usinage : 50 minutes Vitesse de réaction : 0,005 sec. Mémorisation usinages : 30 derniers Mémorisation défauts : 30 derniers Mémorisation taux d'usure : 65000 derniers Contrôle puissance, dérivée, énergie : Simultanés Précision des mesures : 0.1 ‰

L'environnement convivial de Windows est utilisé pour réaliser tous les réglages des appareils. Chaque appareil est nommé puis reconnu automatiquement à chaque nouvelle connexion. Les répertoires et fichiers nécessaires aux appareils sont créés, en toute transparence, par le logiciel à la première connexion. Il n'est donc pas utile de maîtriser le système d'exploitation Windows pour l'utilisation de WP_VISU.

- **Mesure de l'usure**

Cette opération s'effectue, sur une machine de mesure vidéo combinant un système vidéo, un éclairage et un traitement informatique, Le système TESAVisio répond à la nécessité d'analyse du laboratoire. En effet, suite à tout usinage, cet outil permet de visualiser l'usure ou la destruction des plaquettes et d'en mesurer les déformations. Cet outil est aussi utilisé pour l'analyse des copeaux.

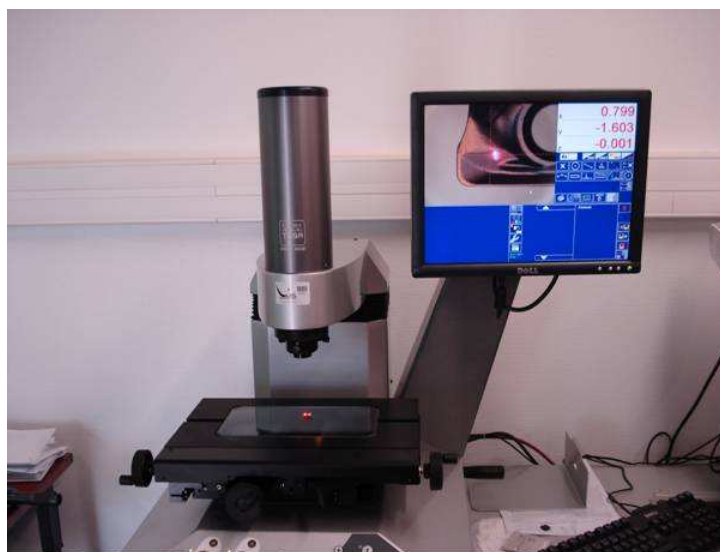


Figure II. 16 - Microscope de mesure de l'usure vidéo (TESA- Visio 300 DCC)

TRAITEMENT ET ANALYSE DES RESULTATS

III.1. Analyse des résultats (Etude expérimentale sur le fraisage conventionnel)

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'usinabilité et l'analyse relative au fraisage conventionnel des aciers testés.

III.1.1 Analyse des résultats (usinabilité de l'acier C18)

a) Analyse des résultats d'usure

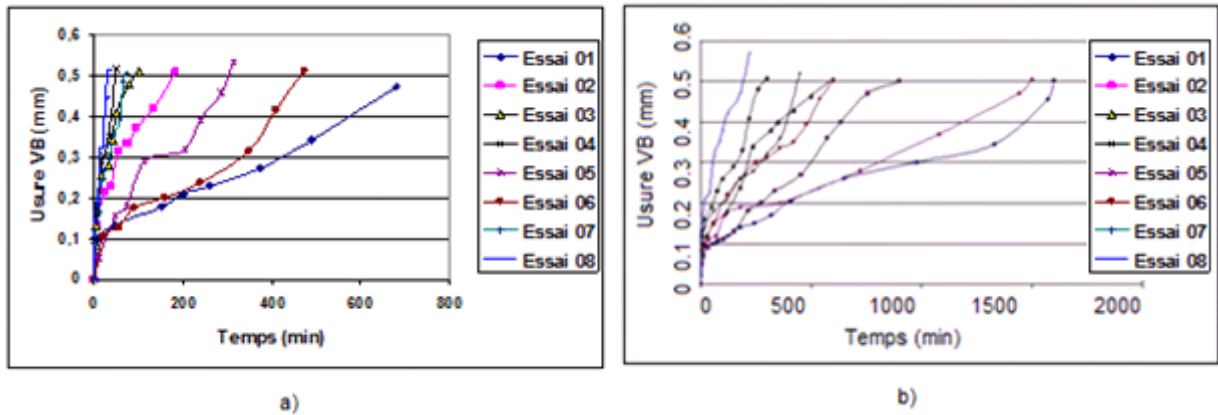


Figure III.1 Courbes d'usure des plaquettes P35 pour les huit régimes testés, fraisage de l'acier C18, a) Plaquettes P35 non revêtues, b) Plaquettes P35 revêtues

L'analyse des courbes d'usure VB en fonction du temps (figure III.1), montre que pour les huit régimes testés une évolution et une tendance identique aux courbes d'évolution citées dans les références [4, 5, 6,7]. L'analyse des graphes représentant l'usure des plaquettes de la fraise en fonction du temps pour les huit régimes de coupe conformément au plan des expériences montre d'une manière générale la même tendance.

Pour les régimes forts (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe élevées), nous remarquons la rupture de certaines plaquettes c'est à dire la disparition accidentelle de la partie active à cause du détachement de petits morceaux situation connue sous le terme d'ébréchure.

Cet état de fait n'est pas inédit car il faut savoir que le carbure métallique P35 présente un certain degré de fragilité relative [6, 7, 9, 21]. Pour les régimes de coupe s'accompagnant de chocs nous avons enregistré la disparition de la partie active de certaines plaquettes (dents).

L'usure évolue rapidement par rapport au temps lorsque la vitesse de coupe est élevée (régimes 2, 4, 6,8), la tenue de coupe diminue. Lorsque la vitesse de coupe est faible (régimes 1, 3, 5,7), l'usure évolue lentement, la tenue de coupe augmente. L'influence de l'avance semble être moins que celle de la vitesse de coupe, mais il faut noter que la tenue des

plaquettes diminue aussi lorsque l'avance est à sa valeur maximale (régimes 3, 4, 7,8). La profondeur de passe n'a pas d'influence remarquable sur la tenue des plaquettes.

Tableau III.1 Valeurs des tenues de coupe pour les huit régimes testés (usinage de l'acier C18)

N° essais	Paramètres d'entrée						Tenue (T) (min)	
	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Plaquettes Non revêtues	Plaquettes revêtues
	X1	X2	X3	V	fz	ap		
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	490	1400
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	90	575
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	45	215
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	30	120
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	370	1250
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	220	360
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	45	230
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	22	80

Le bicarbure P35 non revêtu choisi pour réaliser la première série de tests sur l'acier C18 a donné une résistance à l'usure relativement faible comparativement au bicarbure P35 revêtu TiN. Nous pouvons relever à partir du tableau III.1 pour l'essai N° 01 une tenue T=490min pour le carbure non revêtu et une tenue T=1400min. Le carbure P35 avec le revêtement en nitrure de titane a donné des tenues de coupe d'environ quatre fois plus grandes. Les résultats obtenus au cours des tests d'usinabilité de l'acier C18, ont permis de choisir les plaquettes P35 avec le revêtement monocouche en TiN pour le reste de l'étude expérimentale.

Le modèle mathématique III.1, exprime la tenue T en fonction des paramètres du régime de coupe (usinage de l'acier C18 avec les plaquettes en carbure P35 revêtues TiN)

Le traitement statistique des résultats a permis la détermination du modèle mathématique suivant

$$T = e^{7,555} \cdot Vc^{-0,683} \cdot fz^{-0,582} \cdot ap^{-0,155} \quad (III.1)$$

L'analyse des valeurs des coefficients marquant l'influence de chaque paramètres du régime de coupe dans l'équation (III.1) du modèle de la tenue obtenue montre que le degré d'influence de la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de passe est justifié par les valeurs absolues des exposants. En effet les valeurs des exposants, (**0.683** pour la vitesse de coupe, **0.582** pour l'avance par dent, **0.155** pour la profondeur de passe) indiquent que la tenue T est sensible à l'effet de la vitesse de coupe. L'avance par dent influe aussi sur la tenue mais avec moins d'effet. L'influence de la profondeur de passe est très faible. L'explication

réside dans le fait qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance. La température augmente dans la zone de coupe ce qui accélère le processus de l'usure et par conséquent la tenue diminue. La faible influence de la profondeur de passe s'explique par le fait que l'augmentation de la surface de contact améliore les conditions d'évacuation de la chaleur de la zone de coupe. [13, 15, 17]

b) Analyse des résultats des efforts (fraisage de l'acier C18)

La valeur moyenne des composantes des efforts de coupe relevés par la plate forme d'acquisition au cours des essais de fraisage pour les huit combinaisons du régime de coupe, est représentée sur la figure III.2 et répertoriée dans le tableau III.2.

L'analyse des valeurs ainsi obtenues montre que les efforts de coupe les plus importants sont relevés au cours de l'essai n°7 pour une vitesse de coupe $V_c=60\text{m/min}$, une avance par dent $f_z=0.2\text{mm/dent}$ et une profondeur de passe $a_p=2,5\text{mm}$. Ce résultat est physiquement justifié parce que la tranche du matériau cisailée est maximale, en plus la vitesse d'enlèvement du copeau est minimale. Pour une puissance de coupe donnée, lorsque la vitesse diminue, l'effort augmente. Les valeurs minimales relevées des efforts de coupes en été enregistrées au cours de l'essai n°2 pour une vitesse de coupe $V_c=150\text{m/min}$, une avance par dent $f_z=0,02\text{mm/dent}$, $a_p=1\text{mm}$. Cela est aussi physiquement logique, nous travaillons avec la tranche cisailée la plus faible et la vitesse de coupe maximale.

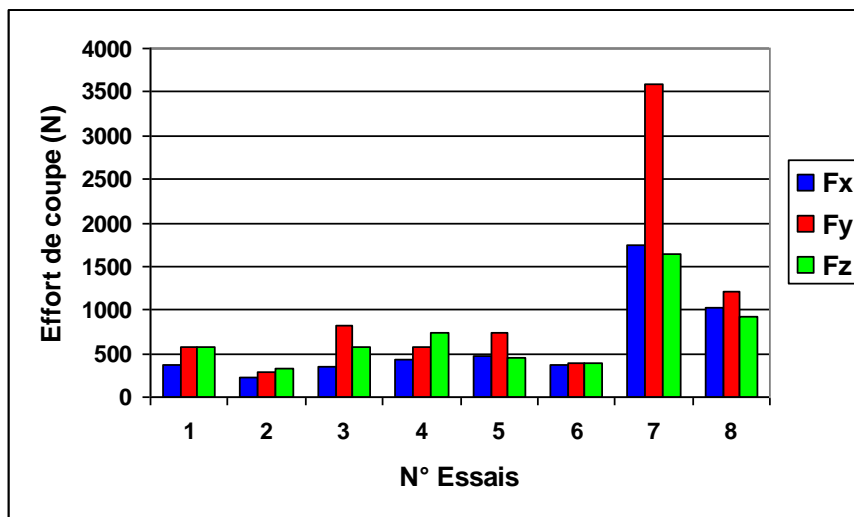


Figure III.2 - Valeurs des composantes de l'effort de coupe pour les huit essais
Fraisage de l'acier ISO C18

Tableau III. 2 : Valeurs des Composantes de l'effort de coupe (Fraisage de l'acier C18)

N° Essais	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Efforts de coupe (N)		
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc	fz	ap	Fx	Fy	Fz
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	308	443	510
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	179	230	302
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	354	978	724
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	422	600	708
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	607	860	466
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	410	404	372
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	1506	3342	1385
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	1023	1202	880

Le traitement statistique des résultats a permis la détermination des modèles mathématiques suivants :

$$F_x = e^{7,977} \cdot Vc^{-0,312} \cdot fz^{0,306} \cdot ap^{1,048} \quad (III.2)$$

$$F_y = e^{11,092} \cdot Vc^{-0,797} \cdot fz^{0,455} \cdot ap^{0,859} \quad (III.3)$$

$$F_z = e^{8,74} \cdot Vc^{-0,334} \cdot fz^{0,342} \cdot ap^{0,268} \quad (III.4)$$

La composante Fx est aussi appelée effort d'avance Fa, elle est sensible aux variations de la vitesse d'avance.

Le modèle mathématique III.2, exprime l'influence des paramètres du régime de coupe sur la valeur de l'effort d'avance, composante Fx appelée aussi effort d'avance Fa, elle est sensible aux variations de la vitesse d'avance.

Lorsque la vitesse de coupe augmente, la valeur de Fx diminue et inversement. L'influence de la vitesse n'est pas importante, la valeur absolue de l'exposant exprimant cette influence est égale à **0,312**. La profondeur de passe est le paramètre le plus influant sur la valeur de la force Fx. la valeur absolue de l'exposant exprimant cette influence est égale à **1,048**.

Le modèle mathématique III.3, exprime l'influence des paramètres du régime de coupe sur la valeur de l'effort tangentiel, composante Fy appelée aussi effort tangentielle de coupe Fc, elle est sensible aux variations de la vitesse de coupe. L'analyse du modèle montre que la vitesse de coupe est le paramètre le plus influant. La valeur absolue de l'exposant exprimant cette influence est égale à **0,797**. La profondeur de passe associée au mouvement d'avance est le paramètre qui détermine la grandeur physique de l'effort tangentiel étant

donné que l'avance et la profondeur détermine la grandeur de la tranche à cisailer d'où le coefficient spécifique de coupe. La valeur absolue de l'exposant exprimant l'influence de la profondeur de passe a_p est égale à **0,859**.

Le modèle mathématique III.4, exprime l'influence des paramètres du régime de coupe sur la valeur de l'effort axial, composante F_z appelée aussi effort axial de coupe F_a agissant le long de l'axe de la broche. L'analyse du modèle montre que cette composante n'est pas particulièrement sensible à aucun des paramètres du régime de coupe. La valeur moyenne absolue de l'exposant exprimant l'influence des paramètres est égale à **0,330**.

c) Analyse des résultats de la rugosité de la surface usinée (fraisage de l'acier C18)

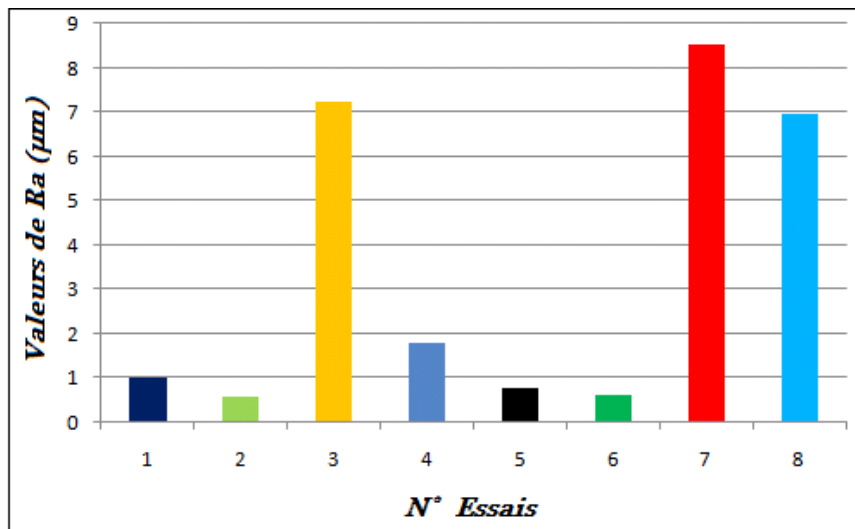


Figure III.3 - Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée pour les huit essais
Fraisage de l'acier ISO C18

Tableau III. 3 : Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée (Fraisage de l'acier C18)

N° Essais	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Rugosité Ra (µm)
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc	fz	ap	
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	1,025
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	0,583
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	7,236
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	1,818
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	0,765
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	0,610
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	8,507
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	6,940

L'analyse de l'aspect micrographique de la surface usinée par le fraisage de face montre que les surfaces fraisées présentent des sillons (trajectoires d'écrites par l'arête tranchante et le bec de la dent). Plus la distance en les sillons est petite (avance par dent faible), plus l'aspect micrographique de la surface s'améliore. Il faut savoir que dans le processus de la formation du copeau plusieurs facteurs difficiles à contrôler interviennent et influent sur la qualité de la surface usinée. Nous citons les plus déterminants à savoir l'arête rapportée, les vibrations du système usinant, l'usure de l'outil et la température engendrée par la coupe [9, 10,30].

L'analyse des résultats de la rugosité Ra de la surface usinée de chaque palier de l'éprouvette pour les différentes combinaisons du régime de coupe (figure III.3), montre que pour les essais 3, 7, et 8 les rugosités relevées sont importantes. L'analyse des valeurs du tableau III.3, montre que la valeur de la rugosité la plus faible est celle obtenue au cours de l'essai n° 2 avec $V_c = 150$ m/min, $f_z = 0,02$ mm/d, $a_p = 1$ mm. La valeur de Ra relevée est égale à **0,750µm**, c'est une grandeur que l'on obtient en rectification. Cela explique que si on considère l'usinabilité de l'acier C18 par le critère complémentaire qui est la rugosité de la surface usinée, nous dirons que l'acier C18 a une bonne usinabilité. Le régime 02 est suivi par le régime 06 avec $V_c = 150$ m/min, $f_z = 0,02$ mm/d, $a_p = 2,5$ mm. C'est résultats sont en parfaite conformité avec les conclusions citées dans la littérature [30, 31].

La valeur de la rugosité la plus grande est mesurée au cours de l'expérience 07 avec $V_c = 60$ m/min, $f_z = 0,2$ mm/d, $a_p = 2,5$ mm. Ce résultat est aussi en parfaite adéquation avec la littérature. Pour les conditions technologiques d'usinage et particulièrement le fraisage, les essais d'usinage 3, 7 et 8, ne sont pas recommandés. Valeurs de rugosité très élevées, durée de vie relativement courte.

Le modèle mathématique III.5, exprime l'influence des paramètres du régime de coupe sur la rugosité Ra de la surface usinée.

$$Ra = e^{5,844} \cdot V_c^{-0,648} \cdot f_z^{0,861} \cdot a_p^{0,342} \quad (III.5)$$

Les paramètres les plus influant sont la vitesse de coupe et l'avance par dent comme le montre le modèle mathématique. La profondeur de passe a une faible influence.

L'analyse de l'aspect micrographique de la surface usinée par le fraisage de face montre que les surfaces fraisées présentent des sillons (trajectoires décrites par l'arête tranchante et le bec de la dent). Plus la distance entre les sillons est faible, (avance par dent faible) plus l'aspect micrographique de la surface usinée est lisse. Lorsque l'avance par dent

augmente pour une même vitesse de coupe, la distance entre les sillons laissés par le passage des dents de la fraise devient plus importante, l'état de surface se trouve ainsi dégradé. La valeur absolue de l'exposant exprimant l'influence de l'avance par dent est la plus grande est égale à **0,861**. La rugosité Ra de la surface fraisée est très sensible aux variations de l'avance.

Les essais d'usinabilité de l'acier C18 défini comme étant un acier de référence nous ont montré que pour les conditions employées, le matériau se donne bien à l'usinage. En effet le copeau obtenu s'écoule bien sur la surface d'attaque des plaquettes de l'outil fraise. C'est aussi un copeau continu avec une bonne plasticité.

III.1.2 Analyse des résultats (usinabilité de l'acier C45)

a) Analyse des résultats d'usure

Les courbes d'évolution de l'usure en fonction du temps lors du fraisage de l'acier C45, figure III.4, ont une allure générale classique et conforme aux courbes obtenues et publiées par les différents chercheurs. [6]

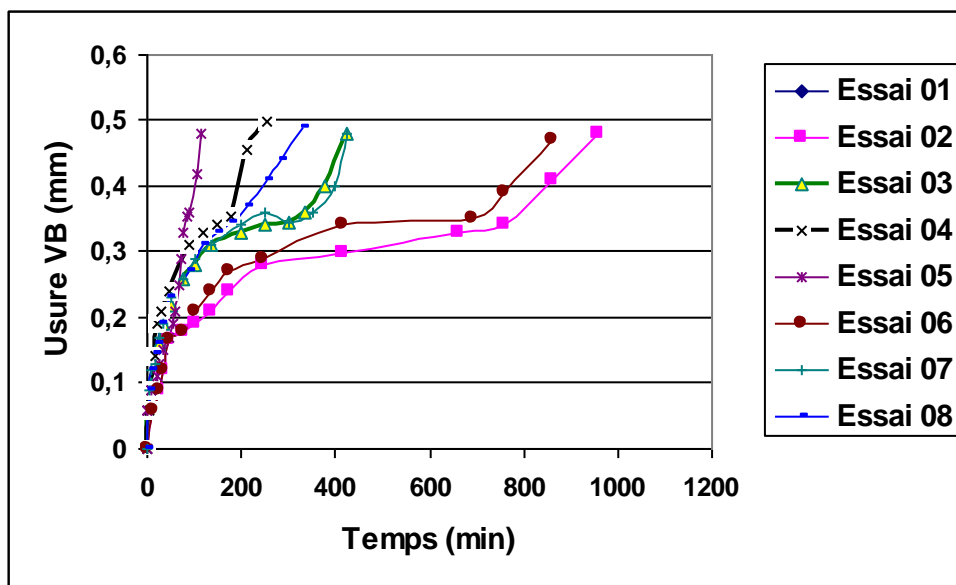


Figure III.4 Courbes d'usure des plaquettes P35 pour les huit régimes testés, fraisage de l'acier C45, Plaquettes P35 revêtues

L'analyse de l'influence des paramètres du régime de coupe sur les critères d'évaluation de l'usinabilité, montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe la tenue de l'outil caractérisée par l'évolution de l'usure moyenne des plaquettes diminue. L'augmentation de l'avance provoque aussi la réduction la durée de vie de l'outil mais avec un degré moindre par rapport à la vitesse de coupe. La profondeur de passe n'a pas une influence directe sur la tenue.

Les valeurs des tenues obtenues au cours des essais portées au tableau III.4, montrent que la tenue la plus faible est celle obtenue au cours du régime le plus sévère, vitesse de coupe, avance et profondeur maximales (régime 08). La meilleure tenue est obtenue au cours du régime où la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur sont à leurs valeurs minimales (régime 01).

Tableau III.4 Valeurs des tenues de coupe pour les huit régimes testés (usinage de l'acier C45)

N° Essais	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Tenue T (min)
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc	fz	ap	
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	850
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	345
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	175
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	80
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	690
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	216
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	190
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	45

Le traitement statistique des résultats a permis la détermination du modèle mathématique suivant :

$$T = e^{9,089} \cdot Vc^{-1,169} \cdot fz^{-0,641} \cdot ap^{-0,319} \quad (III.6)$$

L'analyse de l'influence des éléments du régime de coupe définis par les modèles mathématiques III.6, montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe la tenue en service des plaquettes diminue. Cela est montré par la valeur absolue **1,169** de l'exposant exprimant l'influence de la vitesse de coupe. L'avance par dent est aussi un facteur dont l'influence sur la durée de vie est considérable la valeur absolue de l'exposant est égale à **0,641**.

b) Analyse des résultats des efforts de coupe

La figure III.5, montre la valeur des composantes Fx, Fy et Fz de l'effort de coupe agissant sur la pièce au cours du fraisage. Ces valeurs moyennes sont plus importantes que celles relevées au cours du fraisage de l'acier C18.

L'analyse des composantes de l'effort de coupe montre qu'avec l'accroissement de la vitesse de coupe les efforts de coupe diminuent. Par rapport à l'avance par dent fz, l'avance axiale ap influe considérablement sur l'évolution des efforts de coupe. Cela est

justifié parce que l'avance et la profondeur de passe forment l'épaisseur de la tranche cisailée.

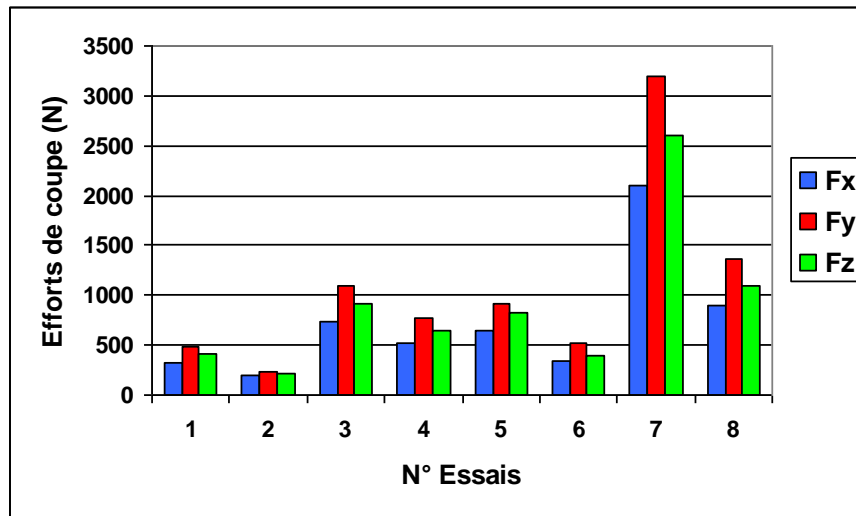


Figure III.5 - Valeurs des composantes de l'effort de coupe pour les huit essais
Fraisage de l'acier ISO C45

Tableau III.5 Valeurs des Composantes de l'effort de coupe (Fraisage de l'acier C45)

N° Essais	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Efforts de coupe (N)		
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc	fz	ap	Fx	Fy	Fz
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	320	490	410
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	190	240	220
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	733	1100	920
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	520	780	650
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	650	920	820
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	350	520	400
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	2100	3200	2600
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	900	1360	1100

Les modèles mathématiques III.7, III.8 et III.9 définissant l'influence des différents paramètres du régime de coupe sur la valeur des composantes de l'effort de coupe agissant au cours du fraisage de l'acier C45 montrent clairement cette tendance.

$$F_x = e^{10,0467} \cdot V_c^{-0,636} \cdot f_z^{0,4292} \cdot ap^{0,7969} \quad (III.7)$$

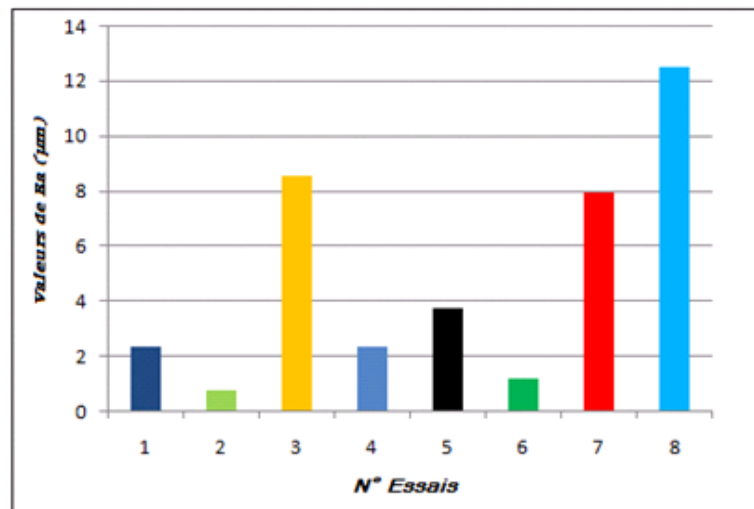
$$F_y = e^{10,6769} \cdot V_c^{-0,6977} \cdot f_z^{0,4555} \cdot ap^{0,8259} \quad (III.8)$$

$$F_z = e^{10,5587} \cdot V_c^{-0,6952} \cdot f_z^{0,4405} \cdot ap^{0,8250} \quad (III.9)$$

Lorsque la vitesse de coupe augmente, la valeur des efforts diminue. Cela se produit pour toutes les composantes. L'influence de la vitesse de coupe est remarquable par la valeur absolue de l'exposant qui est égal à **0,698**. Les modèles révèlent aussi que l'avance axiale est le paramètre le plus influant sur la grandeur de l'effort de coupe. La valeur absolue de l'exposant exprimant cette influence sur la composante F_y par exemple est égale à **0,825**.

c) Analyse des résultats de la rugosité de la surface usinée

Le graphe III.6 des valeurs relevées de la rugosité de la surface usinée au cours du fraisage de l'acier C45 pour les huit essais testés, montre la même tendance obtenue lors du fraisage de l'acier C18. Les grandeurs de R_a relevées sont par contre plus importantes. Les résultats du point de vue critère complémentaire qui est la rugosité sont meilleurs pour l'acier C18, ce qui nous permet de confirmer la bonne usinabilité de ce dernier.



*Figure III.6 - Valeurs de la rugosité R_a de la surface usinée pour les huit essais
Fraisage de l'acier ISO C45*

L'analyse de l'influence des éléments du régime de coupe sur le critère complémentaire d'évaluation de l'usinabilité en l'occurrence la rugosité de la surface usinée relevée sur le tableau III.5, montre qu'avec l'accroissement de la vitesse de coupe la rugosité s'améliore alors qu'elle se dégrade avec l'augmentation de l'avance. La profondeur de passe a une influence remarquable sur la rugosité. L'augmentation de l'avance par dent de l'outil fraise engendre des aspérités plus ou moins importantes en fonction du rayon du bec de la plaquette de coupe employée.

Tableau III. 6 : Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée (Fraisage de l'acier C45)

N° Essais	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Rugosité Ra (µm)
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc	fz	ap	
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	2,350
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	0,750
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	8,530
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	2.340
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	3,750
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	1,200
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	7.910
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	12,50

Le traitement statistique des résultats a permis la détermination du modèle mathématique suivant

$$Ra = e^{6,416} \cdot Vc^{-0,851} \cdot fz^{0,599} \cdot ap^{0,692} \quad (III.10)$$

L'analyse de la valeur des exposants du modèle mathématique (III.10) déterminé grâce aux essais confirme le degré d'influence le plus élevé de la vitesse de coupe suivi de la profondeur de passe et de l'avance par dent.

III.1.3 Analyse des résultats (usinage de l'acier 100Cr6)

a) Analyse des résultats d'usure

L'analyse des courbes d'évolution de l'usure (figure III.7), montre des courbes de même allure et avec la même tendance. Pour les conditions d'usinage adoptées, les tenues de coupe déterminées selon le critère [VB] sont relativement faibles.

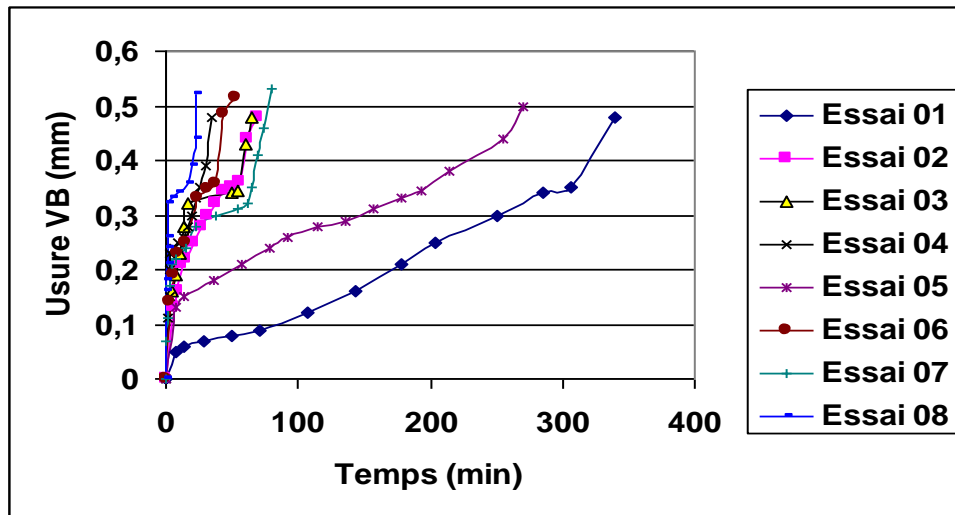


Figure III.7 - Evolution de l'usure VB moyenne en fonction du temps pour les huit régimes de coupe (Usinage de l'Acier ISO 100Cr6)

Les valeurs des tenues obtenues pour les différentes combinaisons du régime de fraisage de l'acier 100Cr6 (tableau III.6) sont nettement plus faibles que celles obtenues au cours des essais de l'acier C18 et l'acier C45. Les régimes avec une vitesse de coupe et en avance par dent maximales ont donné la plus faible tenue. La valeur la plus grande de la tenue de coupe est obtenue au cours de l'essai N° 01, (régime minimal). La vitesse de coupe $V_c=150\text{m/min}$ semble être le premier paramètre du régime de coupe qui réduit considérablement la durée de vie.

Tableau III.7 : Valeurs des tenues de coupe pour les huit régimes (usinage de l'acier 100Cr6)

N° Essais	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Tenue T (min)
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc	fz	ap	
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	307
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	45
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	55
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	25
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	195
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	40
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	65
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	15

Le traitement statistique des résultats a permis la détermination de modèle mathématique suivant :

$$T = e^{10,0284} \cdot Vc^{-1,5713} \cdot fz^{-0,4763} \cdot ap^{-0,2498} \quad (III.11)$$

L'analyse du modèle (III.11), permet de définir les tendances ainsi que les degrés d'influence des différents facteurs sur le premier critère d'évaluation de l'usinabilité qui est la tenue correspondante à la vitesse technologique V_T . En effet avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance, la tenue diminue, tandis qu'avec l'augmentation de la profondeur de passe le modèle révèle qu'elle a une faible influence. Dans ces conditions concrètes la vitesse de coupe a l'influence la plus dominante (expo=**1,169**) suivie par l'avance (expo=**0,641**). C'est résultats sont en parfaite conformité avec la littérature [6,18, 19, 21, 27].

b) Analyse des résultats des efforts de coupe

Le graphe III.8, montre le relevé des valeurs moyennes des composantes de l'effort de coupe enregistré au cours des essais de l'acier 100Cr6. Comparativement aux essais des autres aciers testés, nous remarquons que l'intensité des efforts a augmenté. Le graphique montre que par exemple pour le test n° 07, la valeur de l'effort tangentiel F_y avoisine les 4000N.

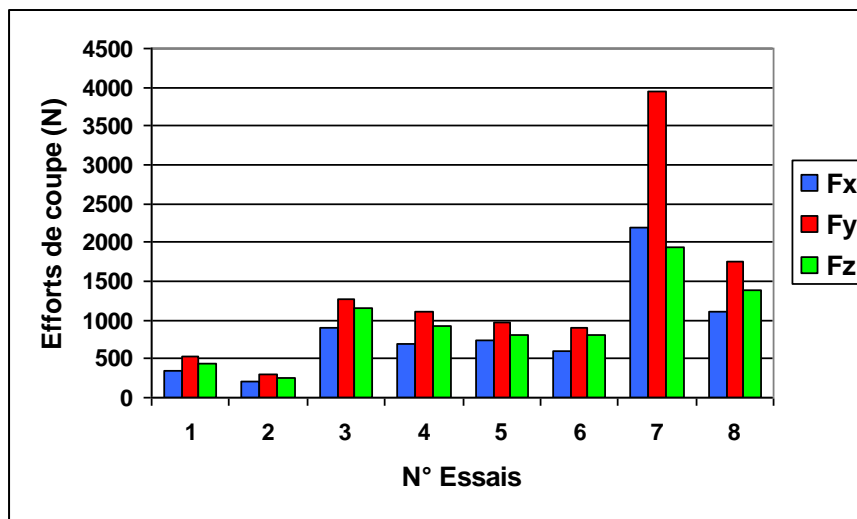


Figure III.8 - Courbes des composantes de l'effort de coupe pour les huit essais
Fraisage de l'acier ISO 100Cr6

Les grandeurs présentées au tableau III.7, montrent que pour le régime 02 les valeurs des composantes de l'effort de coupe sont les plus faibles. Les valeurs maximales ont été relevées au cours de l'essai 07. Cela est physiquement justifié, en effet pour l'essai 02, la tranche cisailée est la plus faible et la vitesse de coupe est à sa valeur supérieure. Pour le régime 07, la tranche cisailée est importante et la vitesse de coupe est à sa valeur minimale.

Tableau III.8 : Valeurs des Composantes de l'effort de coupe (Fraisage de l'acier 100Cr6)

N° Essais	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Efforts de coupe (N)		
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc	fz	ap	Fx	Fy	Fz
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	346	520	430
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	200	302	260
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	907	1270	1150
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	700	1100	920
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	730	960	800
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	590	890	810
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	2200	3950	1950
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	1100	1750	1380

Le traitement statistique des résultats a permis la détermination des modèles mathématiques suivants :

$$F_x = e^{9,9463} \cdot Vc^{-0,4674} \cdot fz^{0,4281} \cdot ap^{0,8639} \quad (III.12)$$

$$F_y = e^{9,9769} \cdot Vc^{-0,4302} \cdot fz^{0,4643} \cdot ap^{0,8984} \quad (III.13)$$

$$F_z = e^{10,5587} \cdot Vc^{-0,6952} \cdot fz^{0,4405} \cdot ap^{0,8250} \quad (III.14)$$

L'analyse de la valeur des exposants des modèles mathématiques (III.13, III.14, III.15) exprimant les composantes des efforts de coupe montre la même tendance. Cependant la valeur des exposants est plus grande pour l'acier 100Cr6. Cet acier est plus difficile à usiner, l'influence de fz et ap est plus marquée. Les modèles révèlent aussi que l'avance axiale ap est le paramètre le plus influant sur la grandeur de l'effort de coupe. La valeur absolue de l'exposant exprimant cette influence sur la composante Fy par exemple est égale à **0,898**.

Pour tous les essais, la valeur de la composante tangentielle Fy est la plus importante, au cours du fraisage de l'acier C18, dans le régime 4 la valeur de la composante Fz a pris le dessus.

c) Analyse des résultats de la rugosité de la surface usinée

Les valeurs de la rugosité obtenue au cours de l'essai de l'acier 100Cr6 et portées sur le graphe III.9, sont plus faibles par rapport aux valeurs relevées pendant les autres essais des aciers C18 et C45. Ces faibles rugosités ont été obtenues au cours des tests 1, 2, 5 et 6.

Malgré les faibles tenues de coupe relevées, Le fraisage de l'acier 100Cr6 donne des résultats satisfaisant du point de vue état de surface.

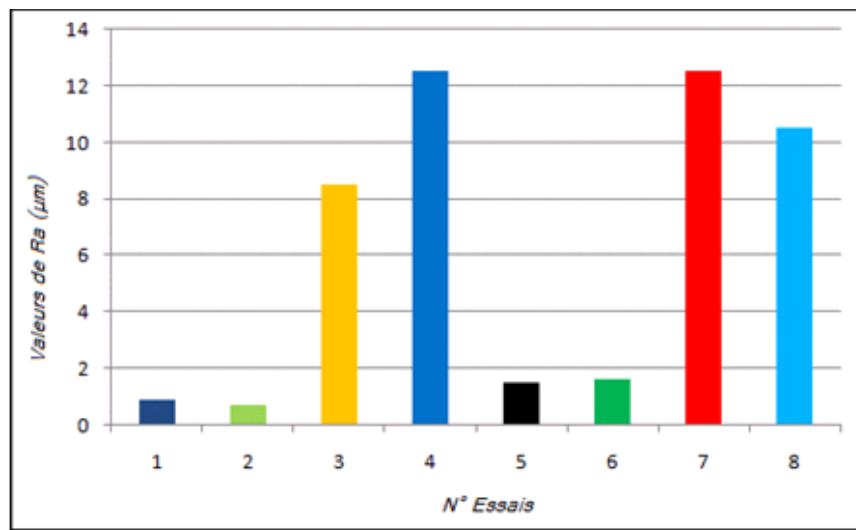


Figure III.9 - Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée pour les huit essais
Fraisage de l'acier ISO 100Cr6

Le tableau III.8, indique les valeurs de la rugosité Ra relevées pour les différents régimes.

Tableau III. 9 : Valeurs de la rugosité Ra de la surface usinée (Fraisage de l'acier 100Cr6)

N° Essais	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Rugosité Ra (µm)
	X ₁	X ₂	X ₃	Vc	fz	ap	
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	0.900
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	0.700
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	8.500
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	12.50
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	1.500
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	1.620
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	12.50
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	10.50

Le traitement statistique des résultats a permis la détermination du modèle mathématique suivant :

$$Ra = e^{3,7378} \cdot Vc^{0,0101} \cdot fz^{0,9899} \cdot ap^{0,4260} \quad (III.15)$$

L'analyse de l'influence des éléments du régime de coupe sur le critère complémentaire d'évaluation de l'usinabilité en l'occurrence la rugosité de la surface usinée

(modèle III.15), montre qu'avec l'accroissement de la vitesse de coupe la rugosité s'améliore alors qu'elle se dégrade avec l'augmentation de l'avance. La profondeur de passe a une influence minimale sur la rugosité lorsque la rigidité du système machine outil - outil pièce n'est pas perturbée. L'augmentation de l'avance par dent de l'outil fraise engendre des aspérités plus profondes. L'augmentation de la profondeur de passe fait apparaître des efforts de coupe plus importants ce qui influence la rigidité du système et provoque des vibrations qui altèrent la surface usinée par la naissance d'ondulations. La valeur absolue de l'exposant exprimant l'influence de l'avance par dent sur la rugosité Ra est égale à **0,989**.

III.2. ANALYSE GLOBALE DE L'USINABILITE DES ACIERS TESTES (Fraisage avec plaquettes P35)

III.2.1 Analyse des résultats de l'usure

Pour pouvoir donner une analyse objective, nous avons présenté dans les graphes (III. 10 et III .11) les courbes d'évolution de l'usure relatives aux trois aciers testés pour deux régimes limites.

Dans le graphe III.10 nous pouvons remarquer les courbes d'évolution de l'usure des plaquettes lors des essais des aciers C18, C45 et l'acier 100Cr6 pour le régime aux paramètres ayant les valeurs minimales. L'usure en dépouille VB relevée au cours du fraisage de l'acier 100Cr6 évolue rapidement par rapport a celles relevées au cours de l'usinage des aciers C18 et l'acier C45.

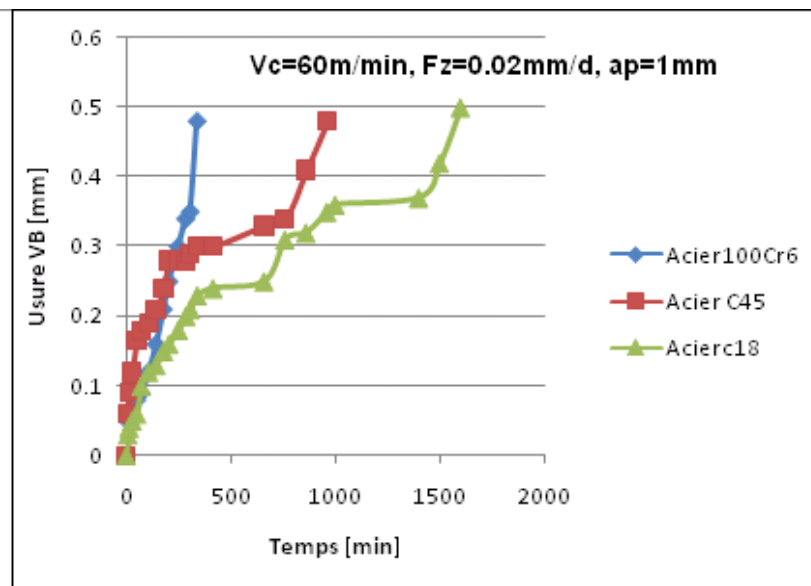


Figure III.10. Evolution de l'usure en dépouille pour le régime minimal pour les trois types d'acier testés

L'analyse des valeurs des tenues relevées sur le graphe III.11, montre que la tenue T relevée pour l'acier C18 est nettement supérieure à celle relevée pour l'acier 100Cr6. La tenue de coupe obtenue pour l'acier C45 occupe une valeur intermédiaire. L'acier C18 a donc une usinabilité meilleure que celles de l'acier C45 et le 100Cr6.

Ces résultats confirment ce qui a été présenté au cours des études réalisées sur l'usinabilité des aciers [4, 6, 9,11, 39]. Dans la majeure partie des études citées en référence les caractéristiques mécaniques du matériau sont le facteur déterminant dans l'évaluation de l'usinabilité. La dureté du matériau est la propriété mécanique qui est retenue comme critère de mesure. Si nous observons les duretés de chaque acier testés nous pouvons relever les

valeurs suivantes : 77HRB pour l'acier C18, 180HRB pour l'acier C45 et 230HRB pour l'acier 100Cr6.

Plus la dureté du matériau augmente plus son usinabilité évaluée par le critère de durée de vie diminue. Cela est montré dans pratiquement toutes les études sur l'usinabilité réalisée sur les aciers [4, 5, 6, 12, 13,17].

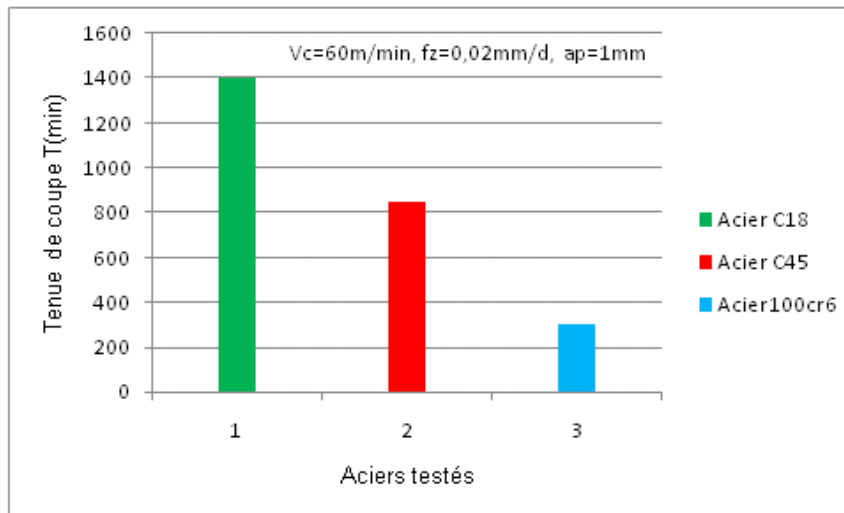


Figure III.11. Valeurs des tenues de coupe pour le régime minimal pour les trois types d'acier testés

Dans le graphe III.12 nous pouvons remarquer les courbes d'évolution de l'usure des plaquettes lors des essais des aciers C18, C45 et l'acier 100Cr6 pour le régime aux paramètres ayant les valeurs maximales. L'usure en dépouille VB relevée au cours du fraisage de l'acier 100Cr6 évolue rapidement par rapport a celles relevées au cours de l'usinage des aciers C18 et l'acier C45. Les courbes d'usure présentent les mêmes stades d'évolution, avec une usure rapide au début des essais, une période ralentissement et puis une augmentation rapide vers les valeurs admissibles de VB.

Le graphe III.13, montre les différentes tenues de coupe relevées lors des essais des aciers testés avec les valeurs des paramètres de coupes maximales. La tenue de coupe obtenue lors de l'essai de l'acier 100Cr6 est égale à 15 minutes, celle de l'acier C45 est de 45 minutes et la tenue relevé au cours du fraisage de l'acier C18 est égale à 80 minutes. Nous remarquons d'après ce graphe que l'augmentation de la vitesse de coupe diminue considérablement la tenue de coupe. Plus la dureté du matériau augmente plus son usinabilité évaluée par le critère de durée de vie diminue.

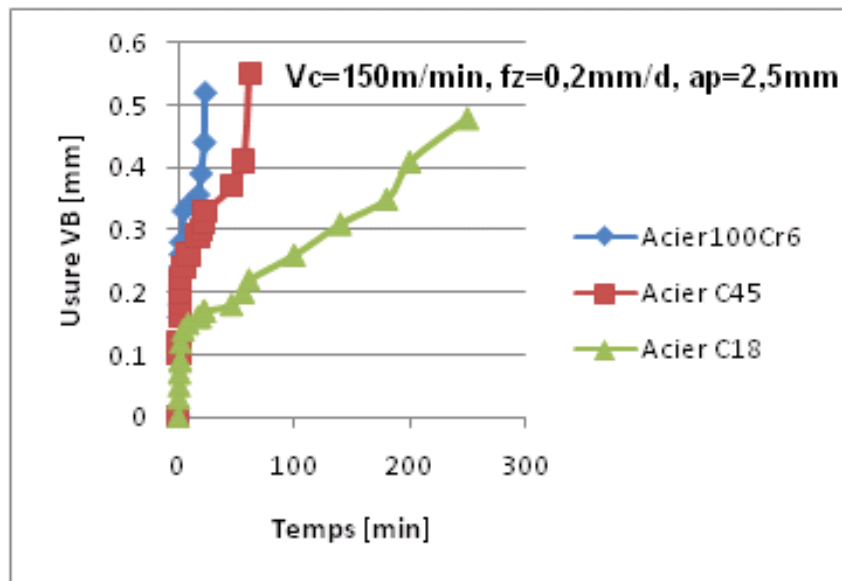


Figure III.12 Evolution de l'usure en dépouille pour le régime maximal pour les trois types d'acier testés

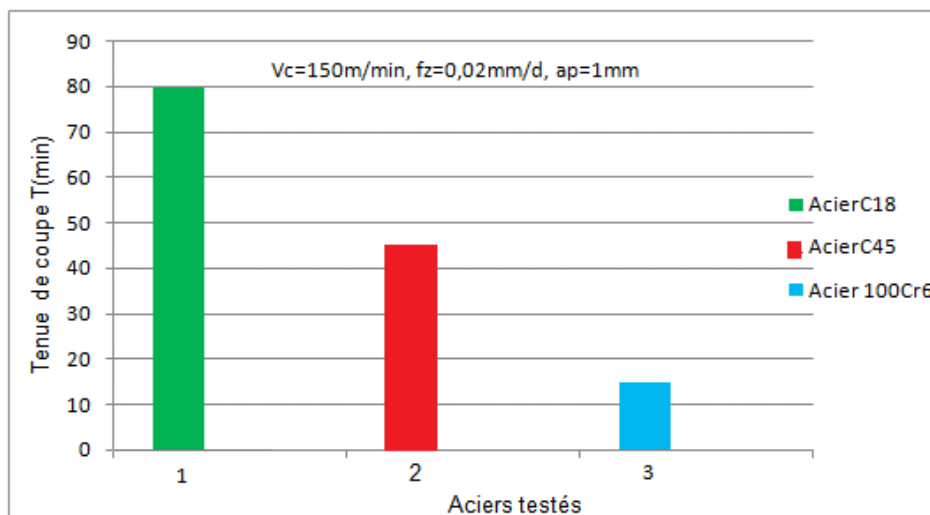


Figure III.13. Valeurs des tenues de coupe pour le régime maximal pour les trois types d'acier testés

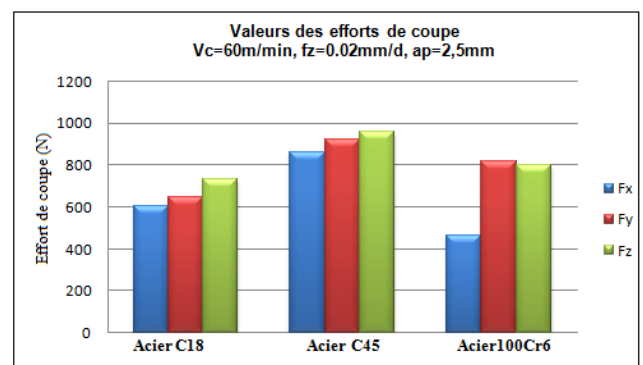
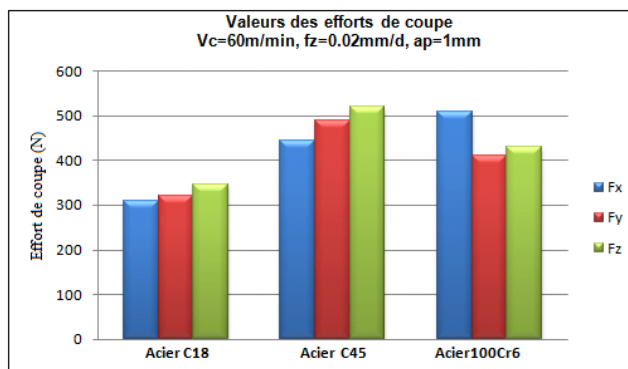
Le tableau III.10, montre que pour toutes les combinaisons du régime de coupe la durée de vie obtenue au cours des essais de l'acier C18 est la plus grande. Celle obtenue lors des tests de l'acier C45 occupe la deuxième position. La tenue obtenue en usinant l'acier 100Cr6 est la plus faible.

Tableau III.10 : Valeurs des tenues pour les différentes combinaisons du plan pour les trois aciers testés.

N° Essais	Paramètres d'entrée						Paramètres de sortie Tenue T, min		
	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Acier C18	Acier C45	Acier 100Cr6
	X ₁	X ₂	X ₃	V	f _z	a _p			
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	1400	850	307
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	575	345	45
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	215	175	55
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	120	80	25
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	1250	690	195
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	360	216	40
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	230	190	65
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	80	45	15

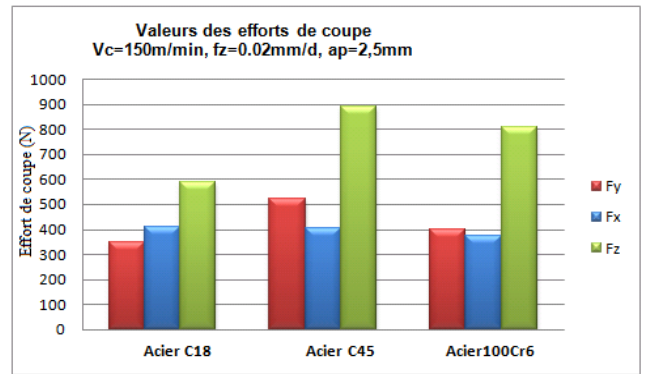
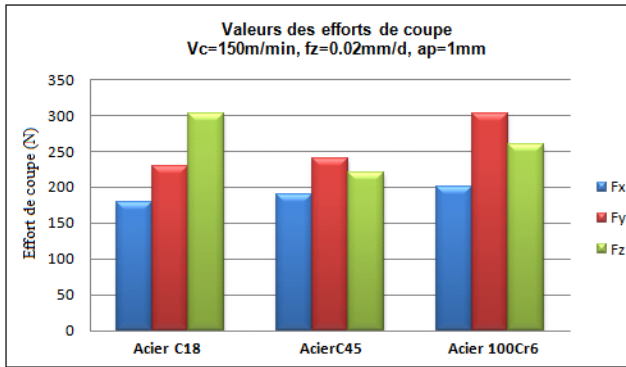
III.2.2 Analyse des résultats des efforts de coupe

Les figures 13 et 14 montrent les valeurs moyennes des composantes de l'effort de coupe relevées au cours des essais de fraisage des trois types d'acier testés. La figure 13 montre que les efforts relevés lors du fraisage de l'acier C18 sont les plus faibles et cela pour les deux valeurs de l'engagement radial a_p. Les efforts de coupe relevés au cours du fraisage de l'acier C45 sont plus importants. Les valeurs relevées pour l'acier 100Cr6 sont intermédiaires. L'augmentation de la profondeur de passe a donné des valeurs plus importantes aux efforts, cela est justifié par l'épaisseur de la tranche cisailée.



Figures III.14 et 15 : Composantes de l'effort de coupe moyen pour les trois nuances d'acier testées à 60m/min, variation de l'engagement radial a_p

Sur la figure 14 nous remarquons aussi que la composante Fx de l'effort de coupe diminue lors de l'usinage de l'acier 100Cr6. Les figures 16 et 17, montrent que lorsque la vitesse de coupe augmente la valeur des efforts diminue. Lorsque l'engagement radial augmente, la valeur des composantes Fz augmente, cela est bien montré sur le graphe 17



Figures III. 16et17 : Composantes de l’effort de coupe moyen pour les trois nuances d’acier testées à 150m/min, variation de l’engagement axial ap

Le tableau III.11, indique les valeurs de la composante tangentielle F_y de l’effort de coupe. Pour les différentes combinaisons du régime de coupe nous remarquons qu’elle est la plus importante pendant l’usinage de l’acier 100Cr6. Cela nous permettra de dire que d’après le critère complémentaire d’évaluation de l’usinabilité, l’acier 100Cr6 est plus difficile à usiner.

Tableau III. 11 : Valeurs des composants F_y de l’effort de coupe pour les différentes combinaisons du plan pour les trois aciers testés.

N° Essais	Paramètres d’entrée						Paramètres de sortie Valeurs de la composante F_y de l’effort De coupe [N]		
	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Acier C18	Acier C45	Acier 100Cr6
	X ₁	X ₂	X ₃	V	f _z	a _p			
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	443	490	520
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	230	240	302
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	978	1100	1270
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	600	780	1100
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	860	920	960
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	404	520	890
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	3342	3200	3950
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	1202	1360	1750

III.2.3 Analyse des résultats de la rugosité de la surface fraisée

Pour le troisième critère d’évaluation de l’usinabilité des aciers testés qui est la rugosité Ra de la surface usinée, le graphe III.17 montre les valeurs de Ra relevées au cours des essais pour les huit régimes de fraisage. Les régimes 1, 2,5 et 6 ont donné les meilleures valeurs de la rugosité c’est-à-dire les plus petites.

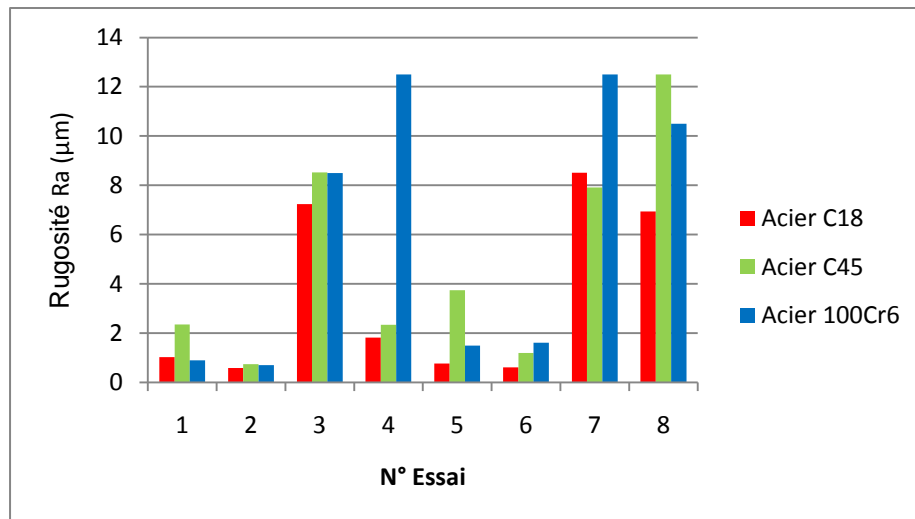


Figure III.18 : Valeurs de la rugosité Ra pour les huit régimes de fraisage des aciers testés

L'analyse des valeurs du tableau III.12, révèle que les rugosités relevées au cours de fraisage de l'acier C18 sont les plus faibles. Des particularités sont cependant utiles de noter notamment pour le fraisage de l'acier 100Cr6. Pour les régimes à faible avance par dent, les rugosités obtenues sont technologiquement celles obtenues en rectification, particulièrement les régimes 1 et 2.

Tableau III.12 : Valeurs de la rugosité Ra pour les différentes combinaisons du plan pour les trois aciers testés.

N° Essais	Paramètres d'entrée						Paramètres de sortie Valeurs de la rugosité Ra de la surface fraisée [µm]		
	Valeurs codifiées			Valeurs naturelles			Acier C18	Acier C45	Acier 100Cr6
	X ₁	X ₂	X ₃	V	f _z	a _p			
1	-1	-1	-1	60	0,02	1	1,025	2,350	0,900
2	+1	-1	-1	150	0,02	1	0,583	0,750	0,700
3	-1	+1	-1	60	0,2	1	7,236	8,530	8,500
4	+1	+1	-1	150	0,2	1	1,818	2,340	12,50
5	-1	-1	+1	60	0,02	2,5	0,765	3,750	1,500
6	+1	-1	+1	150	0,02	2,5	0,610	1,200	1,620
7	-1	+1	+1	60	0,2	2,5	8,507	7,910	12,50
8	+1	+1	+1	150	0,2	2,5	6,940	12,50	10,50

III.2.4 Analyse des résultats de la rugosité de la surface fraisée en fonction du temps de coupe des plaquettes

L'étude de l'évolution de la rugosité de la surface usinée par rapport au temps de coupe est nécessaire pour mieux cerner l'effet des transformations qui se produisent dans la zone de coupe. Nous pouvons citer par exemple l'usure des plaquettes, l'échauffement du matériau et le changement des caractéristiques du métal à usiner.

La figure III.18 montre l'évolution de la rugosité Ra de la surface usinée au cours de l'usinage de l'acier C18 avec deux types de plaquettes en carbure. La première est en carbure P35 non revêtu et la seconde en carbure P35 revêtu par une simple couche de nitrure de titane. L'analyse des courbes enregistrées nous permet de voir que la plaquette avec revêtement a donné des valeurs de rugosité plus faibles d'où un bon état de surface.

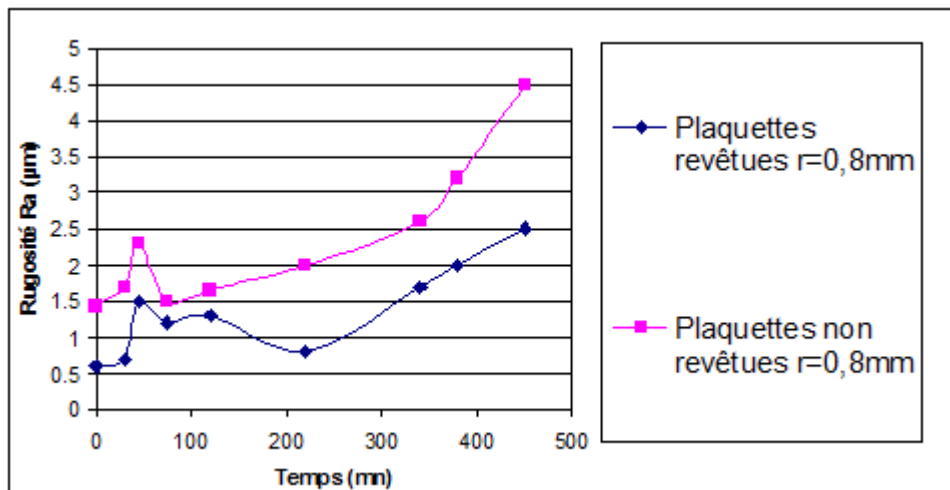


Figure III-19 - Influence du temps d'usinage sur la rugosité de la surface usinée, carbure non revêtu et revêtu simple couche TiN testés avec ($V_c = 150\text{m/min}$; $f_z = 0,02\text{mm/dent}$; $a_p = 1\text{mm}$, $a_e = 98\text{mm}$)

Les courbes des figures III.19 et III.20 montrent l'évolution de la rugosité Ra en fonction du temps de coupe au cours de l'usinage de l'acier C45 et l'acier 100Cr6. L'analyse des courbes montre que la rugosité augmente sensiblement au début des essais, une légère stabilité est enregistrée et la rugosité diminue au cours de la phase d'usure normale. La rugosité Ra de la surface usinée augmente au cours des dernières passes, lorsque la valeur de l'usure admissible est atteinte. Les courbes enregistrées au cours des essais de fraisage des aciers testés sont en parfaite conformité avec les courbes d'évolution de Ra en fonction du temps des études réalisées par d'autres chercheurs [4, 6, 13, 17, 30, 38].

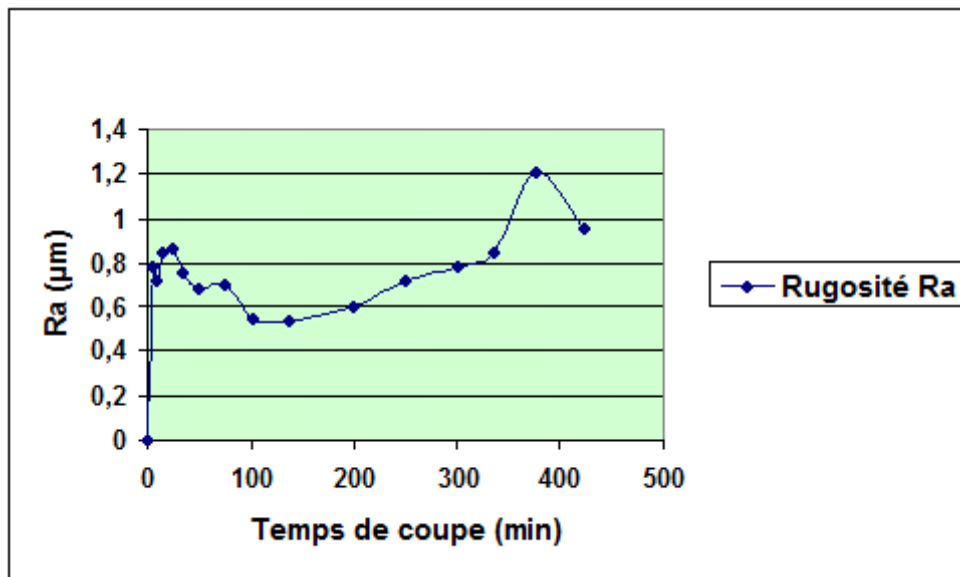


Figure III.20 - Influence du temps d'usinage sur la rugosité de la surface usinée
 Usinage de l'acier ISO C45 ($V_c=150\text{m/min}$ $f_z=0.02\text{mm/d}$ $a_p=1\text{m}$)

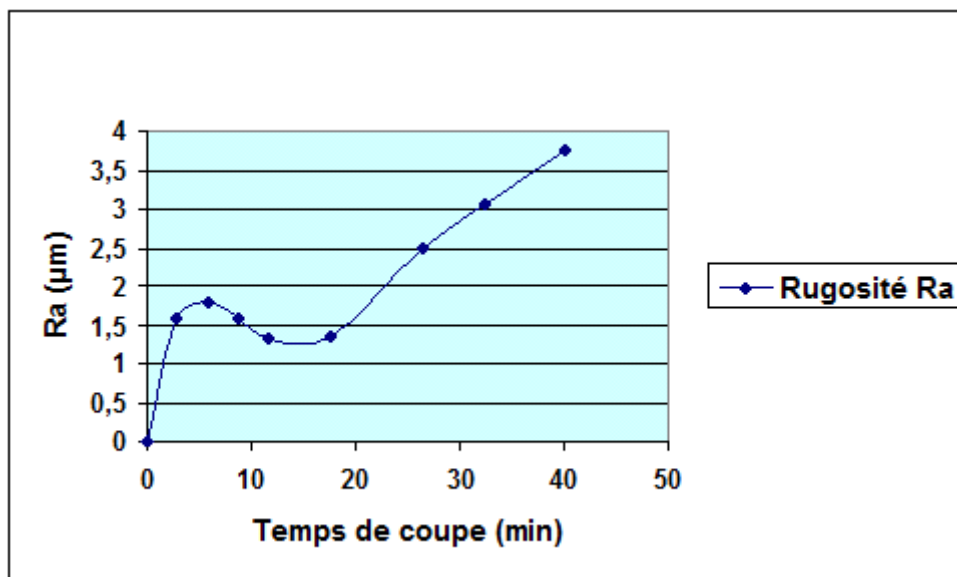


Figure III.21 - Influence du temps d'usinage sur la rugosité de la surface usinée
 Usinage de l'acier ISO 100Cr6 ($V_c=150\text{m/min}$ $f_z=0.02\text{mm/d}$ $a_p=2,5\text{m}$)

III.2.5 Résultats de l'examen morphologique des plaquettes P35 testées

L'examen morphologique de l'usure est réalisé grâce au microscope électronique à balayage. Nous présentons dans cette étude quelques photos de plaquettes de coupe ayant subies l'usure au cours du fraisage de l'acier C18. Sur l'image (figure III.22), nous pouvons

observer sur une plaquette P35 non revêtue la zone usée. Sur la surface en dépouille, le copeau adhérent qui a subi une abrasion par le frottement sur la surface usinée. Au niveau du bec de la plaquette nous observons le début de l'effondrement.

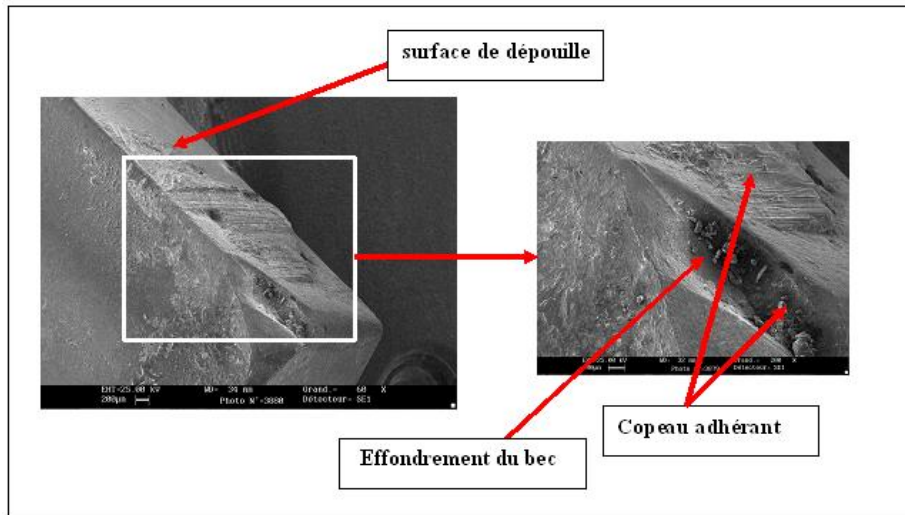


Figure III.22 – Photo M.E.B : Morphologie de l'usure de la plaquette P35 non revêtue

La figure III.23, montre l'image d'une zone située sur la frontière entre la surface d'attaque et la surface en dépouille où le revêtement commence à se détacher. Ce phénomène se produit à partir d'une certaine durée de coupe qui est fonction des paramètres du régime adopté et du matériau à usiner.

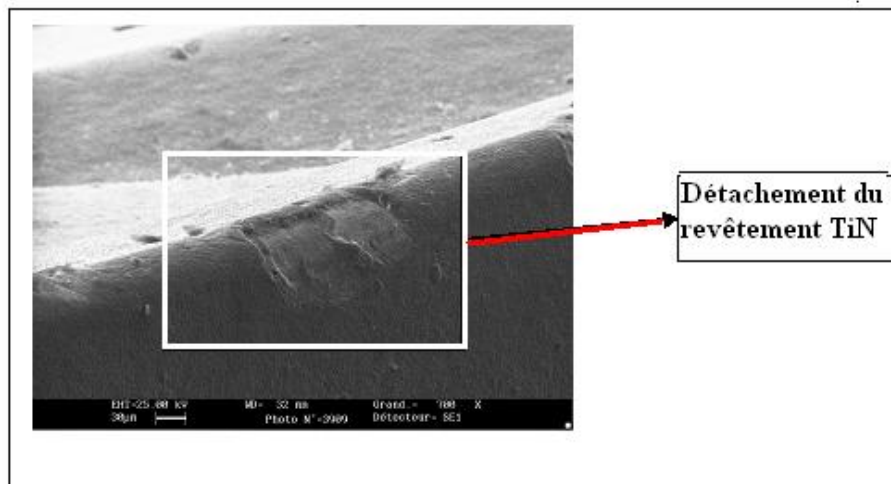


Figure III.23 – Photo M.E.B : Montrant le détachement du revêtement TiN

La figure III.24, montre l'image d'une plaquette explorée après quelques passes d'usinage. Nous pouvons voir la dégradation du revêtement sur la face de coupe de la plaquette et le début de l'usure par abrasion de l'arête tranchante ainsi que le bec.

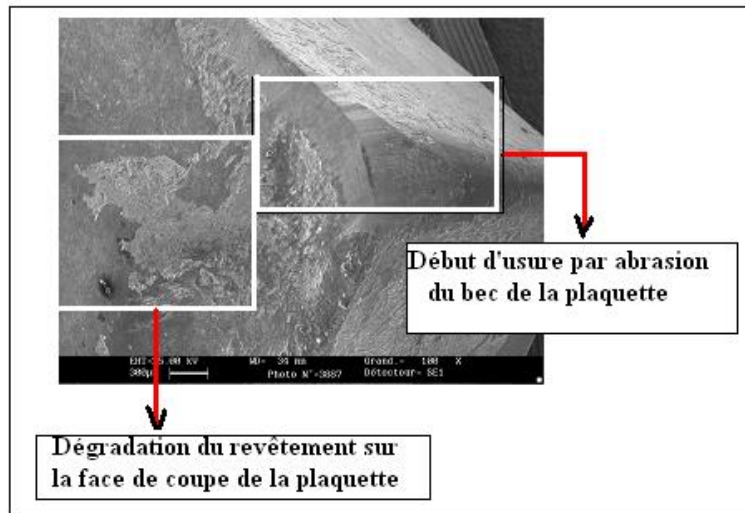


Figure III.24 – Photo M.E.B : Usure du bec de la plaquette et altération de la couche revêtue sur la face d’attaque

La figure III.25, montre un écaillage prononcé sur la face en dépouille de la plaquette. Cette zone écaillée a subi par la suite une usure par abrasion. Ce processus peut continuer durant l’usinage, il est accéléré par le phénomène du copeau adhérent particulièrement aux vitesses de coupe faibles ($V_c=60$ m/min) pour notre cas.

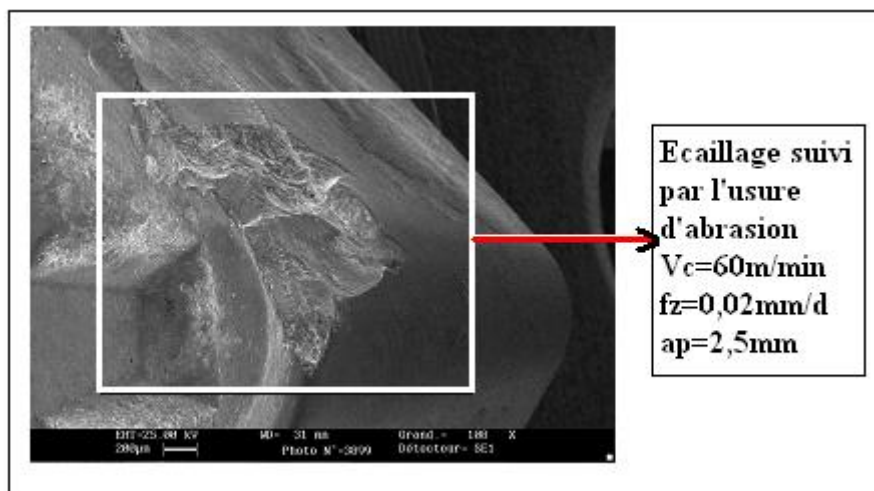


Figure III.25 – Photo M.E.B : Usure de la plaquette par écaillage début du phénomène d’abrasion

IV Traitement et analyse des résultats d'usinabilité au fraisage à grande vitesse du superalliage base cobalt (Stellite 6)

IV.1 Traitement des données.

Identification des puissances d'usinage

- Choix du signal traité.

Au cours des essais, l'ensemble des Wattpilotes ont été activés. Les puissances électriques consommées par les moteurs des axes x, y, z et de la broche ont donc été enregistrées puis traitées. L'étalonnage des capteurs de puissance étant en cour sur le centre UGV, nous ne pouvons convertir les puissances en force.

Cependant le signal de la puissance broche est extrêmement brouillé lors des plus faibles vitesses de coupe (120 et 190 m/min) comme le montre la figure IV.1 (a). Lorsque la puissance augmente, le bruit disparaît et le signal pourrait être utilisé comme sur la figure IV.1 (b)

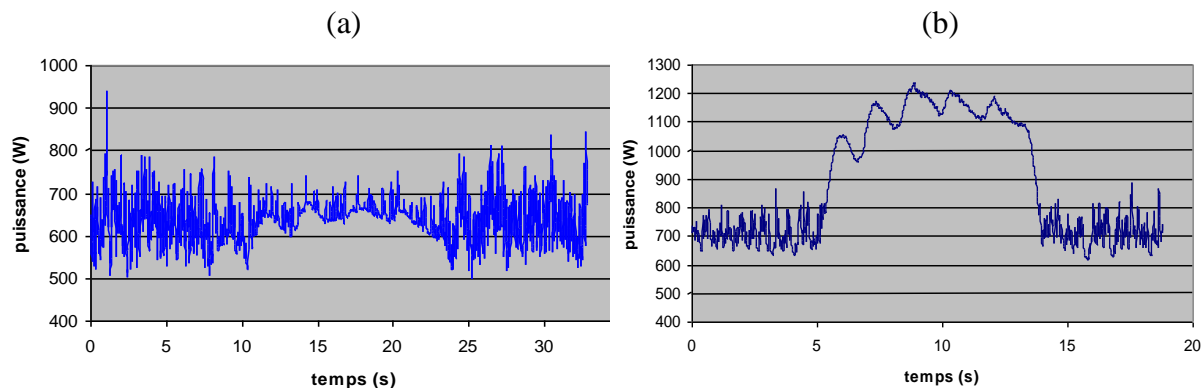


Figure IV.1 Puissance broche, (a) $V_c = 120$ m/min et (b) $V_c = 230$ m/min.

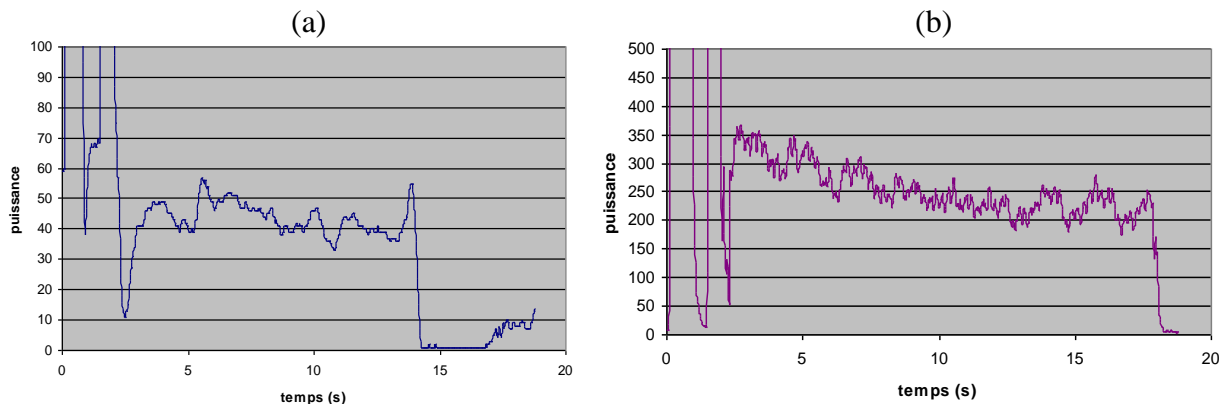


Figure IV.2 Puissance axe x (a) et axe y (b), $V_c = 230$ m/min

Les signaux des axes x et y sont plus clairs mais ne permettent pas de retrouver la variation de profondeur de passe pour chaque ligne de rechargement. Il existe des variations de puissance mais elles restent difficilement identifiables. De plus les puissances sont beaucoup plus faibles.

Le signal utilisé sera donc la valeur de puissance de l'axe z. En effet, celui-ci est clair et stable pour l'ensemble des plaquettes testées et des vitesses de coupe. Ce signal, montré figure IV.3, permet de suivre les variations de puissance pendant une passe, ainsi nous retrouvons la forme irrégulière du rechargement PTA, et de suivre l'évolution de puissance entre les différentes passes.

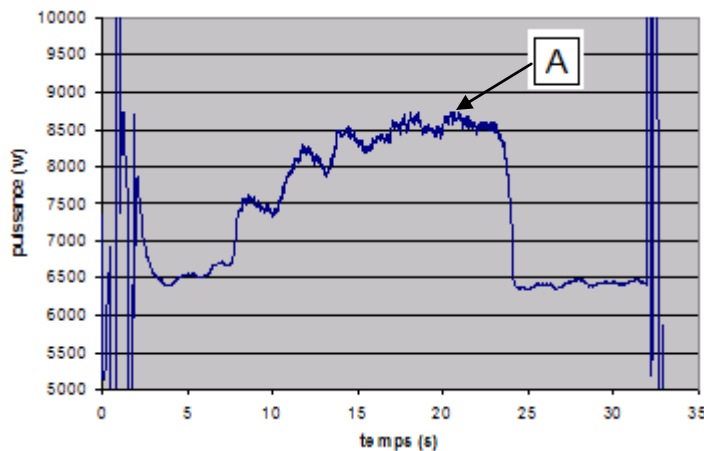


Figure IV.3. Puissance axe z, $V_c = 120$ m/min.

La courbe se caractérise par de fortes puissances avant 5s et après 25s, liées au déplacement de la broche verticalement. L'usinage commence à la 8^{ème} seconde et se termine à la 24^{ème}. Deux phénomènes provoquent une variation de puissance. D'une part, la puissance grandit jusqu'à la 16^{ème} seconde puis se stabilise suite à la montée en température de l'outil. D'autre part, la profondeur de passe varie à cause de l'irrégularité du rechargement. Les six passes de rechargement se retrouvent sur la courbe de puissance.

L'ensemble des mesures de puissance qui suivent sont strictement prise dans les mêmes conditions stables. C'est-à-dire sur l'avant dernière rainure de rechargement (A).

Les relevés des puissances suivant les trois axes et celui de la broche sont enregistrés dans les fichiers Excel puis traités par filtrage pour localiser uniquement les grandeurs de puissances relatives l'usinage.

Ce traitement permet de représenter les courbes d'évolution des puissances ainsi que les courbes d'usure frontale pour différentes plaquettes et régimes de coupe testés.

- **Evolution des puissances et usures**
 - **Usinabilité du rechargement monocouche PTA**

Le premier essai d'usinage du PTA monocouche permet de classer cinq plaquettes différentes afin de qualifier les meilleurs. Les conditions de coupe utilisées sont les suivantes :

- Vitesse de coupe $V_c = 190$ m/min, Avance à la dent $f = 0.067$ mm/dent
- $a_e = 0.3$ mm ; $a_p = 3$ mm
- **Evolution des puissances**

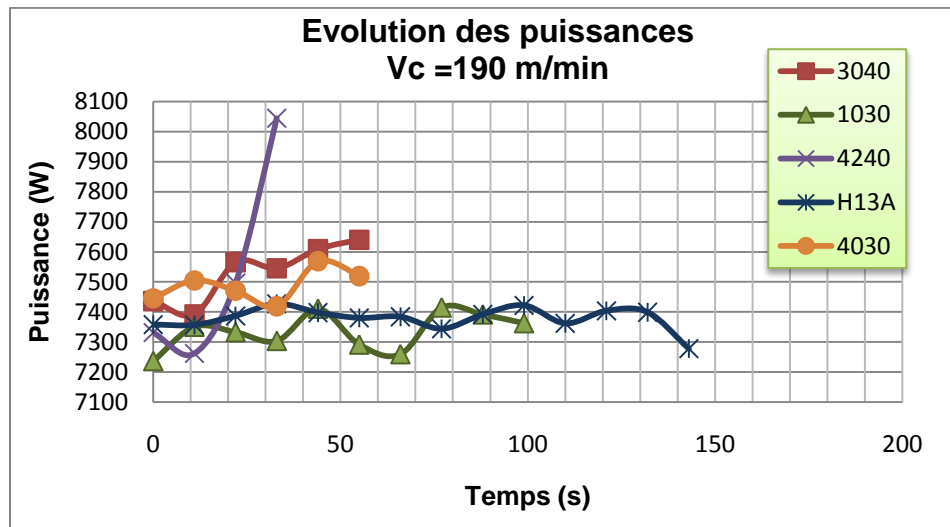


Figure IV.4 - Evolution des puissances pour $V_c = 190$ m/min et rechargement monocouche

Les relevés de puissance montrent clairement que les plaquettes 1030 et H13A consomment moins de puissances que les trois autres dès 20s. Au départ, l'utilisation de la 4240 nécessite peu de puissance mais dès la 15^{ème}s la puissance augmente rapidement jusqu'à la fin de l'essai.

- **Usure des plaquettes**

La mesure de l'usure entre deux passes montre la même tendance sur la figure IV.2

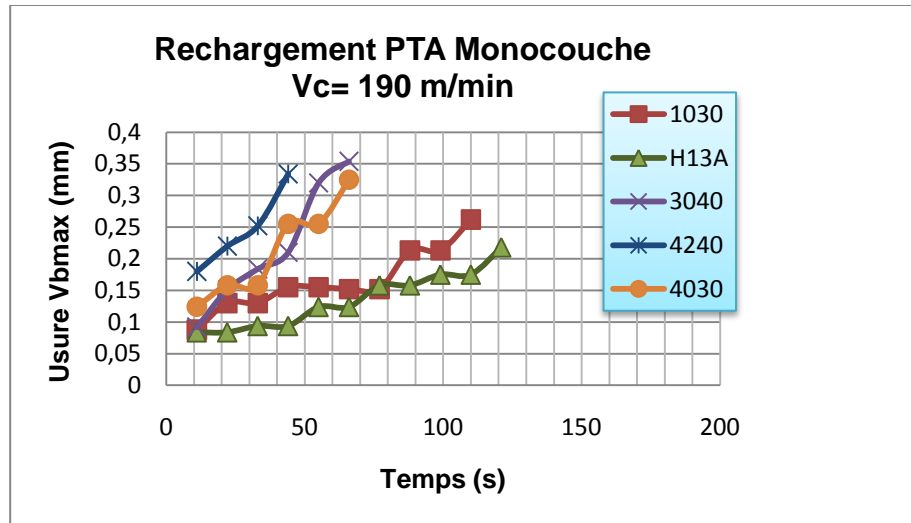
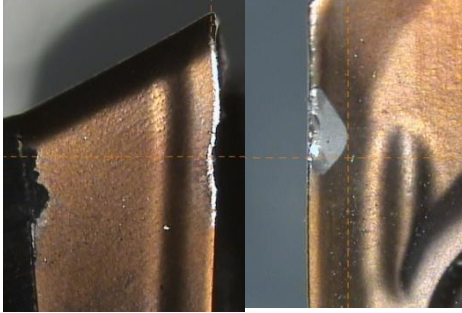
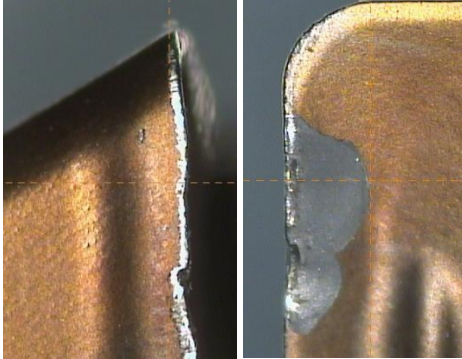
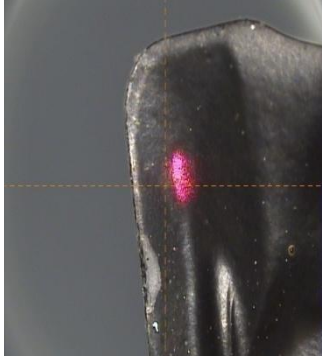
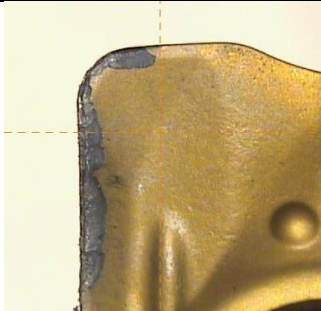
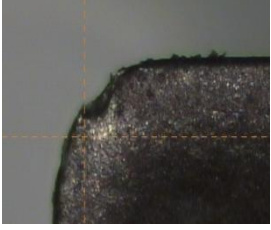
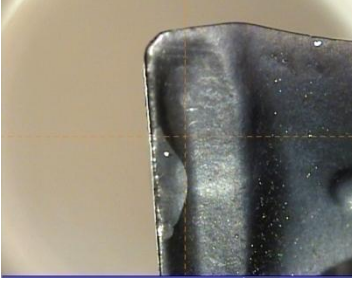


Figure IV.5 - Evolution de l'usure VB pour $V_c = 190$ m/min et rechargement monocouche. Les plaquettes H13A et 1030 se distinguent par leur usure plus lente. Les phases d'usure caractéristiques de l'essai sont traitées dans le tableau IV.4.

Tableau IV1 : Traitement de l'usure des cinq plaquettes sélectionnées (rechargement monocouche) $V_c = 190$ m/min ; $f_z = 0,067$ mm/d ; $a_p = 3$ mm ; $a_e = 0,3$ mm ; $N = 3800$ tr/mn ; $A = 512$ mm/min.

Plaquette	Temps	remarques	Photo microscope
3040	66s	L'outil se dégrade nettement dès la 33 ^{ème} s avec l'apparition en dépouille d'une usure en entaille situé à 3mm du bec. A la fin de l'essai, le revêtement est intégralement arraché en face de coupe. En dépouille, l'entaille observée continue son évolution jusqu'à l'effondrement de l'arête.	

1030	77s	Un premier écaillage apparaît en face de coupe ainsi qu'une entaille visible en dépouille. VB reste faible (0,21mm)	
1030	110s	L'écaillage se propage arrachant ainsi une grande partie du revêtement. Un net creux se forme sur la partie en contact avec la partie supérieure du rechargement	
4240	11s	Un premier arrachement en face de coupe est observé dès la première passe. A la 4 ^{ème} , le VB dépasse 0.3mm et toute la ligne de coupe est effondrée.	
4030	66s	Dès la première passe, il y a un arrachement en face de coupe. A la 6 ^{ème} passe, l'écaillage s'est propagé sur toute l'arête de coupe jusque sur le bec.	

<p>H13A</p>	<p>33s</p>	<p>La face en dépouille reste nette. Un petit arrachement se produit sur le bec.</p>	
<p>H13A</p>	<p>122s</p>	<p>L'usure en dépouille n'a pratiquement pas évoluée au cours de l'essai. La dégradation est plutôt liée à l'apparition d'un écaillage important sur la face d'attaque.</p>	

● Images interférométriques de l'usure sur les différentes plaquettes

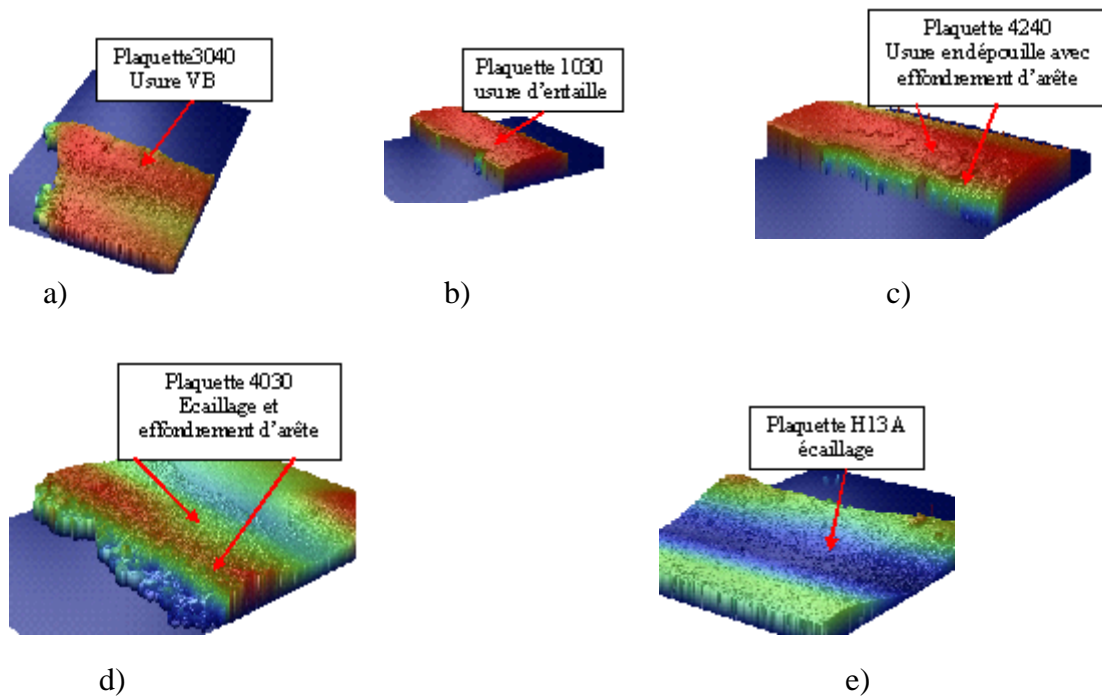


Figure IV.6 - a),b),c),d),e) Images interférométriques de l'usure des plaquettes testées

De manière objective, aux vues des puissances consommées et de l'usure, seules les plaquettes H13A et 1030 peuvent être retenues pour la suite de l'étude.

► Usinabilité du rechargement bicouche PTA à la $V_c= 190$ m/min

- Avance à la dent $f_z= 0.067$ mm/dent, $a_e=0.3$ mm, $a_p=5$ mm

Evolution des puissances

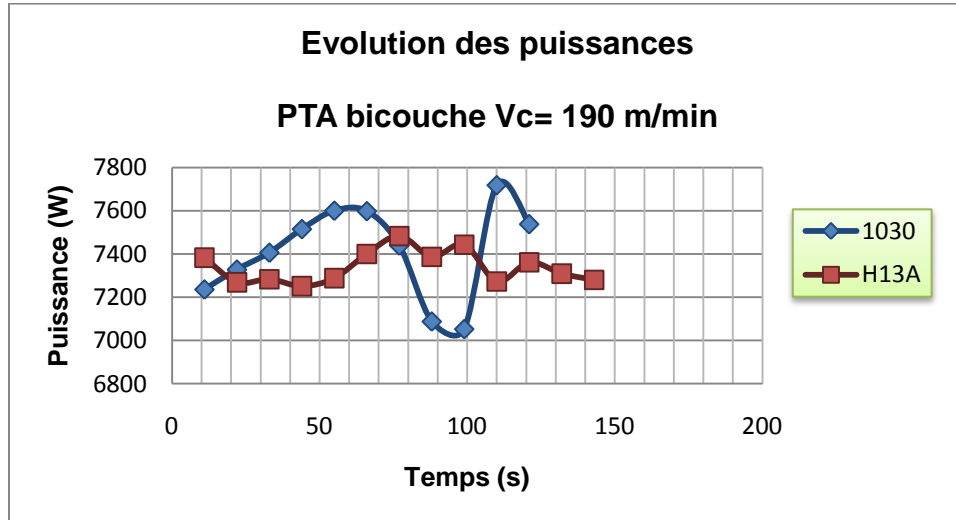


Figure IV.7 - Evolution des puissances pour V_c 190 m/min et rechargement PTA bicouche

Le suivi de l'évolution de l'usure des plaquettes 1030 et H13A nous permet de présenter les courbes de la figure IV.5

• Usure des plaquettes

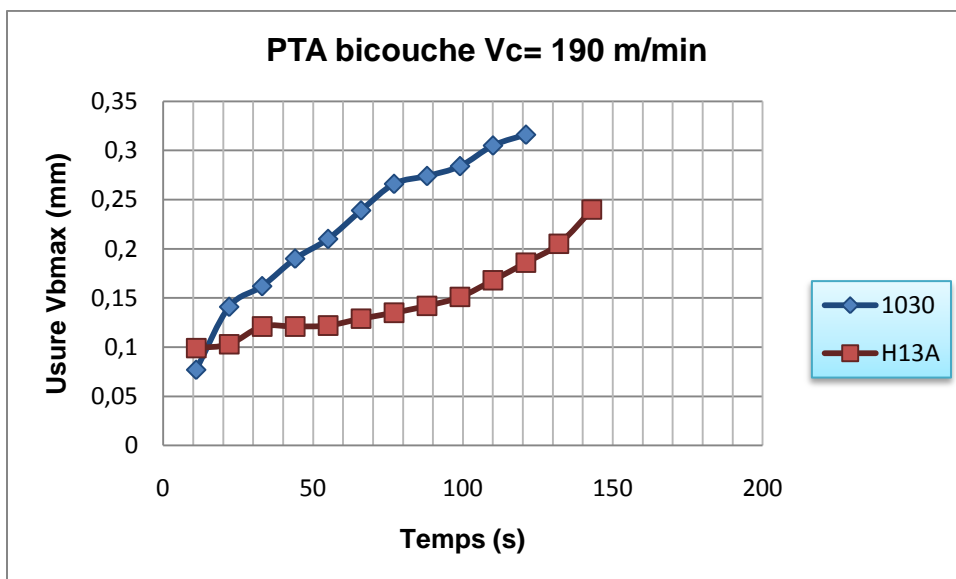


Figure IV.8 - Evolution de l'usure VB pour $V_c= 190$ m/min et rechargement bicouche

Tableau IV.2 – Analyse de l'usure des plaquettes pour $V_c = 190$ m/min et rechargement bicouche

Plaquette	Temps	remarque	Photo microscope
1030	55s	Usure en dépouille et arrachement du revêtement en face d'attaque. L'entaille est maintenant à 5mm du bec. Le copeau colle sur la face opposée de la plaquette, il y a talonnage.	
1030	77s	Petit à petit l'arrachement de revêtement s'étend	
H13A	143s	Après 12 passes, l'arête reste très propre. A la 13 ^{ème} , le revêtement s'arrache en face de coupe. Il se forme également une fissure	

• Images interférométriques

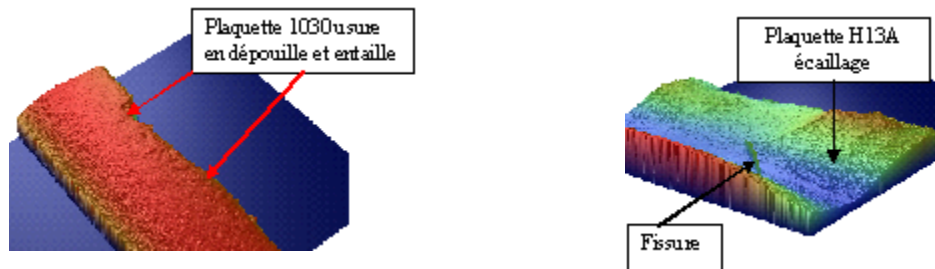


Figure IV.9 - Images interférométriques de l'usure des plaquettes a) 1030 ; b) H13A

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les travaux effectués dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de l'étude et du développement des techniques de fraisage des matériaux par les matières de coupe modernes. Cette étude est basée sur une investigation expérimentale du procédé d'usinage des matériaux par le fraisage. L'usinabilité des matériaux est évaluée dans cette thèse par la mise en évidence des mécanismes qui accompagnent le processus de coupe. Une attention particulière est portée sur les mécanismes d'usure de l'outil de coupe, sa durée de vie, et les critères complémentaires d'évaluation qui sont les efforts engendrés par la coupe et l'état de la surface obtenue après usinage.

L'étude a été menée suivant deux axes principaux. Le premier est relatif au fraisage conventionnel des aciers et le deuxième traite le fraisage à grande vitesse des superalliages. L'usinage à grande vitesse est une technique d'usinage moderne et qui a donné des résultats satisfaisant surtout pour le façonnage des matériaux durs.

Nous avons présenté une étude bibliographique des travaux réalisés dans le domaine du fraisage des matériaux durs par le procédé conventionnel et l'usinage à grande vitesse. Bien que l'analyse bibliographique ait permis de répondre à un certain nombre de questions concernant l'étude de la coupe. Certains points restent encore aujourd'hui sujets à controverse comme les aspects d'intégrité des critères d'évaluation et le comportement du matériau en usinage. C'est dans ce contexte que nous avons exploré un certain nombre de techniques permettant d'analyser les mécanismes qui interviennent lors de la formation de copeau et d'apporter une contribution sur la compréhension de la coupe.

Les expériences ont été menées conformément à la méthode multifactorielle combinée avec la méthode des moindres carrés. Un plan de huit expériences a été adopté. Les essais d'usinabilité au cours du fraisage conventionnel sont réalisés sur trois types d'aciers de différentes duretés. Ces matériaux sont très employés dans l'industrie mécanique algérienne. Le critère qui a motivé notre choix était la disponibilité de ces matériaux sur le marché national. Les résultats que nous avons obtenus lors de l'évaluation de l'usinabilité des aciers testés, nous ont permis d'éclaircir plusieurs questions concernant le fraisage conventionnel de ces matériaux. L'étude a permis de sélectionner pour le fraisage conventionnel des plaquettes en carbure P30 non revêtues et à revêtement simple couche de nitrure de titane (TiN).

Conclusion générale et perspectives

Il a été aussi confirmé que plus le matériau est dur plus son usinabilité est difficile. Cela est démontré par les critères d'évaluation qui sont la tenue de coupe, les efforts de coupe et la rugosité Ra de la surface usinée.

Pour le fraisage à grande vitesse les tests ont porté sur les superalliages à base de cobalt déposés par rechargements durs sur des blocs en acier fortement allié. Pour l'usinage à grande vitesse cinq nuances de plaquettes carbure revêtu simple et multicouches fabriquées par sandvik ont été testées.

Nous avons présenté pour le fraisage conventionnel des aciers testés, les modèles mathématiques obtenus après le traitement statistique. L'usinabilité est évaluée par l'analyse des modèles obtenus. Chaque modèle définit l'influence des paramètres du régime de fraisage sur la tenue de l'outil, sur les composantes de l'effort de coupe et sur la valeur de la rugosité arithmétique Ra de la surface usinée. Les résultats obtenus nous ont permis de comparer par l'analyse des valeurs des composants l'usinabilité des aciers testés et de présenter la classification de chaque matériau selon les critères obtenus.

Les résultats obtenus sont très concluants et serviront de base de données en coupe des métaux pour le fraisage des aciers. Les principales conclusions tirées de cette étude montrent que l'usinabilité est une caractéristique qui dépend principalement des propriétés mécaniques du matériau usiné, particulièrement sa dureté. La composition chimique et la teneur des éléments d'addition influent beaucoup sur le comportement à l'usinage des aciers.

Nous avons constaté par exemple que la résistance à l'usure en dépouille des plaquettes revêtues quel que soit le matériau usiné est moindre que celle de la plaquette non revêtue ; la vitesse d'usure pouvant varier d'un facteur 2,5 pour l'acier 100Cr6 non traité. L'usure en dépouille qui a servi de test de durée de vie est à la fois une cause et un témoin de la dégradation des arêtes de coupe.

La formation de cratères, sur la face de coupe de l'outil, en arrière de l'arête de coupe, n'a pu être vraiment observée, la détérioration effective des arêtes de coupe et la durée de vie sont atteintes, avant que se manifeste la cratérisation par frottement du copeau sur l'outil. Par contre, nous avons identifié plusieurs modes de détérioration des revêtements et outils : abrasion, échauffement superficiel, déformation plastique, fissuration, etc...ainsi que la formation d'arête rapportées. Notre étude expérimentale est une base pour une éventuelle recherche sur l'optimisation du processus de fraisage. Les résultats obtenus relèvent à la fois de perspectives d'applications industrielles et d'études à caractère fondamental. L'apport d'une expérimentation basée sur un plan d'expériences doit être considéré dans une double perspective.

Conclusion générale et perspectives

Dans le premier cas, il impose d'établir une distinction salutaire entre les paramètres d'entrée retenus pour cerner et étudier le problème posé et les variables de sortie mesurées ou seulement analysées qualitativement pour apporter des éléments de réponse au problème posé. Dans le deuxième cas, la validation du plan offre des perspectives d'extrapolation assurées dans leurs fondements, et par là, meilleures que la démarche du couple-outil matière sur laquelle se fondent la plupart des industriels.

La notion de couple-outil matière permet de définir des zones stables d'usinages. Une fois la zone définie, les opérateurs doivent adapter cette zone aux autres paramètres de l'usinage pour optimiser le travail, mais cette adaptation essentiellement itérative est faite de manière non méthodique et dépendante du « savoir faire » du régleur. Le couple outil-matière possède donc un caractère prédictif empirique.

Dans le cas d'un plan d'expériences, on dispose de la connaissance d'un comportement de l'ensemble outil-revêtement-matière et non d'un seul domaine de stabilité. L'optimisation des conditions d'usinage ne s'opère plus par « tâtonnement » mais par l'intermédiaire des données de l'analyse comportementale des variables de sortie en fonction des paramètres de l'usinage.

Plusieurs pistes semblent s'ouvrir pour progresser dans la modélisation du processus de formation du copeau. L'existence de données fiables, même si elles sont insuffisantes, doit stimuler la modélisation. En effet, ces données constituent, à la fois, une assise et un test de validation d'un modèle (modèle de MERCHANT).

Au terme de l'étude comparative sur l'usinabilité des matériaux et l'influence des conditions de coupe nous avons dégagé une question fondamentale.

L'étude expérimentale menée sur le fraisage à grande vitesse des superalliages base cobalt et particulièrement les stellites 6 avec différentes nuances plaquettes de coupe modernes et différents revêtements est une innovation. En effet c'est pour la première fois que les rechargements stellites 6 déposés par procédé PTA (plasma torche arc), sont usinés à grande vitesse. Les résultats obtenus sont très encourageants et ouvrent une perspective devant les techniques de rechargement par plasma sur les matériaux destinés à la fabrication des moules par prototypage rapide.

La surveillance du processus de coupe en temps réel par l'intégration dans la chaîne de mesure des dispositifs wattpilotes de mesure de puissance suivant les différents axes du système usinant a été adopté avec des résultats satisfaisants. Une corrélation entre l'usure des outils de coupe et l'évolution de la puissance de coupe a été vérifiée.

Conclusion générale et perspectives

Au terme de l'étude comparative du comportement des revêtements et leurs apports aux conditions de coupe, nous avons dégagé une question fondamentale.

Quelle est l'aptitude d'un revêtement à préserver la qualité de l'arête de coupe et à éviter les divers modes de dégradation qui l'agressent ?

L'étude a permis la qualification pour les applications industrielles de deux nuances de plaquettes de coupe. Le bicarbure micro grains P 30 avec revêtement multicouches TiN /TiAlN et la nuance H13A avec revêtement nanocristallin TiN/AlTiN.

Beaucoup de questions relatives à l'usinage par le procédé de fraisage auxquelles on souhaiterait apporter des réponses. C'est un défi à long terme qui passe par une connaissance plus précise des divers aspects du processus de coupe. Les voies pour progresser, que nous venons de mentionner, devraient y contribuer.

Références bibliographiques

- [1] **Collectivité d'auteurs**, Fraisage, un domaine où l'outil va de plus en plus vite, Revue périodique, Machine de production, I.S.S.N. 1989.
- [2] **M. Sachot**. Fraiseuses et centres d'usinage. B. 7160, vol. BT2 (1995).
- [3] **F.C. Pruvot**. Machine-outil : présentation. B 7 120, vol. BT2 (1997)
- [4] **G. Prod'homme**. Commande numérique des machines-outils. B .7130, vol. BT2. (1996).
- [5] **E. Merchant** . Mechanics of the metal cutting process. Journal of applied physics, 1945, vol.16, n° 5, pp.267-275
- [6] **L. Boulanouar**. Modélisation statistique pour la détermination de l'usinabilité des aciers difficilement usinables, Thèse (Ph. D), pp. 200, Sofia, 1986.
- [7] **M. Benghersallah**. Etude de l'usinabilité des Aciers au cours du fraisage, Thèse de Magister Juin 1995 Département de mécanique, Université de Annaba
- [8] **M.C. Djamaa**. Etude comparative de l'aptitude de coupe de différentes matières à outil, Thèse de magister, Annaba, 1992
- [9] **M. Khechana**. Détermination de l'usinabilité des aciers, thèse de magister, Annaba, 1992
- [10] **I. Andonov, L. Boulanouar**. Détermination complexe de l'usinabilité de l'acier à outil Z40CrMo6-2, I.S.M.E, Sofia, 1985
- [11] **L. Alden Kendall**, Tool wear and tool life, Metal Handbook, Machining, Volume 16, ASME. PP. 37- 47 (1989).
- [12] **H. Opitz et W. Konig** . Basic research on the wear carbide cutting tools Machinability .Proceedings of ISI, Londres (1965).
- [13] **C.Bedrin**. Généralité sur la coupe des métaux, conférence CAST Lyon, INSA de Lyon, 1971, pp. 5-71
- [14] **JP. Cordebois et coll**, Fabrication par usinage, Dunod, 2003.

- [15] **G. Bittès**, Contribution à la connaissance des mécanismes Fondamentaux liés à l'usinabilité des aciers de construction mécanique, thèse de doctorat de l'Université de Toulon et du Var, 1993.
- [16] **W. König., R. Komanduri . , HK.Tönshoff. et G. Ackershott. .** Machining of Hard Materials, Annals of the CIRP, vol. 33/2/1984, p. 417-427.
- [17] **M. Lefebvre.** Fraisage combine carbure, rapport CETIM, 1989
- [18] **R. Weill.** Les phénomènes d'usure au contact du copeau et de l'outil; formation des couches de diffusion à la surface des outils en carbures métalliques, Revue Française de Mécanique 18–19 (1966) 63–73.
- [19] **F. Leroy.** Endommagement des outils de coupe, Traité Mécanique et chaleur B 7042 (1993) 2.
- [20] **Z. Zuha, C. Ping:** “Study of cold welding caused by friction in metal cutting Wear, n°201, 1996
- [21] **M.A.Yalles, J.F.Rigal ,K.Chaoui, L. Boulanouar .** The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface
- [22] **Catalogue “Sandvik Coromant”.** The new generation of milling grades. Six new ways to better productivity.
- [23] **F. Leroy.** Les essais d'usinabilité et de formabilité des aciers. Internationaux de France du traitement thermique (1990).
- [24] **Documentation CETIM :** “Les revêtements CVD et PDV appliqués aux outils de coupe“ 1994
- [25] **B. Roumesy.** Détermination des lois d'usure des outils de coupe, Machine-outil Juillet 1975.
- [26] **D. Dudzinski, A. Devillez, A. Moufki , D. Larrouquere , V. Zerrouki ,**
A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 439–456
- [27] **A.Devillez, S.Lesko , W. Mozer.** Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry, Wear, (2004), 256/1-2 pp. 56-65.

- [28] **A. Moufki*, A. Molinari.** A new thermomechanical model of cutting applied to turning operations.Part II. Parametric study. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 (2005) 181–193.
- [29] **A. Molinari. , Dudzinski. D, Schulz.H,** 1ère conférence franco-allemande sur l’usinage grande vitesse. – Metz,), Université de Metz, juin 1997.
- [30] **A. Molinari, M. Nouari,** Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting, Wear 252 (2002) 135-149.
- [31] **A. Moufki, A. Molinari, D. Dudzinski,** Modeling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law, J. Mech. Phys. Solids 46 (10) (1998) 2103-2138.
- [32] **A. Molinari, D. Dudzinski,** Stationary shear band in high speed machining, C. R. Acad. Sci. Paris 2 (315) (1992) 399-405.
- [33] **D. Rousseau,** Etat de surface et durée de vie des outillages, Revue matériaux et techniques, Avril 1976.
- [34] **J. Boulanger.** Nouvelles méthodes de calcul des critères d’état de surface, revue pratique de contrôle industriel n°117 nov. 1982.
- [35] **F. Leroy .** Mise en forme par usinage. Les référentiels Dunod : Pratique des matériaux industriels (1990).
- [36] **H. Zahouani :** “Quantification de la topographie tridimensionnelle des surfaces“ P.H.D. Université de Besançon 1989
- [37] **H. Zahouani, R. Vargiolu, M. Dursapt, TG. Mathia :** “Motifs and spectral characterisation of anisotropic morphology of engineered surfaces. Incidence in tribology“ World tribology congress of London 1997
- [38] **T.R. Thomas :** “Characterization of surface roughness“ Précision engineering 1981, Vol 3
- [39] **J.M. Kahles, M. Field, S.M. Harvey:** “High speed machining possibilities and needs” 1978
- [40] **J.Brunet** “Influence des contraintes résiduelles induites par usinage sur la tenue à la fatigue des matériaux métalliques aéronautiques “ Thèse de Doctorat Ensam, 26 Novembre 1991

- [41] **H. Shao, L. Liu, H.L. Qu.** Machinability study on 3%Co–12%Cr stainless steel in milling. *Wear* 263 (2007) 736–744
- [42] **C.Calvez.** Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone – Thèse de doctorat de l'ENSAM Paris (1995).
- [43] **P.Mathon.** Usinabilité d'acier 16NC6 de structures différentes. Traitements thermiques, Paris sep-oct. 1968, pp 27-30
- [44] **B.Roumesy, C.Bedrin.** Plans d'expériences pour la détermination des lois d'usure des outils de coupe. *Technologie et formations*, 1994, N°52, pp 23-34
- [45] **K. Nakayama, M. Arai, T. Kanda:** “Machining characteristics of hard materials” *Annals of CIRP* 1988
- [46] **H.K. Tonshoff, A. Mohlfeld, C. Spengler:** “PVD coated tools cutting applications” Actes de la conference Internationale the coatings in manufacturing engineering, Thessalonique 1999
- [47] **M.Nordin, R. Sundstrom, T.I. Selinder, S. Hogmark.** Wear and failure 240-246 austenitic stainless steel *Surface and coatings technology* 133-134 (2000) mechanisms of multilayered PVD TiN TaN coated tools when milling
- [48] **T.V.Sreerama Reddy. T. Sornakumar , M. VenkataramaReddy , R. Venkatram** Machining studies were conducted on C45 workpiece using both untreated and low temperature treated. *Cryogenics* 48 (2008) 458–461
- [49] **G. Glabel, D. Gourdet, JL. Tous :** “Matériaux pour outils de coupe“, *Techniques de l'Ingénieurs, Traité de Mécanique et Chaleur* 1999.
- [50] **M. Benghersallah, L Boulanouar.** Impact du revêtement sur le comportement à l'usure et sur la rugosité de la surface usinée en fraisage frontal de l'acier C18. *Revue synthèse de l'Université Badji Mokhtar Annaba, ISSN N°18.* Juillet 2008.
- [51] **R.leveque, F.leroy.** Nouveaux matériaux pour outils de coupe : détérioration et méthodes d'essais. *Sciences techniques*, Decembre 1976, vol 37, pp.53-58
- [52] **S. Brunet,** Influence des contraintes résiduelles induites par l'usinage sur la tenue en fatigue des matériaux métalliques aéronautiques, Thèse de doctorat, ENSAM, 1991.
- [53] **T.I. Selinder, M.E. Sjostrand, M.Nordin, S. Hogmark.** Performance of PVD TiN/TaN and TiN/NbN superlattice coated cemented carbide tools in stainless

steel machining Surface and coatings technology 105 (1998) 51-55.

- [54] **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 (2007) 77–82
- [55] **M.Nordin, M.Larsson, S. Hogmark.** Mechanical and tribological properties of multilayered PVD TiN/CrN, TiN/MoN, TiN/NbN, TiN/TaN coating on cemented carbide. Surface and coatings technology 106 (1998) 234-241.
- [56] **H.K. Tonshoff, A. Mohlfeld, C. Spengler:** “Pre-treatment of coated tools for cutting applications” Actes de la conference internationale the coatings in manufacturing engineering, Hannover 2001
- [57] **F.M. Kustas:** “Nanocoatings on cutting tools for dry machining“1997.
- [58] **E.M. Trent:** “Métal cutting“Butterworth Heinemann, 1991
- [59] **P.Bagard** "Outillage et formes complexes: bilan technico-économiques entre usinage à grande vitesse, usinage conventionnel " Micronora 1996.
- [60] **A. Defretin, G. Levailant.** Usinage à grande vitesse, techniques de l'ingénieur. Doc. BM 7180, 1999.
- [61] **H. Shulz** Le fraisage à grande vitesse des matériaux métalliques et non métalliques. Université de Toulon. 1^{ere}Conférence franco-allemande sur l'UGV. Recueil des conférences ; Metz, 6 et 7 juin 1997.
- [62] **A. Reutler,** « Cutting Tool Technology in High - Speed Milling /HSM) » Fraisage SA 1998
- [63] **Y.S. Liaoa, H.M. Linb, J.H. Wanga.** Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools. Journal of materials processing technology 201 (2008) 460–465
- [64] **C.K. Shaa, J.C Lin b, H.L. Tsai.** The impact characteristics of Ti–6Al–4V plates hardfacing by laser alloying NiAl + ZrO₂ powder. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003)197–202
- [65] **C.K. Shaa, H.L. Tsai.** Hardfacing characteristics of S42000 stainless steel powder with added silicon nitride using a CO₂ laser. Materials Characterization 52 (2004) 341– 348.

- [66] **Y. Sahin , A. Riza Motorcu.** Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool, *Materials and Design* 26 (2005) 321–326
- [67] **H. Schultz,** *Fraisage grande vitesse des matériaux métalliques et non Métalliques,* Boulogne, 1997.
- [68] **Tsao Chung-Chen, Hocheng Hong.** Comparison of the tool life of tungsten carbides coated by multi-layer TiAlCN for end mills using the taguchi method. *Journal of Materials Processing technology* 123 (2002) 1-4.
- [69] **J.A Ghani, I.A.Choudhury, H.Hassan.** Application of taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Materials processing technology* 145(2004) 84-92.
- [70] **N. Camuscu, E. Aslan** A comparative study on cutting tool performance in end milling of AISI D3 tool steel. *Materials processing technology* Avril 2005.
- [71] **Documentation CETIM :** “Les revêtements CVD et PDV appliqués aux outils de coupe“ 1994
- [72] **M. El Mansoria, L. Fouilland-Paillé et F. Pierron.** Usinabilité à grande vitesse et à sec des couches du rechargement base-nickel par soudage d’outillage à chaud. *Mécanique et Industries* 6, 211–225 (2005)
- [73] **M. EL Mansoria, M. Nouari.** Dry machinability of nickel-based weld-hardfacing layers for hot tooling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) 1715–1727
- [74] **X.J. Ren, Q.X. Yang, R.D. James, L. Wang.** Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling. *Journal of Materials Processing Technology* 147 (2004) 38–4
- [75] **S. Guerrin,** l’usinage des outillages rechargés, journées techniques organisées par le CETIM. 20-22 Avril 2003.
- [76] **G.Poulachon .** Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage c-BN des aciers durcis. Application : usinabilité de l’acier 100Cr6. Thèse de doctorat soutenue le 2 déc. 1999 à l’ENSAM de Cluny.
- [77] **J. Rech** « Thèse de Doctorat » faisant référence à J. RECH, B, LAHALLE “Bilan Economique d’un atelier UGV de production de culasses” Rapport d’étude

industrielle, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Cluny, 2001

- [78] **M. Remadna**, Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes en CBN. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, Juin 2001
- [79] **C. Pagès**, Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, novembre 2003
- [80] **M.A Yalles**, Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur. Thèse de doctorat d'état, Université badji mokhtar Annaba, Année 2005.
- [81] **M. Habak**, Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage de l'acier à roulement. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, décembre 2006.
- [82] **E. Rivière-Lorphèvre**. Etude et simulation du procédé de fraisage grande vitesse : Effort de coupe, stabilité et état de surface. Thèse de doctorat, Faculté polyclinique de Mons, Mars 2007
- [83] **M. El-Ahmed**. Industrialisation du procédé : Contribution à la maîtrise de l'opération de treilage ou fraisage vertical- approche analytique et expérimentale. Thèse Pour obtenir le grade de Docteur de L'École Nationale
- [84] **G. Bittès**, Contribution à la connaissance des mécanismes Fondamentaux liés à l'usinabilité des aciers de construction mécanique, thèse de doctorat de l'Université de Toulon et du Var, 1993.
- [85] **S. Bissey**. Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités thermiquement. Thèse de l'école nationale supérieure d'arts et métiers centre de Cluny, 15 Avril 2005