

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université de 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie

Ecole Doctorale Nationale de Mécanique de Construction

Mémoire de Magister



En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Mécanique et
maintenance industrielle

Thème

**Prédiction de l'usure et de la durée de vie des
outils de coupe lors du tournage des aciers**

Présenté par :

LABIDI ABDEREZAK

Devant le jury composé de MM :

Président :	S. GUENFOUD	Pr. Université de Guelma
Rapporteur :	M. A. YALLESE	Pr. Université de Guelma
Examineurs:	A. BELBAH	M.C/A Université de Guelma
	H.HAMADACHE	M.C/A Université d'Annaba
Invité:	S. BELHADI	M.C/B Université de Guelma

2012

Remerciements

Je souhaite d'abord remercier mon encadreur le Professeur **M.A. YALLESE** pour son appui scientifique et ses judicieux conseils et surtout sa disponibilité malgré ses multiples occupations.

J'exprime ma gratitude à Monsieur le professeur **S. GUENFOUD** qui a accepté d'être le rapporteur de ce travail.

Tous mes remerciements vont à Monsieur **A.BELBAH** et Monsieur **H.HAMADDECH** qui ont acceptés d'être examinateurs de ce travail sans oublié Monsieur **S. BELHADI** pour leur participation au jury.

Je remercie aussi tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail surtout mes collègues du travail.

Ce travail n'aurait pu aboutir sans le soutien de toute ma famille que je remercie d'une façon exceptionnelle.

ملخص

هذه الدراسة تندرج في إطار بحث تجريبي حول تآكل أداة القطع من نوع الخزف المختلط المغلف CC6050 أثناء عملية الخراطة الصلبة و الجافة للفولاذ ذو خليط مرتفع X210Cr12 و مقسى إلى HRC 54 . يتميز هذا الفولاذ بقدرة عالية للصدوم أمام التآكل (مقاومة كبيرة للتآكل) حيث يستعمل في تصنيع قوالب و مخرز (مثاقب مخصف) التقطيع و الكبس ملولبة السحب، حصى القضبان الحديدي و أدوات نجارة الخشب .

بادئ الأمر تم برمجة تجارب طويلة المدة لتبيان مدى تأثير سرعة القطع و سرعة التقدم على تآكل الأداة إلى جانب دراسة نتائج هذا التآكل على مقاومته (مدة الحياة). بعدها قمنا بدراسة مدى تأثير التآكل VB على تطور خشونة السطوح المصنوعة و كذلك قوى القطع.

قمنا كذلك بدراسة إحصائية للنتائج والتي نستخلص منها نماذج رياضية لمختلف الظواهر المدروسة. هذه النماذج سمحت لنا باستخلاص العلاقة بين شروط القطع (سرعة القطع، سرعة التقدم و عمق التمريرة) والوسائط المدروسة (التآكل قوى القطع و الخشونة) حتى يمكننا إجراء تنبؤات.

الكلمات المفتاحية: التآكل, مدة الحياة, الخشونة, قوى القطع, الخراطة, الفولاذ و التنبؤ.

Résumé

Cette étude concerne une investigation expérimentale sur l'usure d'un outil de coupe en céramique mixte revêtue (CC6050) en tournage dur à sec de l'acier fortement allié X210Cr12 traité à 54 (HRC). Cet acier a une excellente tenue à l'usure (haute résistance à l'usure), il est utilisé pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filière d'étirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois peigne à rouler les filets.

En premier lieu, des essais d'usure de longue durée ont été planifiés pour élucider l'effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur l'usure de l'outil ainsi que l'étude des conséquences de l'usure sur la tenue. Ensuite on a étudié l'impact de l'usure (VB) sur l'évolution de la rugosité des surfaces usinées et sur les efforts de coupe.

Le traitement statistique des résultats nous a permis de déterminer des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles ont permis d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les paramètres étudiés (usure, effort de coupe et rugosité). Ces modèles mathématiques ont un intérêt industriel certain, car ils permettent de faire des prédictions.

Mots Clés :

Usure, durée de vie, rugosité, efforts de coupe, tournage, aciers durs et prédiction.

Abstract

This paper presents an experimental study on the wear of coated mixed ceramic tool (CC6050) in hard turning of dryly high alloyed steel X210Cr12 heat-treated into extra hardness up to 54 HRC.

This steel has a high wear resistance and is used in the production of cutting and forming matrixes and punches, drawing die, profiler rolls, knurls, wood working tools, worms rolling chaser.

Firstly, long-term wear tests were planned to clarify the cutting speed and feed rate effect on tool wear, as well as the study of wear consequences on cutting performance. Then, we have studied the wear impact (VB) on the machined surface roughness evolution and the cutting forces.

The statistical treatment of the results has allowed determining mathematical models of the different studied phenomena. These models have allowed stating the relationship between the cutting system elements (cutting speed, feed and depth of cut) and the studied parameters (wear, cutting force and roughness). These mathematical models have a certainly importance, because they allow do make predictions.

Key words: wear, tool life, roughness, cutting force, turning, hard steel and prediction

Sommaire

Introduction	09
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA COUPE DES METAUX	
I.1-Usinabilité des matériaux	12
I.1.1- Introduction	12
I.1.2- Critères d'évaluation de l'usinabilité.....	14
I.1.3- Facteurs influençant l'usinabilité	15
a) La résistance mécanique	15
b) Les caractéristiques thermiques.....	15
c) Les compositions chimiques.....	15
I.2- Le tournage Dur	16
I.2.1- Généralité	16
I-2-2 Statistique sur le tournage dur	17
I.3 - Matériaux Usinés et Usinants	18
I-3-1 Matériaux usinés	18
a) Les aciers d'outillage à froid	19
b) Les aciers d'outillage à chaud	20
c) Les aciers à roulement	20
I-3-2 Matériaux usinants	20
a) Le nitrure de bore cubique	20
b) Les diamants polycristallins	21
c) Les cermets	21
d) Les carbures métalliques	22
e) Les céramiques	23
I-3-2 Evolution des Matériaux des outils de coupe	25
I.4- Usure et Endommagement des outils de coupe	27
I-4-1 Généralités	27
I.4.2- Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils.....	28
a) Essai d'usure de longue durée à vitesse constante	28
b) Essai d'usure à vitesse croissante.....	28
I-4-3 Formes d'usure	28
I-4-4 Les Mécanismes d'usure des outils	29
a) Processus d'abrasion	30
b) Processus d'adhésion	31
c) Processus de fissuration	31
d) Processus de déformation plastique	32
e) Processus de diffusion	32
f) Processus d'oxydation	32
I-4-5 Usure visible sur l'outil	33
a) Usure en dépouille	34
b) Usure en entaille ou par oxydation	34
c) Usure en cratère	35
d) Ecaillage de l'arête de coupe	35
e) Rupture de la plaquette	36

f) Arêtes rapportées	36
g) Déformation plastique	36
k) Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne	36
I-4-6 Lois d'usure des outils de coupe	37
a) Définitions	37
b) Modèle de Taylor	37
c) Modèle de Gilber	37
d) Modèle de Koning – Depiereux	38
e) Modèle de Colding	38
f) Modèle de Cronenberg	38
g) Bilan des modèles d'usure	39
I.5- Efforts de coupe	40
I.6- Rugosité des surfaces usinées	40
I.6.1- Principaux défauts de surface	40
I.6.2- Principaux critères de rugosité	41
I.7- Travaux de recherche sur l'usure des outils de coupe	43
I. 8- Conclusion	59

CHAPITRE II : EQUIPEMENTS UTILISÉS ET PROGRAMME DES EXPERIENCES

II.1-Introduction.....	61
II.2- Équipements utilisés.....	61
II.2.1- Machine outil	61
II.2.2- Outil de coupe utilisé	62
II.2.3- Matériau à usiner	63
II.3 -Appareillages de mesure utilisés	66
II.3. 1- Microscope pour la mesure de l'usure	66
II.3. 2- Mesure des efforts de coupe	67
II.3. 3- Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	68
II.3. 4- Autres équipements	68
II.4 - Planification des expériences.....	68
II.4.1- Introduction.....	68
II.4.2- Méthodologie de recherche	69
II.4.3- Méthode de planification des expériences	69
II.5- Conditions de coupe	73
II.6- Conclusion	73

CHAPITRE III : USURE DE LA CÉRAMIQUE CC6050 ET ÉVALUATION DE LA DURÉE DE VIE

III.1-Introduction	75
III.2 Usure des outils en céramique mixte (CC6050)	75
III.2.1- Usure en dépouille VB	75
III.2.2- Usure VC	79
III.3- Evaluation des durées de vie	83
III.3.1- Détermination des modèles de l'usure en fonction du temps	84
a) Effet de la vitesse de coupe	85
b) Effet de l'avance	86
III.4- Modèles de l'usure	86
III.4.1- Détermination des modèles de l'usure en fonction du temps	86
III.4.2- Modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe et l'avance.....	87
III.5- Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de VB	88
III.5.1- Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage	88
III.5.2- Analyse des efforts de coupe en fonction de VB	92
III.6- Modèles de l'effort	97
III.6.1- Détermination des modèles de l'effort en fonction du temps	97
III.6.2- Détermination des modèles de l'effort en fonction de l'usure	98
III.7- Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage et de l'usure VB	99
III.7.1- Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage	99
III.7.2- Analyse de la rugosité en fonction l'usure VB	103
III.8- Modèles de la rugosité	107
III.8.1- Détermination des modèles de la rugosité en fonction du temps	107
III.8.2- Détermination des modèles de la rugosité en fonction de l'usure	108
III.9- Conclusion	109

CHAPITRE IV : PREDICTION DE L'USURE DE LA CERAMIQUE CC6050 FACE A L'ACIER X210Cr12

IV.1- Introduction	111
IV.2- Résultats avec l'outil céramique mixte CC6050	111
IV.3- Modèle de l'usure en dépouille VB en fonction des paramètres de coupe	113
IV.3.1- Analyse de la variance (ANOVA) pour VB	113
IV.3.2- Analyse de régression	113
IV.3.3- Graphique des effets principaux pour VB	114
IV.3.4- Diagramme des interactions pour VB	114
IV.3.4- Evolution de l'usure VB en fonction des paramètres du régime de coupe.....	115

IV.4- Modèles de la rugosité Ra en fonction des paramètres de coupe	116
IV.4.1- Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra	116
IV.4.2- Analyse de régression	117
IV.4.3- Graphique des effets principaux pour Ra	117
IV.4.4- Diagramme des interactions pour Ra	117
IV.4.5- Evolution de la rugosité Ra en fonction des paramètres du régime de coupe.....	118
IV.5- Modèles de la rugosité Rz en fonction des paramètres de coupe	119
IV.5.1- Analyse de la variance (ANOVA) pour Rz	119
IV.5.2- Analyse de régression	120
IV.5.3- Graphique des effets principaux pour Rz	120
IV.5.4- Diagramme des interactions pour Rz	120
IV.5.5- Evolution de la rugosité Rz en fonction des paramètres du régime de coupe.....	121
IV.6- Modèles de la rugosité Rt en fonction des paramètres de coupe	122
IV.6.1- Analyse de la variance (ANOVA) pour Rt	122
IV.6.2- Analyse de régression	123
IV.6.3- Graphique des effets principaux pour Rt	123
IV.6.4- Diagramme des interactions pour Rt	123
IV.6.5- Evolution de la rugosité Rt en fonction des paramètres du régime de coupe.....	124
IV.7- Modèles de l'effort de coupe Fx en fonction des paramètres de coupe	125
IV.7.1- Analyse de la variance (ANOVA) pour Fx	125
IV.7.2- Analyse de régression.....	126
IV.7.3- Graphique des effets principaux pour Fx	126
IV.7.4- Diagramme des interactions pour Fx	126
IV.7.5- Evolution de l'effort Fx en fonction des paramètres du régime de coupe.....	127
IV.8- Modèles de l'effort de coupe Fy en fonction des paramètres de coupe	128
IV.8.1- Analyse de la variance (ANOVA) pour Fy	128
IV.8.2- Analyse de régression	129
IV.8.3- Graphique des effets principaux pour Fy	129
IV.8.4- Diagramme des interactions pour Fy	129
IV.8.5- Evolution de l'effort Fy en fonction des paramètres du régime de coupe.....	130
IV.9- Modèles de l'effort de coupe Fz en fonction des paramètres de coupe	131
IV.9.1- Analyse de la variance (ANOVA) pour Fz	131
IV.9.2- Analyse de régression	132
IV.9.3- Graphique des effets principaux pour Fz	132
IV.9.4- Diagramme des interactions pour Fz	132
IV.9.5- Evolution de l'effort Fz en fonction des paramètres du régime de coupe.....	133
IV.10- Conclusion	134
Conclusion générale	135
Perspectives	136
Nomenclature	137
Référence	138

INTRODUCTION

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.

Comme il a été mentionné précédemment, l'usure des outils de coupe est considérée comme étant un des facteurs primordiaux qui affecte les processus d'usinage, la surveillance en temps réel de l'état d'outil permet aux opérateurs de maximiser le produit et d'améliorer la qualité de celui-ci. Cependant la connaissance de ce paramètre n'est pas la seule issue pour prendre les décisions d'arrêter ou de continuer le processus de coupe. D'autres paramètres de la machine-outil et de l'outil de coupe peuvent influencer le processus d'usinage, tels que les conditions de coupe, le matériau d'outil ainsi que celui de la pièce à usiner.

Les outils de coupe s'usent parce que les surfaces d'usure (face de coupe et de dépouille) de l'outil doivent supporter des charges normales élevées et parce que le copeau et la pièce appliquent ces chargements lors de mouvements relatifs sévères par rapport aux surfaces d'usure. Les actions de coupe et de frottement sur ces surfaces de contact augmentent la température du matériau d'outil, ce qui accélère l'usure physique et chimique de ce dernier.

Malheureusement il y a de nombreuses variables à considérer, il n'est donc pas surprenant que **l'expertise de l'usure des outils et les décisions de changement d'outil soient des problèmes difficiles**. Par conséquent l'étude approfondie et continue de l'usure, notamment lors de l'usinage des aciers de hautes duretés, comme l'acier X210Cr12, avec des matériaux à outils de hautes performances (céramique et CBN) est une tâche d'une grande importance économique et technologique en productique mécanique.

Notre travail s'inscrit dans ce cadre, il a pour but de prédire l'usure des outils de coupe en fonction du changement des paramètres du régime de coupe (Vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et le temps de coupe).

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire est devisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique dans laquelle sont définis, l'évolution des matériaux à outils et la description des phénomènes régissant le processus de coupe en particulier l'usure des outils de coupe, l'effort de coupe et l'intégrité de la surface usinée en tournage dur. Une autre partie très importante est réalisée dans ce chapitre, ayant pour but de

présenter une synthèse de quelques travaux de recherche relatifs au tournage dur par les outils CBN et céramiques.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les équipements utilisés et les conditions expérimentales. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats obtenus lors des essais d'usure, ou nous avons traité les performances des outils en termes d'usure en dépouille, d'efforts de coupe et de rugosité des surfaces usinées et leurs évolutions en fonction du temps.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons une étude statistique (Analyse de la variance) des résultats trouvés afin de déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles ont permis d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) et les paramètres étudiés (usure, effort de coupe et rugosité) lors de l'usinage de l'acier fortement allié X210Cr12 avec un outil en céramique mixte revêtue CC6050. Pour faire une analyse de variance (ANOVA) et pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (RMS), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «MINITAB». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés afin de faire des prédictions.

En dernier lieu, nous avons élaboré une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques et les perspectives.

Chapitre I

Étude Bibliographique sur la coupe des métaux

I.1 Usinabilité des matériaux

I.1-1 Introduction

La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différentes méthodes d'usinage (tournage, fraisage,...etc.) sur le comportement d'un même matériau, dans des conditions de coupe différentes (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, ... etc.) en utilisant des outils de compositions et géométries différentes. L'usinabilité, en tant que propriété très complexe du matériau usiné, représente une fonction de plusieurs variables, sur laquelle il influe un grand nombre de paramètres. La figure I.1 nous montre une présentation générale de cette notion.

Variables d'entrée

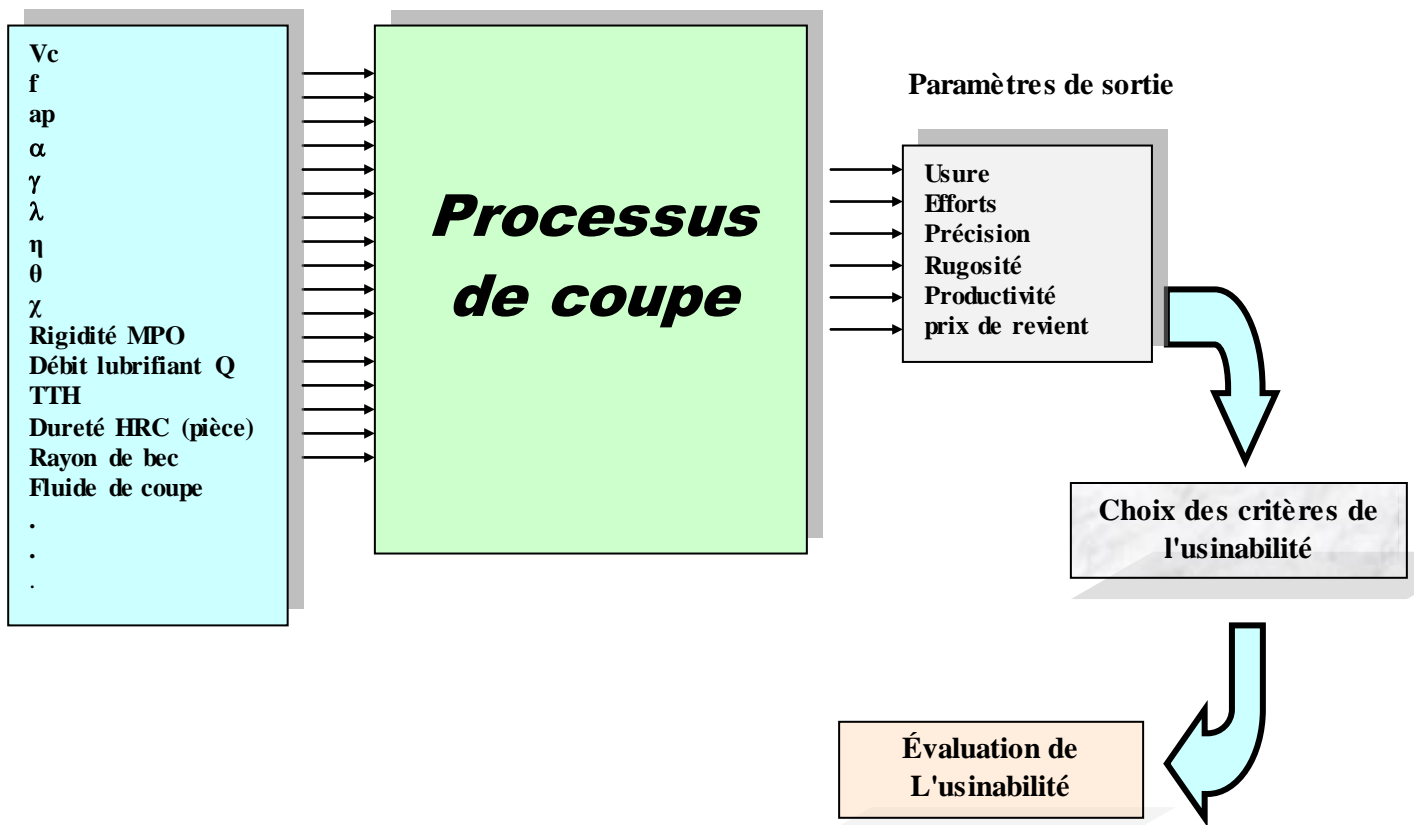


Figure I.1: Processus de coupe et critères d'usinabilité

L'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières, celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage, par exemple), dans des conditions de coupe toujours identiques à elles mêmes, à l'aide d'outils toujours identiques tant au point de vue de la composition chimique et du traitement thermique qu'au point de vue de leur forme et de leur affûtage [1]. Aussi, on peut définir l'usinabilité comme étant la propriété grâce à laquelle un matériau donné

peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc, en principe, d'une propriété inhérente à la matière envisagée.

Mais, de cette définition même, on peut comprendre immédiatement que le terme « usinabilité » est beaucoup trop général puisque les matériaux peuvent subir des opérations de mise en forme très variées, avec ou sans enlèvement de copeau. Il en résulte qu'un matériau peut avoir une bonne usinabilité pour certaines opérations de mise en forme et en même temps, une mauvaise usinabilité pour d'autres opérations. Il s'agit, de plus, d'une propriété particulièrement difficile à étudier, car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents. D'une part, l'aspect métallurgique du problème qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre.

D'autre part, l'aspect mécanique du problème qui comprend les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée. De plus, même dans le cas des seules opérations procédant par enlèvement de copeau, le critère d'usinabilité n'est pas bien défini. C'est, selon le point de vue envisagé :

- la tenue de l'outil permettant la production maximale.
- les efforts de coupe donnant une indication sur la puissance nécessaire à la coupe.
- le fini des surfaces usinées permettant de choisir les conditions de coupe en fonction de la destination finale de la pièce usinée [1].

Ceci montre bien la difficulté de définir et de mesurer l'usinabilité. Nous verrons, dans la suite, que les soins extrêmes apportés à la recherche (identification des matières et réalisation des essais) expliquent que nous pouvons en tirer malgré tout des conclusions valables.

Depuis la publication en 1907 de l'ouvrage de F.W.Taylor, d'innombrables publications traitent ce problème d'usinabilité qui est très voisin à celui de la coupe des métaux.

Malheureusement, parmi celles-ci, trop nombreuses sont celles qui sont inutilisables pour faire progresser nos connaissances : soit dans le domaine de l'usinabilité, parce que traitant de la coupe des métaux, elles négligent l'aspect métallurgique, soit dans le domaine de la coupe des métaux, parce que, relatives à l'usinabilité, elles ne se préoccupent pas suffisamment des conditions de coupe. Avant d'entamer le vif du sujet, il est important d'indiquer brièvement le domaine auquel nous nous sommes intéressés. Le problème entier de l'usinabilité comporte l'étude de tous les métaux ferreux et non ferreux, pour toutes les opérations de mise en forme, avec ou sans enlèvement de copeau. C'est un problème extrêmement vaste. Ainsi, nous sommes limités à l'usinage par enlèvement de copeaux (en particulier le tournage) appliqué à des matériaux difficilement usinables, pour les raisons suivantes :

- l'usinage par enlèvement de copeaux semble intéresser un plus grand nombre de chercheurs et constructeurs mécaniciens.
- les métaux (particulièrement les aciers à usinabilité difficile) sont les plus utilisés en construction mécanique.

I.1-2 Critères d'évaluation de l'usinabilité

Avec les différences entre les diverses définitions de l'usinabilité, les critères d'évaluation, diffèrent aussi d'un chercheur à un autre. D'après [2], les principaux critères sont classés selon l'ordre suivant :

- ✓ la rugosité de la surface usinée, définissant l'aptitude au fini de surface.
- ✓ l'effort de coupe, définissant la résistance à la coupe.
- ✓ la durée de vie de l'outil ou la vitesse de coupe permettant d'obtenir une durée d'outil donnée ou l'usure pour un temps donné.

Par contre d'autres chercheurs prennent l'usure comme l'effet le plus observable [3], la classe de la manière suivante :

- ✓ l'usure de l'outil.
- ✓ l'effort de coupe.
- ✓ la température de coupe.

Aussi, d'après [3], les critères de l'usinabilité sont :

- ✓ la durée de vie de l'outil.
- ✓ les efforts de coupe.
- ✓ le bon fini de surface.

Les américains aussi évaluent l'usinabilité d'un matériau en % [2], c'est le pourcentage USA % qui est défini comme étant la vitesse de coupe relative pour usiner un alliage dans des conditions de coupe déterminées.

$$\text{USA \%} = (V_C / 55).100 \% \dots\dots\dots \text{(I.1)}$$

Tel que V_C représente la vitesse de coupe correspondant à l'usinage du matériau envisagé, dans la condition donnant une vitesse de coupe égale à 55 m/min pour l'acier étalon AISI B112.

Finalement pour résumer les critères d'évaluation de l'usinabilité, il faut imposer ceux qui sont en liaison directe avec l'objectif techno économique dans ce domaine, soit la tenue de l'outil, la facilité d'usinage et la précision des cotes. La majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères ordonnés comme suit :

- ✓ la tenue de l'outil ou des critères dépendant (V_B, K_t, \dots etc.).

- ✓ les efforts de coupe.
- ✓ le bon fini de surface.

I.1-3 Facteurs influençant l'usinabilité

a) La résistance mécanique

On pense couramment que la résistance mécanique, ou la dureté qui lui est équivalente constitue un indice d'usinabilité significatif. En réalité, des aciers dont la dureté est rendue plus élevée par un traitement de trempe et revenu au lieu d'un traitement de recuit, peuvent avoir une usinabilité meilleure dans l'état le plus dur. Ce résultat est valable pour certaines résistances aux environs 800 MPa mais ne peut être étendu aux résistances plus élevées de l'ordre de 1100MPa. On rencontre alors des difficultés d'usinage dues à la résistance élevée du métal à la déformation [4].

b) Les caractéristiques thermiques

Le tableau I.1 présente la conductivité thermique de quelques matériaux. Cette caractéristique est en relation étroite avec l'usinabilité car les aciers qui ont une conductivité réduite ne dissipent pas rapidement la chaleur générée lors de la coupe, ce qui conduit à la concentration de la chaleur au niveau du contact pièce-outil-copeau et par conséquent à l'usure accélérée de l'outil de coupe.

<i>Matériau</i>	<i>Conductivité thermique, W/(m. °K)</i>
Acier inoxydable	12.11 ~ 45.0
Plomb	35.3
Aluminium	200
Or	318
Cuivre	380
Argent	429
Diamant	900 ~ 2320

Tableau I.1: Valeurs approximatives de la conductivité thermique pour une série de matériaux.

c) Les compositions chimiques

L'élément le plus important est le carbone. A basse teneur, l'acier composé de ferrite, est difficile à usiner. L'augmentation du pourcentage (% C) crée des solutions de continuité dans la matière de ferrite par formation de plages de perlite. On atteint un optimum d'usinabilité avec l'acier demi-dur à 0.35 % de carbone. Une augmentation supplémentaire de la teneur en carbone rend l'acier de plus en plus dur et moins usinable. Le manganèse n'agit pas de façon sensible tant qu'il n'est pas en

proportion notable. A forte teneur, il favorise l'écrouissabilité et diminue l'usinabilité. Les éléments d'alliages usuels, comme le nickel ou le chrome n'ont que peu d'influence aux teneurs présentes dans les aciers de construction industriels faiblement alliés. A forte teneur, dans le cas d'aciers spéciaux ils agissent sur la structure et l'écrouissabilité. Les aciers inoxydables de type 18/8 (18% Cr et 8% Ni) par exemple, sont austénitiques, très écrouissables et difficiles à usiner.

I.2 Le Tournage Dur

I.2-1 Généralité

Le tournage dur concerne le tournage de matériaux ferreux durcis entre 45 HRC à 70 HRC par des opérations principalement de finition interne ou externe, et dans certain cas d'ébauche.

Les matériaux durs sont caractérisés par les propriétés suivantes:

- une grande dureté à la pénétration
- un pouvoir abrasif élevé
- une faible ductilité
- un grand rapport entre la dureté et le module d'élasticité (Module de Young).

Le mot dur signifie:

- Dur au sens de la dureté du matériau usiné, du point de vue résistance à la pénétration d'un indenteur.
- Dur au sens de difficulté à usiner le matériau, conséquence de sa très mauvaise usinabilité (un matériau peut être difficile à usiner sans pour autant être dur).
- Dur au sens de la difficulté de l'opération d'usinage (alésage profond, travail aux chocs,...)[5].

Pour usiner ces matériaux, on fait appel à des outils coupants de qualité. Les plaquettes utilisées en tournage dur sont des plaquettes carbures, des céramiques et des diamants synthétiques. Les plus utilisées sont celles à base de Nitrure de Bore Cubique (CBN) pour leurs bonnes compatibilités avec les aciers. C'est le matériau le plus dur après le diamant. C'est un matériau de synthèse produit sous haute pression et température. Pour prévenir l'écaillage de l'arête de coupe un chanfrein de protection est utilisé, ce qui conduit à un angle de coupe très négatif. Comme l'épaisseur du copeau est très faible.

L'objectif du tournage dur, est que les pièces en acier de dureté élevée soient finies en tournage et sans rectification (Tableau I.2). Le tournage dur permet d'obtenir de bons états de surfaces. Les premières appréciations montrent que la rugosité peut descendre jusqu'à des Ra de 0.15 μ m, approchant les valeurs obtenues en rectification (inférieur à 0.15 μ m). Les tolérances dimensionnelles

peuvent atteindre des qualités 6 avec des tolérances géométriques très précises. Des défauts de circularité inférieure à $1\mu\text{m}$ peuvent être observés. Les facteurs principaux pour l'obtention de ces caractéristiques sont la machine et l'outil, sur une machine à priori très rigide et une vitesse de coupe élevée [6].

	Tournage dur	Rectification
Gamme d'usinage	Plus courte : suppression de la phase rectification	Plus complexe car changement de prises des pièces
Temps d'usinage	Faible si $L < 40\text{mm}$	Important sauf si L est grand ou si la pièce peut passer en centerless
Etats de surface (Ra)	$0.15\ \mu\text{m}$	$0.15\ \mu\text{m}$
Défaut de forme	Facilite l'opération de polissage	Evite les problèmes dus aux stries en hélice pour les pièces avec des fonctions d'étanchéité
Précision	Jusqu'à IT-5	Jusqu'à IT-3
Environnement	Retraitement des copeaux : dépollution (huile de coupe)	Les boues de rectifications sont difficiles et chères à retraiter

Tableau I.2: Comparaison entre tournage dur et rectification [7].

I.2-2 Statistique sur le tournage dur

a) Application du tournage dur

La figure I.2 montre une statistique sur les différentes applications du tournage dur

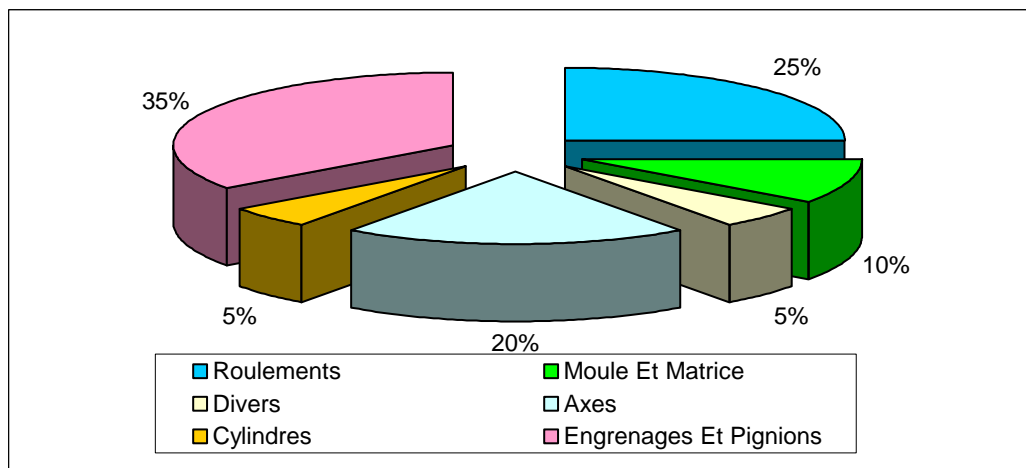


Figure I.2: Présentation graphique des statistiques sur les différentes applications du tournage dur [8].

b) Industrie utilisant le tournage dur

La figure I.3 montre une statistique sur les différentes industries utilisant le tournage dur.

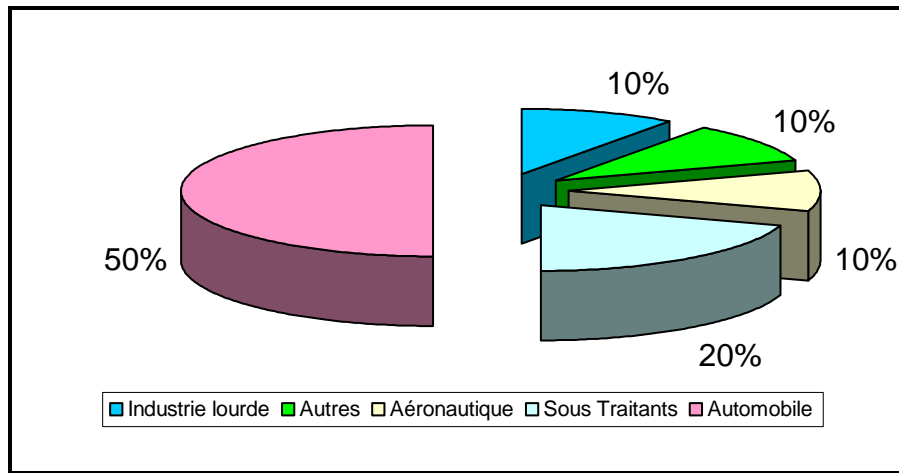


Figure I.3: Présentation graphique des statistiques sur les différentes industries utilisant le tournage dur

c) Marché du tournage dur en europe :

La figure I.4 montre que le CBN et les céramiques sont les plus utilisés en tournage dur.

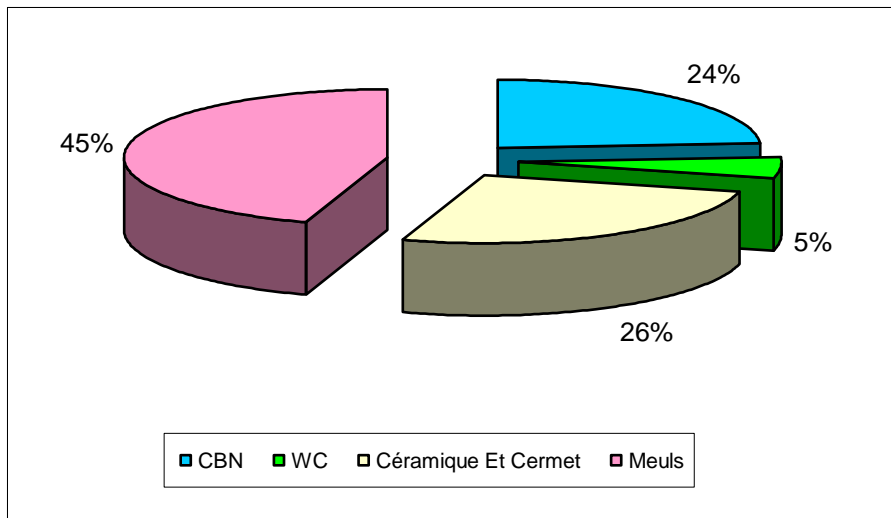
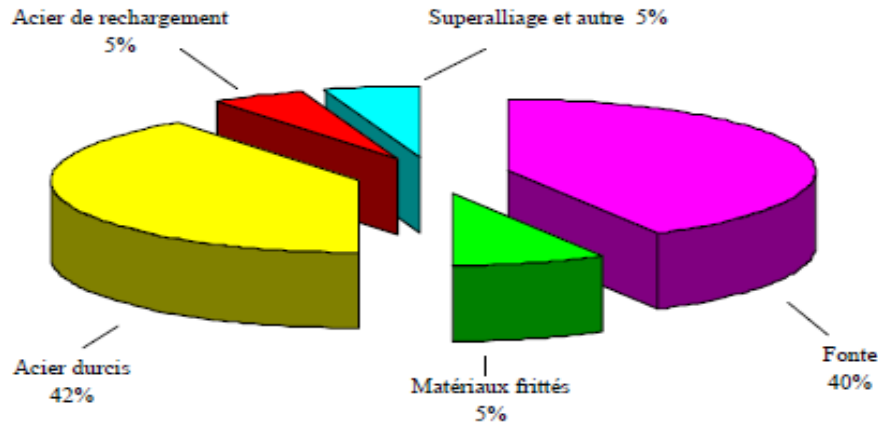


Figure I.4: Présentation graphique des statistiques sur les différents matériaux de coupe en tournage dur [8].

I.3 Matériaux Usinés et Usinants

I.3-1 Matériaux usinés

De plus en plus, les métallurgistes élaborent de nouveaux matériaux répondant à des exigences de l'industrie (meilleure usinabilité, plus grande résistance mécanique, plus grande dureté...).



*Figure I.5: Répartition des matériaux usinés en tournage dur [9].
(D'après Goran Avance Métal Institut 2002)*

L'aptitude à être usiné et le niveau des propriétés mécaniques sont antagonistes [10]. Les réfractaires, les aciers fortement alliés dans leur état durci, les fontes alliées sont souvent difficilement usinables par des procédés conventionnels.

Une étude récente sur les applications de l'usinage dur, fait ressortir que 66% d'entre elles concernent les aciers traités, 26% couvrent les fontes et 8% les superalliages et autres matériaux (figure I.5).

La répartition française des aciers traités (figure I.6) montre que l'acier pour roulement 100Cr6 représente à lui seul 47% (120 000t) du volume total des aciers destinés aux traitements thermiques. La production européenne représente cinq fois le marché français.

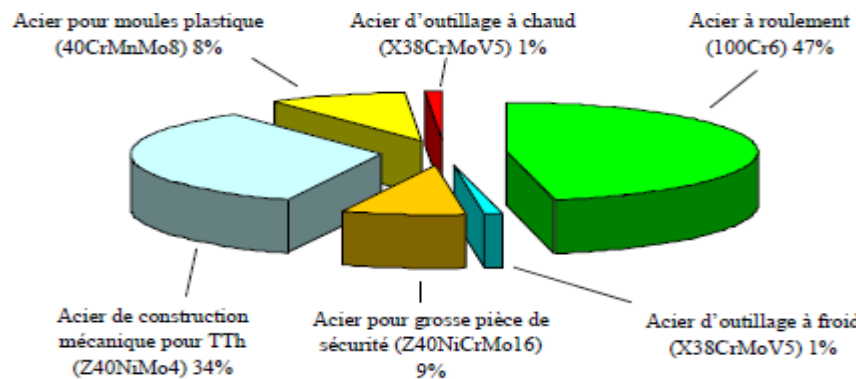


Figure I.6: Répartition de la production française des aciers destinés aux traitements [9]

a) Les aciers d'outillage à froid (X200Cr12; X160CrMoV1; X100CrMoV5;....)

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure et à la compression exceptionnelles. Ils sont remarquables pour leurs faibles variations dimensionnelles au traitement thermique. La dureté de ces aciers peut varier de 50 à 65HRC.

Ils sont principalement utilisés pour tous travaux à froid tels que : poinçons d'estampage, outils de coupe, molettes à rouler les pas de vis, outils d'extrusion, lames de cisaille, outils de travail du bois, cames....

b) Les aciers d'outillage à chaud (X40CrMoV5; 40NiCrMo16; 35 CrNiMo4;.....)

Ces aciers possèdent une excellente résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Leur résistance à haute température, leur ténacité et leur aptitude au polissage, leur permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants : matricage à chaud, moules à coulée sous pression, filage à chaud, lames de cisaille à chaud. La dureté après revenu varie de (30 à 55) HRC.

c) Les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI 52100)

Fortement utilisé (figure I.6), ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils CBN sont employés avec succès lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à faible concentration de CBN est préférable à un outil à forte concentration de CBN ou à une céramique mixte (Al₂O₃ + TiC) donnant une durée de vie trois fois supérieure dans le cas de la céramique, et six fois plus dans le cas du CBN à forte concentration.

I.3-2 Matériaux usinants

L'usinage des matériaux durs nécessite des outils coupants de plus en plus performants.

En tournage, les plaquettes utilisées peuvent être en carbure, en céramique ou en nitrure de bore cubique. Ces dernières sont plus utilisées car elles possèdent une bonne ténacité avec une dureté élevée.

a) Le nitrure de bore cubique, le matériau le plus dur après le diamant, entièrement fabriqué par l'homme, a été synthétisé avec succès pour la première fois en 1957 par la General Electric Company aux USA. Mais il n'a été utilisé industriellement pour la coupe que dans le milieu des années 1970. Plus de 90% du diamant industriel et 100% du CBN sont produits de synthèse de structure atomique à des températures de 1500°C. Le nitrure de bore polycristallin (PCBN) a été mis en application au milieu des années 70 en raison de la difficulté d'usiner des matériaux ferreux très durs (de 45HRC jusqu'à 70HRC) et pour répondre aux cadences de production souhaitées.

Le PCBN est 50 fois plus résistant à l'abrasin que le carbure de tungstène, et 5 fois plus que l'oxyde d'alumine et le nitrure de silicium. Il conserve sa résistance et tendance à réagir avec le fer ou l'air aux hautes températures de coupe qui sont caractéristiques de l'usinage des aciers durs. C'est un matériau réfractaire remarquable qui unit l'aptitude à l'usinage et le caractère hydrofuge du graphite à une conductivité thermique très élevée. Sa température d'utilisation en atmosphère oxydante atteint 1400°C. En atmosphère inerte ou réductrice, il résiste à des températures de 2000°C, et dans l'hydrogène sec, on peut atteindre près de 3000°C.

Pour couvrir tous les cas d'usinage, il existe plusieurs nuances de CBN, chacune ayant son application spécifique. Les performances dépendent de la teneur en CBN, de la grosseur des particules, du type de liant utilisé et de la microstructure. On les classe généralement en deux groupes selon leur microstructure :

Les outils **PCBN** dits « **purs** » dont la teneur en nitrure de bore cubique dépasse 90% sont caractérisés par une deuxième phase liante de nature métallique (2% ALB2/AIN). Cette nuance possède une grande résistance mécanique et aux chocs. Elle sera recommandée pour l'usinage des alliages de rechargement, des fontes perlitiques, des superalliages et des pièces en métaux frittés. Du fait de sa grande résistance, on utilisera cette nuance pour des travaux d'ébauche et de coupe interrompue d'alliages durs ;

Les outils **PCBN** dits « **mixtes** » métal/céramique : la teneur en nitrure de bore cubique reste inférieure à 70%, et la seconde phase est complexe pour associer les propriétés de composés métalliques et celles de composés céramiques ; cette seconde phase peut comprendre des composés à base d'alumine {(nitrure AIN, borure ALB2), de titane (nitrure TiN, carbure TiC, carbo-nitrure Ti (CN))} et éventuellement d'autres éléments composés. Une nuance à liant céramique possède une plus grande résistance à l'usure thermo-chimique, ce qui est préférable pour les coupes continues à vitesses élevées des aciers traités [11].

b) Les diamants polycristallins (CD) ont un domaine d'utilisation complètement différent, étant donné qu'ils sont totalement inappropriés pour les métaux contenant du carbone. Ils sont utilisés en finition et demi-finition pour les métaux non ferreux et les matières non métalliques [12].

c) Les cermets: Les CERMETS (CERAmique METAl), constitués principalement de TiC ou de TiC/N, possèdent par rapport aux métaux durs conventionnels une densité beaucoup plus faible mais une dureté et une résistance à l'usure plus élevées. Les forts coefficients de dilatation thermique des cermets ($7 \text{ à } 9 \times 10^{-6}/\text{K}$) dus au TiC et TiN par rapport aux outils carbures (WC) sont co-responsables de la faible résistance des cermets aux chocs thermiques. C'est également ce qui explique leurs faiblesses

lors de l'usinage à coupe interrompue. Le remplacement du TiC par le TiN qui possède la plus grande conductivité thermique, a permis d'améliorer la résistance des cermets aux chocs thermiques.

Ils conviennent pour l'ébauche légère et la finition dans des conditions favorables, en ce qui concerne la pièce et la machine-outil. La finition est leur spécialité, avec pour caractéristique un état de surface de haute qualité.

On peut retenir les avantages d'utiliser les cermets :

- résistance à la cratérisation et à la formation de l'arête rapportée supérieure à celle de carbures de tungstène et des céramiques,
- résistance à l'usure trois à quatre fois plus grande que celle des carbures non revêtus,
- admettent de faibles avances,
- vitesse de coupe proche de celles des céramiques mais également utilisables aux vitesses supérieures des carbures de tungstène non revêtus [6].

d) Les carbures métalliques

Les carbures non revêtus (C) sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène, de titane.....) et de substance liante (cobalt...) qui confère sa ténacité à la plaquette [12]. Ils sont constitués essentiellement de carbure de tungstène (phase α), et de carbure de titane, de tantale ou de niobium (phase γ), et d'un liant généralement le cobalt (phase β). Le rôle de l'addition de carbure de titane, tantale ou niobium est d'augmenter les propriétés à haute température (vitesse de coupe élevée) en réduisant le frottement. C'est aussi de diminuer l'usure de la face de coupe en réduisant la diffusion du carbure de tungstène entre l'outil et le copeau [6].

Les carbures revêtus sont recouverts d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium (figure I.7).

Ces revêtements, en réduisant les frottements copeau/outil et pièce/outil, améliorent très nettement les possibilités des outils. Ils sont les plus utilisés dans un très grand nombre d'opérations de tournage, pour tous types d'usinage et pour une grande diversité de matières de pièces. C'est donc le choix à envisager en priorité pour la plupart des opérations d'usinage [12].

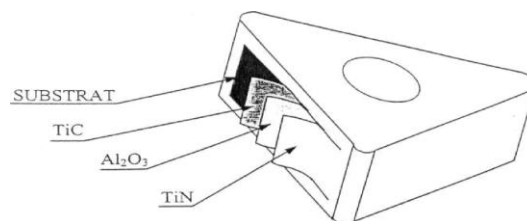


Figure I.7: Plaquette carbure revêtue, multicouches [6]

On peut retenir globalement que :

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

- **le carbure de titane (TiC)** adhère mieux aux substrats, constituant ainsi une excellente base d'application de couches de revêtement supplémentaires. Par contre, il est fragile et pour cela est déposé en couche n'excédant pas $51\mu\text{m}$,

- **l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)** est déposé en couche intermédiaire comme barrière de diffusion à la chaleur. Il conserve sa dureté à hautes températures, offrant une excellente résistance à l'usure, ainsi qu'une excellente protection contre la diffusion et l'oxydation à des vitesses et des températures de coupe très élevées. Un inconvénient majeur dans le cas des revêtements multicouches des plaquettes de finition est la perte de l'acuité d'arête.

Pour cette raison, les métallurgistes ont mis au point des revêtements en couches minces de 1 à $2\mu\text{m}$. Les gains obtenus dans la coupe des métaux à l'aide de ces revêtements sont importants. Ces gains dépendent essentiellement du couple outil/matière. Cependant, pour caractériser l'influence du revêtement, nous précisons dès maintenant que trois modes de détérioration peuvent intervenir:

- **abrasion** : Plus le revêtement est dur ce mode d'endommagement peut intervenir. Les revêtements TiC et Al_2O_3 sont performants du point de vue abrasion,

- **diffusion (outil/copeau)** : Ce mode d'endommagement est dans ce cas nettement plus important pour TiC, soluble dans l'austénite à partir de $1100 - 1150^\circ\text{C}$ que pour TiN et Al_2O_3 tous deux insolubles dans les aciers même liquides,

- **fissuration et écaillage** : La détérioration s'effectue par fissuration du revêtement soumis à de fortes contraintes d'origine thermique entraînant des micro-écaillages (sur l'arête ou sur les flancs) puis une usure contrôlée par diffusion et abrasion. Ainsi, une couche extérieure de TiN semble aujourd'hui conduire aux meilleurs résultats lors du tournage des aciers inoxydables. L'usure par effets physicochimiques est très réduite.

e) **Les céramiques (CC)** constituent un éventail de nuances adaptées à une gamme étendue d'opérations. Cela va de la fonte et de l'acier à l'usinage hautement spécialisé de matières réfractaires et d'acier trempé. Le besoin de rectification, par exemple, peut être éliminé lorsqu'on recourt aux plaquettes céramiques pour le tournage. Extrêmement productives quand elles sont utilisées à bon

escient, elles exigent toutefois un contexte d'usinage précis en matière de stabilité, de conditions de coupe, d'arête de coupe et de type de coupe. Les plaquettes céramiques sont conçues pour un taux élevé d'enlèvement de matière dans les situations où la précision de cotes et la qualité du fini de surface doivent demeurer inchangées tout au long de la durée de vie de l'outil. Cependant, elles ne conviennent pas pour certaines matières.

Les outils de coupe en céramiques sont divisés en deux familles :

- Les céramiques à base d'oxyde d'aluminium,
- Les céramiques à base de nitrure de silicium.

La fragilité relative de la céramique exige des machines très stables. Il est normal d'utiliser ces matériaux avec des vitesses de coupe à 900 m/min en tournage des aciers, la céramique composée du carbure d'alumine et de titane (cermets), est moins sujette à la fragilité, avec des efforts de rupture supérieurs à 690 MPa [6].

✓ Céramique oxydée et céramique renforcée par Whiskers

Alors que le manque de résistance thermique entraîne la défaillance du matériau de l'outil dans le cas des carbures, c'est le manque de dureté et de résistance au choc thermique qui entraîne une défaillance dans le cas des matériaux de l'outil en céramique oxydée. Par suite des cassures se produisant dès le début sur l'arête de coupe, il n'a pas été possible pour une céramique oxydée pure d'obtenir une amélioration de la durée de vie de l'outil par rapport au carbure.

Le renforcement de l'alumine par des fibres « Whiskers », plus efficace que les additions particulières telles réalisées pour les mélanges alumine - zircon et alumine -TiC, permet une meilleure résistance, une plus grande résistance à la rupture ainsi qu'une meilleure résistance aux chocs thermiques. De plus, le module de Weibull augmente, ce qui se traduit par une réduction des variations de résistance [13].

Un Whiskers est une fibre mono cristalline. Les Whiskers de SiC utilisés pour renforcer les outils de coupe en alumine ont un diamètre inférieur à 1 [μm] et une longueur comprise entre 5 et 20 [μm] (figure I.8).

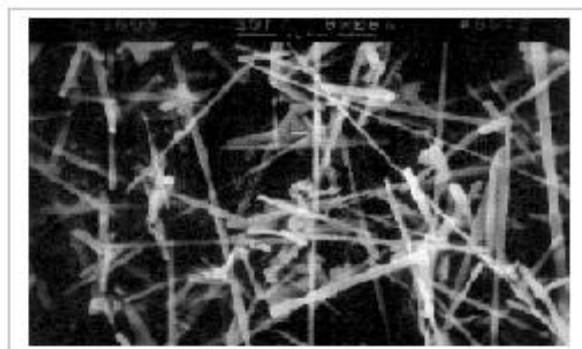


Figure I.8: Fibres «Whiskers » de SiC utilisés pour renforcer l'alumine d'après [13].

Il faut noter que l'augmentation de la durée de vie pour ce type d'outil est relativement limitée par rapport à un carbure non revêtu, et que son utilisation est coûteuse.

De nouveaux composés sont continuellement développés; les plus rencontrés sont Kyon et Sialon, ils sont destinés à la coupe discontinue grâce à leur forte résistance aux chocs. Kyon est une céramique d'alumine renforcée avec des fibres Whiskers de silicium, qui sont les cristaux simples ovales du carbure de silicium. Avec leurs grandes résistances aux chocs, ils améliorent la conductivité thermique. Ces insertions sont ainsi idéales pour des applications d'usinage sur les alliages de nickel. Elles ont une dureté de 45 [HRC] et peuvent être utilisées à des vitesses dix fois plus grandes que le carbure de tungstène.

✓ **Céramique non oxydée (nitrure de silicium)**

Le nitrure de silicium (SiN) est un composé atomique présentant un certain nombre de propriétés mécaniques intéressantes. La plus intéressante pour l'usinage des métaux est son très faible coefficient de dilatation thermique qui rend ce matériau très résistant aux chocs thermiques.

Le matériau de l'outil en céramique nitrurée avec son élément caractéristique, le nitrure de silicium, a été utilisé jusqu'à présent avec succès principalement pour l'usinage de la fonte.

Dans le procédé d'enlèvement de copeaux continus, comme par exemple le tournage de l'acier, son utilisation n'est pas conseillée en raison de la diffusion du silicium dans le copeau évacué et de la résistance à l'usure plus faible que celle de l'oxyde d'aluminium.

✓ **Perspectives des céramiques**

Les outils de coupe en céramique occupent aujourd'hui 4 à 5 % du marché des plaquettes indexables. Leur principal avantage est qu'ils autorisent des vitesses de coupe plus élevées que les outils en carbure, d'où des gains de productivité élevés.

Leurs principaux inconvénients sont leur fragilité et leur manque de fiabilité. Ils ont pu être surmontés dans une large mesure grâce aux céramiques renforcées qui ont été développées au cours des années 80.

Parallèlement au développement des matériaux céramiques, on a vu également le développement des machines outils qui offrent aujourd'hui plus de puissance et une meilleure stabilité. Elles sont aujourd'hui capables d'usiner selon des paramètres de coupe bien adaptés aux outils céramiques.

La conduite des machines par programmation en Commande Numérique a permis également d'adapter avec plus de précision, le cycle d'usinage au matériau de coupe, afin de réduire au minimum les risques de rupture de la plaquette.

I.3-3 Evolution des Matériaux des outils de coupe

L'évolution des matériaux constituant les outils de coupe a été une source de gain de productivité très importante pour l'industrie. Elle a entraîné, un doublement de la productivité tous les dix ans [14], (figure I.9).

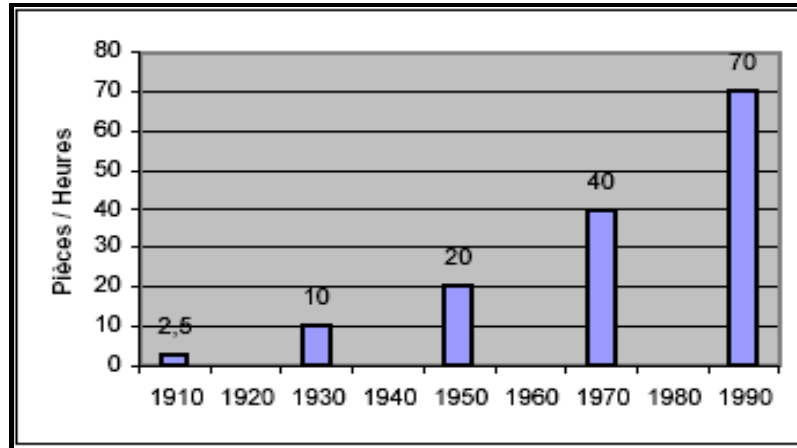


Figure I.9: Augmentation de la productivité en usinage acier [14]

Cette amélioration de la productivité résulte d'un accroissement important des vitesses de coupe permises, grâce à l'amélioration des performances des matériaux des outils. Elle résulte aussi des études et travaux à la fois techniques et fondamentaux portant sur les propriétés suivantes des matériaux [15]:

- la dureté : pour combattre l'usure,
- la résistance mécanique à chaud pour supporter les échauffements à grande vitesse,
- la ténacité pour encaisser les chocs dus aux interruptions d'usinages ou aux vibrations
- l'inertie chimique pour éviter les dégradations de l'outil par diffusion d'impuretés en provenance de la pièce usinée [7].

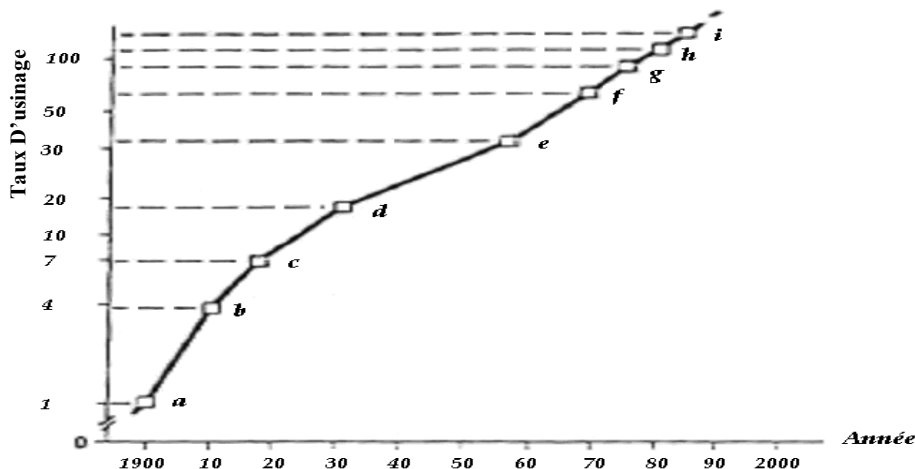


Figure I.10: Augmentation de la productivité due à l'évolution des matériaux des outils de coupe.

- On peut aussi récapituler les domaines d'emploi des différents matériaux d'outils (en incluant l'acier rapide) figure I.11.

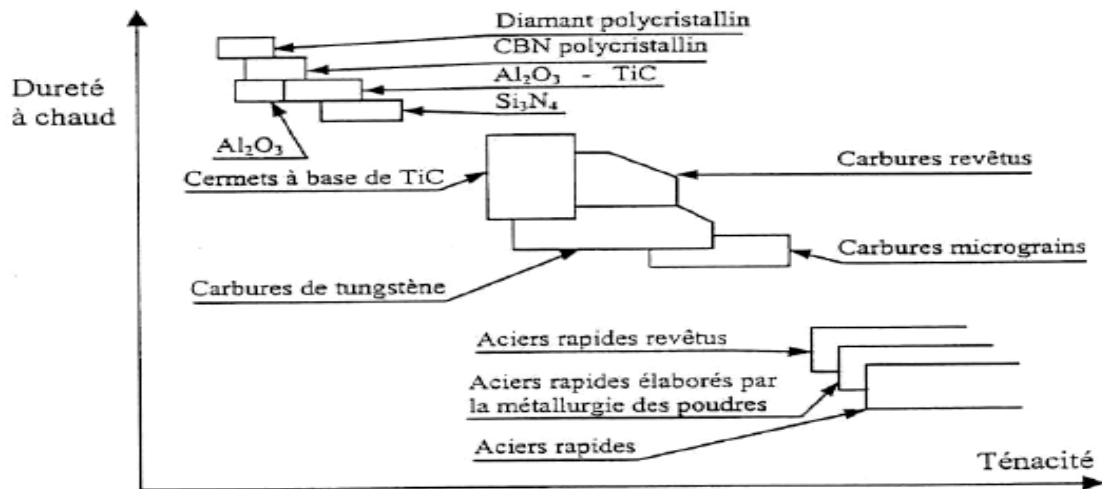


Figure I.11: Classement des matériaux de coupe en fonction de ces duretés à chaud [6].

I.4 Usure et endommagement des outils de coupe

I.4-1 Généralités

La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure. Le coût de l'usinage, qui intéresse en définitive l'entreprise, est une conséquence de tenue des outils à l'usure. Les méthodes pour la recherche des conditions opératoires d'un Couple outil-matière mettent en évidence la nécessité d'établir la capacité d'usinabilité avant tout autre mesure de ces caractéristiques. La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure. L'importance de cette usure a une influence directe sur :

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

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

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

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

Dans la concurrence du marché, la production industrielle doit perfectionner les méthodes d'usinage en travaillant soit avec une production maximale ou avec un coût minimal. Il arrive parfois que ce dernier passe au second plan et que seule la production maximale importe. On choisira alors une vitesse de coupe supérieure. Plus celle-ci croît ; plus les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent. Par conséquent, les frottements et les pressions élevées qui s'exercent à l'interface copeau / outil, provoquent une usure intense de l'outil [16].

I.4- 2 Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils

a) - Essai d'usure de longue durée à vitesse constante

Pour des conditions de coupe déterminées, on effectue des essais à des vitesses de coupe différentes, et on relève la durée de vie de l'outil, on effectue ainsi plusieurs essais. Cette méthode classique est très sûre, mais elle est assez longue et laborieuse et exige une quantité assez considérable de matière à usiner et plusieurs outils [17].

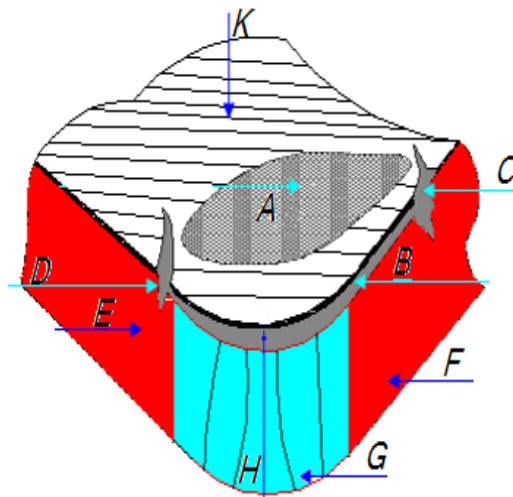
b) - Essai d'usure à vitesse croissante

Afin d'abréger la durée des essais et réduire la consommation du métal, on fait travailler l'outil jusqu'à détérioration de l'arête (ou jusqu'à un degré d'usure déterminé), avec des vitesses croissantes suivant une loi bien déterminée :

- croissance continue (dressage sur tour d'une face plane, l'outil avance radialement) ;
- la croissance peut être obtenue par chariotage conique ;
- ou croissance par paliers, si le tour est équipé d'un variateur de vitesse.

I.4- 3 Formes d'usure

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent des paramètres essentiels déjà évoqués (couple outil - matière, conditions d'usinage), on répertorie également quatre zones principales d'usure, d'une façon générale l'outil est soumis aux 6 modes d'usures définis ci-après (Figure I.12).



- A: usure en cratère.
- B: usure en dépouille.
- C: usure en entaille.
- D: usure en entaille dans le rayon.
- E: dépouille secondaire.
- F: dépouille principale.
- G: nez de l'outil.
- H: arête de coupe chanfreinée.
- K: surface d'attaque.

Figure I.12: Différentes formes d'usure.

I.4- 4 Les Mécanismes d'usure des outils :

La durée de vie de l'outil de coupe est directement liée à son usure ou, à sa détérioration pour un temps donné. L'allure tracée sur la figure I.13, se divise en trois zones A, B et C. Elle représente la relation entre l'usure et le temps de coupe [18].

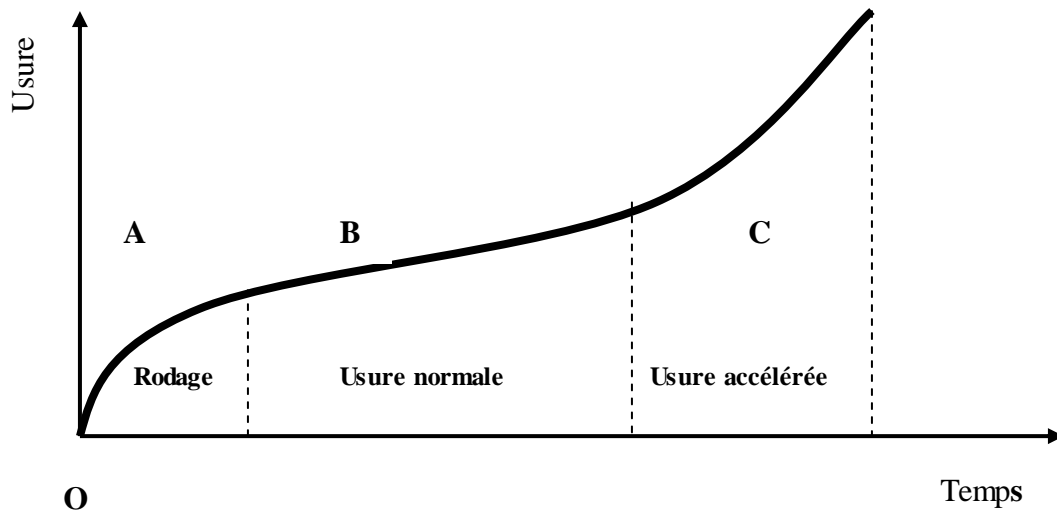


Figure I.13: Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe [18]

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

- **Zone A** : Est celle du rodage ou usure initiale. Elle donne lieu à une usure intense qui se caractérise par l'arrachement d'une quantité importante de petites particules de la surface de l'outil, plus les surfaces de la partie active de l'outil sont nettes (lisses), plus l'évolution de l'usure est faible.
- **Zone B** : Correspond à l'usure normale. Elle est plus stable, c'est-à-dire linéaire. Elle est caractérisée par une pente très faible comparativement aux autres zones.
- **Zone C** : C'est la zone d'usure accélérée (catastrophique), là où les deux types d'usure (celle en dépouille et en cratère) se réunissent.

Lorsqu'un problème d'usinabilité est constaté, il est nécessaire de bien observer l'endommagement de l'outil. Ces différentes formes d'endommagement font intervenir, à des degrés plus ou moins importants, les mécanismes suivants [2].

a) Processus d'abrasion (mécanique) :

L'usure par abrasion est essentiellement due aux frottements outil/pièce et copeau/outil (figure I.14). L'usure abrasive des outils résulte d'arrachement en surface de l'outil causé par des particules souvent anguleuses et de grande dureté contenues dans le matériau usiné (précipités en inclusions). Ces particules sont toujours renouvelées au cours de l'usinage. Les produits d'abrasion sont évacués en continu avec les copeaux. La vitesse d'usure abrasive croît avec la quantité de particules abrasives qui entrent en contact avec l'outil par unité de temps. Elle dépend donc de la composition chimique et du procédé d'élaboration du matériau usiné et croît avec la vitesse [19].

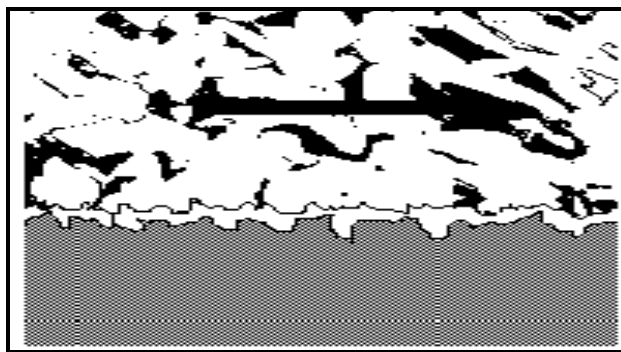


Figure I.14: Processus d'usure par abrasion

Cette usure pourra être :

- _ Homogène : dans le cas d'une matière où les constituants sont homogènement répartis.
- _ Localisée : dans le cas de conditions de coupe particulières : écrouissage, apparition d'oxyde lors de l'usinage.

b) Processus d'adhésion (mécanique) :

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. En effet lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Or les rugosités et micro-rugosités de ces surfaces, par contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des micro-soudures (figure I.15).

- *DE* : Déformation élastique
- *DP* : Déformation plastique

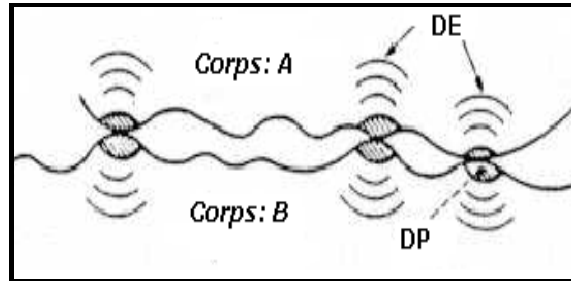


Figure I.15: Processus d'usure par adhésion mécanique [2]

Ces micro-soudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus continu génère :

- l'apparition d'arêtes rapportées si les micro-soudures sur l'outil est plus résistante que celles du copeau
- l'usure de l'outil si la micro-soudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil.

Cette usure est très faible et généralement négligeable [7].

c) Processus de fissuration (mécanique) :

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau/outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent flexions et vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes (phase). Il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique au début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil, écaillage [7].

Les chocs thermiques supportés par les outils sont très sévères soit pendant les arrêts de coupe soit par le refroidissement dû à un arrosage discontinu. La température décroît très vite en surface et plus lentement dans le coeur. La surface de l'outil est mise en traction et des fissures thermiques peuvent apparaître (figure I.16).

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

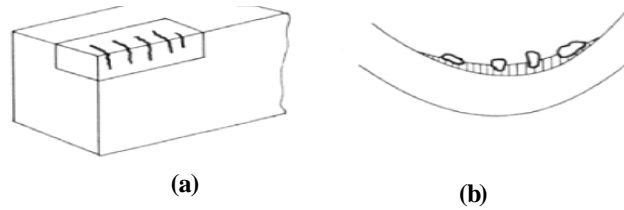


Figure I.16: (a) fissuration d'arête, (b) écaillage d'arête [2].

d) Processus de déformation plastique (mécanique) :

Si l'on caractérise un usinage en prenant comme paramètres la température (interface outil/copeau) et la pression exercée sur l'outil, on obtient un domaine de fonctionnement. Les pressions sont très importantes (de l'ordre de 70 à 80 daN/mm² pour un matériau mi-dur par exemple) et les températures à l'interface outil/copeau ou outil/pièce de l'ordre de 1000°C. Prenons le cas d'une plaquette en WC (grande majorité des plaquettes) : pour ces températures et pour ces pressions, on se trouve dans le domaine de déformation plastique du WC. Il y a donc transformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe).

e) Processus de diffusion (physico-chimique) :

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 (figure I.17).

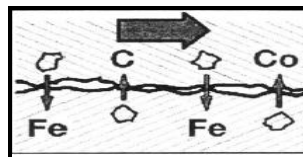


Figure I.17: Processus d'usure par diffusion.

f) - Processus d'oxydation (physico-chimique) ;

Le milieu de l'usinage est constitué :

- de l'oxygène dans l'air.
- des hautes températures.
- de l'eau dans les huiles de coupe solubles.

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoque localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (figure I.18). De plus, le potentiel d'oxydo-réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.

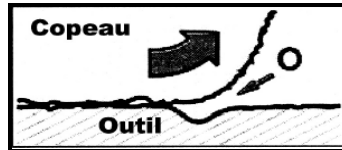


Figure I.18: Processus d'usure par oxydation.

I.4- 5 Usure visible sur l'outil

L'ensemble des processus décrits dans les deux paragraphes précédents, en se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils.

Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures. Ces dernières sont mesurables (figure I.19).

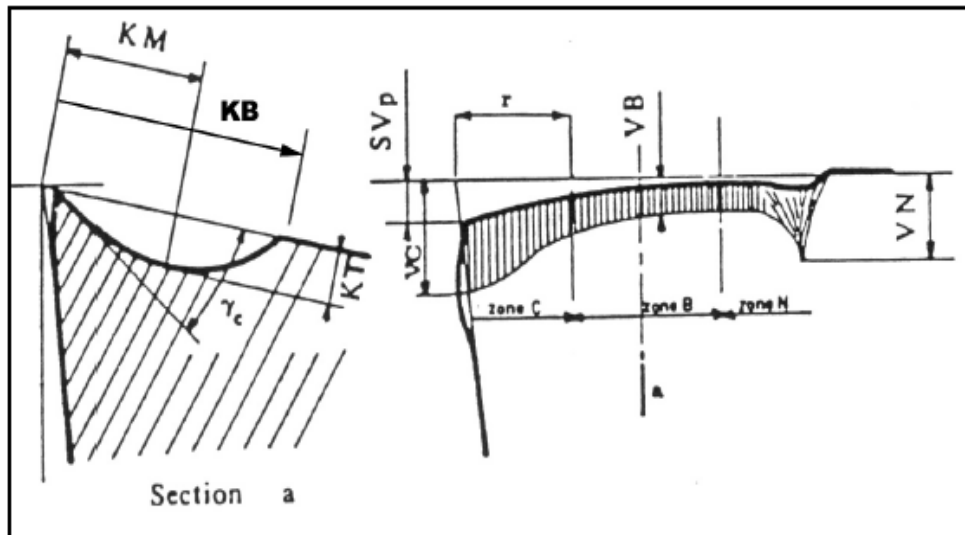


Figure I.19: Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil d'après la norme NFE 66 505 [7].

- KM : Distance au centre du cratère / pointe initiale de l'outil
- KT : Profondeur du cratère
- KB : Largeur du cratère

- γ_c : Angle de cratérisation
- VB : Hauteur de l'usure en dépouille
- VN : profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale
- VBC : Profondeur entre l'arête initiale et la zone usinée
- SV : Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée

a) Usure en dépouille :

Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe. Elle influe sur l'état de surface de la pièce usinée et sur la précision dimensionnelle de l'usinage car elle modifie la position de l'arête de coupe (figure I.20).

C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible VB.

$VB_{\text{critique}} = 0,6 \text{ mm}$ en ébauche et $0,3 \text{ mm}$ en finition

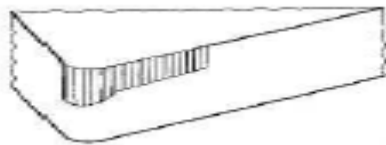


Figure I.20: Usure en dépouille [20]

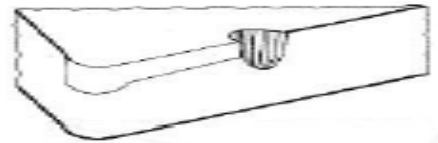


Figure I.21: Usure en entaille [20]

b) Usure en entaille ou par oxydation :

Elle apparaît ponctuellement au niveau du point de contact entre l'arête principale de coupe et la surface de la pièce mais elle peut aussi apparaître sur la face de dépouille secondaire. Elle est due à l'érouissage ou l'oxydation de la pièce (figure I.21). En général : $VN_{\text{critique}} = 1 \text{ mm}$.

Ce genre d'usure due à des phénomènes métallurgiques (calamine des pièces forgées, différence de taille de grain des pièces moulées, oxydation des aciers, austénitiques par exemple) est caractérisé par l'indice VN. Suivant l'importance de cette usure, il y a des risques de rupture.

Remarque :

Cette usure en entaille est souvent accompagnée d'une usure en dépouille. Cependant il est à remarquer que les entailles doivent être exclues de la mesure de VB.

c) - Usure en cratère :

C'est une usure en creux sur la face de coupe, caractérisée par la profondeur de cratérisation (indice K_T) et le rapport K_T/K_M ou son angle de cratérisation γ_c . Elle peut avoir à terme une incidence sur la tenue d'outil (durée de vie : effondrement ou recul de l'arête de coupe) (figure I.22).

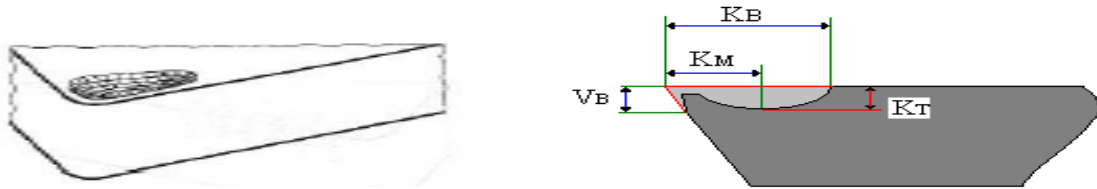


Figure I.22: Usure en cratère [20]

Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage, la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoquent une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion. Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par une flèche SV_p et un renflement de la face de dépouille. L'usure est souvent constatée sur les outils carbures, elle provoque généralement la rupture de la pointe de l'outil.

Valeur limite : $K_T \text{ critique} = 0,06 + 0,3 f$ Tell que ; f = avance par tour

La valeur critique est celle à partir de laquelle l'outil est considéré comme hors d'usage avec risque important de rupture de l'outil.

L'usure est généralement due à une vitesse de coupe excessive ou à une avance trop faible.

d) - Ecaillage de l'arête de coupe :

C'est une destruction de l'arête de coupe par arrachement de petits fragments d'outil, elle est généralement accompagnée d'une usure de la face de dépouille et de ce fait n'est pas toujours reconnaissable (figure I.23).

Elle est générée par les chocs thermiques et les vibrations. Elle peut générer des ruptures. Les écaillages en dehors de la partie active de l'arête proviennent de l'impact de copeaux par suite d'une mauvaise évacuation. Cette usure est souvent le fait de chocs thermiques ou d'arête trop fragile.



Figure I.23: Rupture de la plaquette [20]

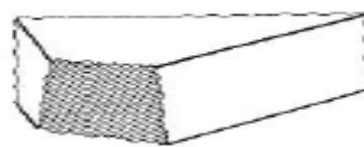


Figure I.24: Rupture de la plaquette [20]

e) - Rupture de la plaquette :

Une rupture de la plaquette signifie en général détérioration de l'outil et de la pièce. Ses causes sont multiples et dépendent de la machine et de la pièce. Elle est souvent le résultat d'entailles sur l'arête de coupe, d'une cratérisation ou d'une usure trop importante (figure I.24).

f) - Arêtes rapportées

Les arêtes rapportées résultent d'une accumulation de métal de la pièce usinée sur la face de coupe, en particulier dans le cas de matériaux difficilement usinables. Il arrive parfois que cet apport de métal se détache et détériore l'arête de coupe. Il mène en outre à des états de surface médiocres. Le phénomène est dû à une vitesse de coupe et une avance trop faible ou des angles de coupe non appropriés (figure I.25).



Figure I-25: Arête rapportée [20]



Figure I.26: Arête déformée [20]

g) - Déformation plastique

Elle est occasionnée par une sollicitation trop importante de l'arête de coupe (matériaux usinés trop durs) en combinaison avec des températures d'usinages élevées. La zone de déformation plastique du matériau dépassé, il y aura rupture. On peut trouver cette déformation plastique en parallèle d'une cratérisation. En effet le cratère affaiblit la section de l'outil (figure I.26).

k) - Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne

Légères fissures sensiblement perpendiculaires à l'arête de coupe occasionnées par les chocs thermiques résultant des interruptions de coupe, en particulier dans le cas du fraisage. Risque de rupture (figure I.27).

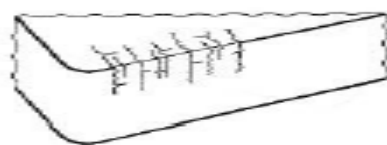


Figure I.27: Fissures sur l'arête [20]

I- 4.6 Lois d'usure des outils de coupe

a) Définitions

La loi d'usure définit la variation de la durée effective de coupe T des outils en fonction des conditions géométriques (pour le copeau et l'outil) et cinématiques de l'usinage. La durée effective de vie T est définie comme étant le temps d'usinage qui conduit à l'usure limite définie par les critères précédents. De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour représenter la loi d'usure des outils de coupe, parmi les quels on cite [8] :

b) Modèle de TAYLOR

C'est le modèle établi par TAYLOR en 1906 qui est caractérisé par la formule généralisée suivante.

$$T = K \cdot a_p^l \cdot f^m \cdot V_c^n \dots\dots\dots (I.2)$$

Pour une géométrie de coupe donnée ou (f, ap sont des constantes) il vient alors :

$$T = C_v \cdot V_c^n \dots\dots\dots (I.3)$$

Et

$$C_v = k \cdot a_p^l \cdot f^m = \text{constante} \dots\dots\dots (I.4)$$

Ou encore :

$$V_c \cdot T^{(-1/n)} = C_T \dots\dots\dots (I.5)$$

C_T : représente également la constante de TAYLOR, autrement dit, la valeur de la vitesse de coupe qui correspond à $T=1$ min.

NB : le modèle de TAYLOR peut s'écarter rapidement de la réalité en dehors de son domaine de validité.

c) Modèle de Gilbert

En 1950 ce modèle est la généralisation du modèle de Taylor, pour lequel la constante C_v est remplacée par une équation qui tient compte de la géométrie du copeau comme ce qui est montré au dessus.

$$C_v = k \cdot a_p^l \cdot f^m \dots\dots\dots (I.6)$$

donc :

$$T = k \cdot a_p^l \cdot f^m \cdot V_c^n \dots\dots\dots (I.7)$$

En prenant le logarithme des deux membres de l'équation précédente on trouve :

$\text{Log}(T) = \text{Log}(K) + l \cdot \text{Log}(a_p) + m \cdot \text{Log}(f) + n \cdot \text{Log}(V_c)$. Un simple changement de variables nous donne l'équation suivante :

$$\alpha = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 \dots\dots\dots (I.8)$$

La résolution du modèle est :

$$\alpha = b_1 \cdot x_1 + b_0 \quad \dots\dots\dots \text{si } V_c \text{ et } f \text{ sont des constantes}$$

$$\alpha = b_2 \cdot x_2 + b_0 \quad \dots\dots\dots \text{si } V_c \text{ et } a_p \text{ sont des constantes}$$

$$\alpha = b_3 \cdot x_3 + b_0 \quad \dots\dots\dots \text{si } a_p \text{ et } f \text{ sont des constantes}$$

d) Modèle de Koning – DEPIEREUX

Ce modèle ne fait intervenir que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe étant supposées constantes.

$$T = \exp. (-\alpha \cdot V^{\gamma} + \beta) \quad \text{avec : } \beta = -(\gamma \cdot S^{\mu} + \delta \cdot t^{\nu}) ; (\beta = \text{constante}) \dots\dots\dots \text{(I.9)}$$

$$\text{Alors : } \log (T) = - \alpha \cdot V^{\gamma} + \beta$$

$$\text{Soit : } x = V^{\gamma} \quad \text{et } y = \log (T)$$

On obtient :

$$y = - \alpha \cdot x + \beta \dots\dots\dots \text{(I.10)}$$

Où α et β sont les coefficients qui caractérisent le modèle.

e) Modèle de Colding

Ce modèle se présente sous la forme suivante :

$$K + a \cdot x + c \cdot y - z = 0 \dots\dots\dots \text{(I.11)}$$

Ce modèle peut être présenté sous la forme d'un polynôme du premier degré en x, y et z, ce dernier se résout comme le modèle de Gilbert, par contre le polynôme de deuxième degré en x, y et z, se résout de la façon suivante :

$$K + a \cdot x + b \cdot x^2 + c \cdot y + d \cdot y^2 - z + e \cdot z^2 + f \cdot x \cdot y + g \cdot y \cdot z + h \cdot x \cdot z = 0 \dots\dots\dots \text{(I.12)}$$

Cette équation comporte un grand nombre de coefficients dont la détermination ne peut se faire que par des méthodes numériques programmées.

f) Modèle de Cronenberg

Ce modèle ne prend jamais en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe, tout comme la loi de Taylor, il est caractérisé par l'équation :

$$T + K = C \cdot V^n \dots\dots\dots \text{(I.13)}$$

Où : K, est une constante

N.B : la constante C et le coefficient n dans ce modèle ne sont pas égaux à ceux dans le modèle de Taylor.

A partir de l'équation précédente on a :

$$\text{Log}(T + K) = \text{log}(C) + n.\text{log}(V) \Rightarrow \text{Log}(T + K) - n.\text{log}(V) = \text{log}(C)$$

Si on fait un simple changement de variables :

$$X = \text{log}(V), y = \text{Log}(T + K)$$

Alors :

$$y - n.x = \text{log}(C) \dots \dots \dots \text{(I.14)}$$

Le calcul des coefficients n et C se fait comme dans le cas du modèle de Taylor.

g) Bilan des modèles d'usure : (figure I.28).

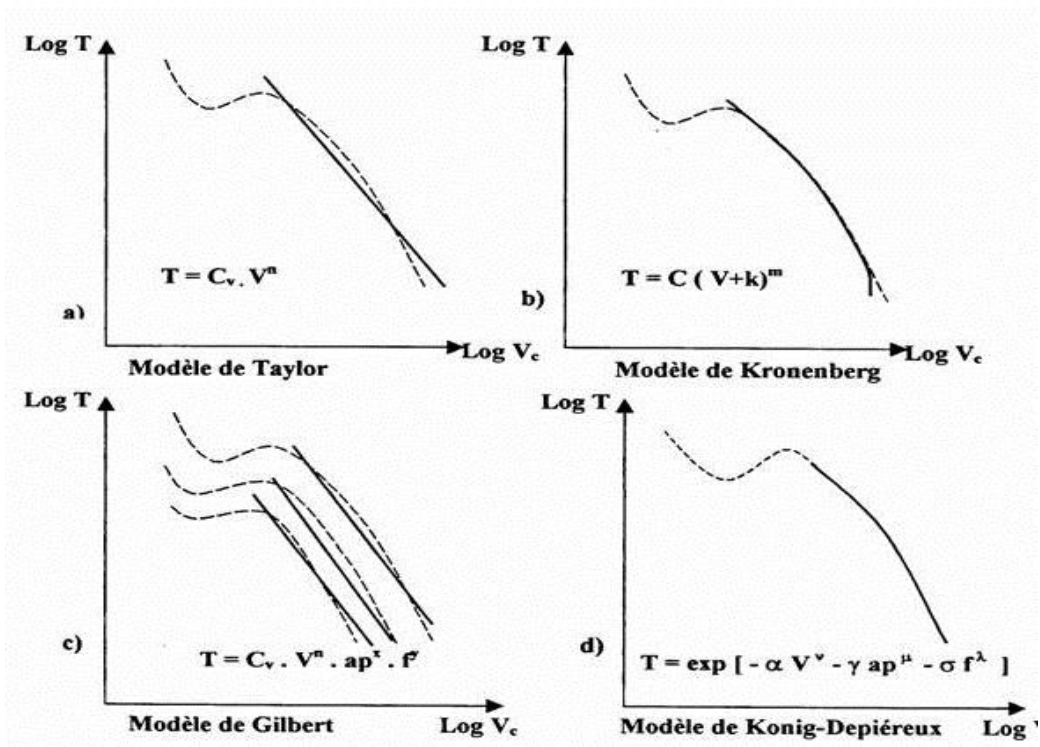


Figure I.28: Représentation graphique des différents modèles

Compte tenu des dispersions liées aux essais d'usure, le modèle simple de Taylor est suffisamment représentatif, il est couramment utilisé aujourd'hui pour tous les matériaux d'outils [2].

I.5 Les efforts de coupe

Les efforts de coupe sont à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe (choix du moteur électrique). Ils servent au dimensionnement des organes de la machine-outil (boîte des vitesses et des avances, bâti) et du corps de l'outil. Ils influent sur la déformation de la pièce usinée, sur la formation du copeau, sur la précision d'usinage et sur l'usure de l'outil.

Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec une certaine force « F » dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe (figure I.29). La résultante de coupe « F » est la somme de 3 composantes suivantes :

- F_v ou F_z : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.
- F_a ou F_x : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial, en tournage, cette composante joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- F_r ou F_y : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial (effort de pénétration), n'a qu'une importance et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.

La résultante de coupe F est une diagonale de parallélépipède. Elle est égale à :

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \dots\dots\dots(I.15)$$

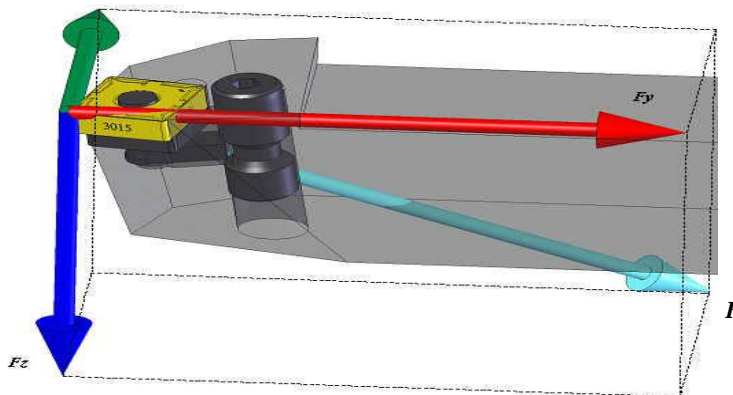


Figure I.29: Composantes de l'effort de coupe

I.6 Rugosité de la surface usinée

I.6-1 Principaux défauts de surface

L'aptitude d'une pièce à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions notamment des caractéristiques de ses états de surface. En général les défauts de surface jouent un rôle important

pour une pièce à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico-chimique. On ne s'intéresse ici qu'aux défauts géométriques, qui sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (figure I.30) [17].

- **Défauts du premier ordre** : Ce sont des défauts de forme (écart de rectitude, écarts de circularité), défaut aperiodique.
- **Défauts du deuxième ordre** : Ils sont caractérisés par une ligne ondulée à un caractère périodique du essentiellement à des vibrations de basses fréquence de la pièce et de l'outil générateur.
- **Défauts du troisième et quatrième ordre** : Ils caractérisent la rugosité de la surface, les défauts du 3^{ème} ordre sont constitués par des stries ou sillons, ce type de défaut à un caractère périodique ou pseudo périodique. Par contre les défauts du quatrième ordre sont constitués par des arrachements, fente, piqûre ... etc. Ce type de défaut a un caractère aperiodique.

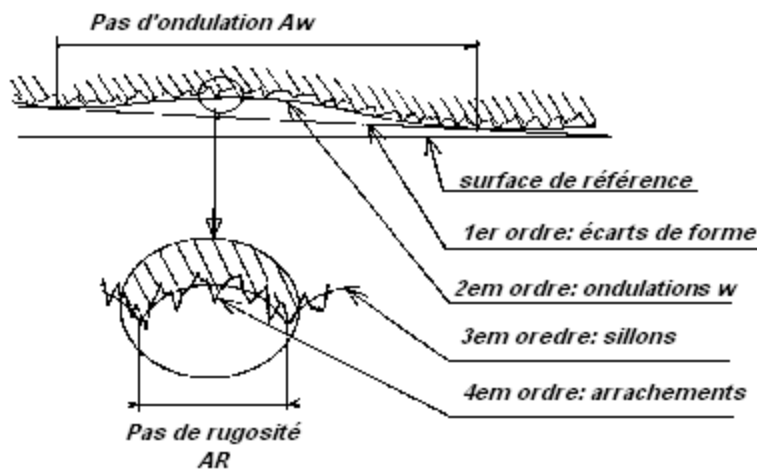


Figure I.30: Principaux défauts de surface

I.6-2 Principaux critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (figure

I.12) soit OX la ligne moyenne tel que : $\int_0^l y dx = 0$

a) Rugosité moyenne arithmétique (R_a)

Elle représente la valeur moyenne arithmétique de toutes les distances situées perpendiculairement à la médiane dans le segment mesuré (figure I.31).

$$R_a = 1/L \int_0^l |Y| dx \dots\dots\dots (I.16)$$

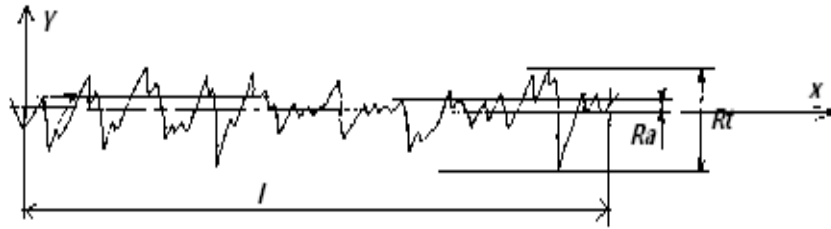


Figure I.31: Critères de rugosité R_a et R_t

La rugosité R_a peut être exprimée par la formule :

$$R_a = 0.032f^2 / r_e \dots\dots\dots (I.17)$$

Avec R_a : rugosité moyenne arithmétique ; f : avance par tour (mm/tr) ; r_e : rayon de bec de l'outil (mm).

b) Rugosité totale R_t

Elle représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil (figure I.31).

c) Rugosité R_z (hauteur des irrégularités)

Ce critère de rugosité représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas (figure I.32).

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \dots\dots\dots (I.18)$$

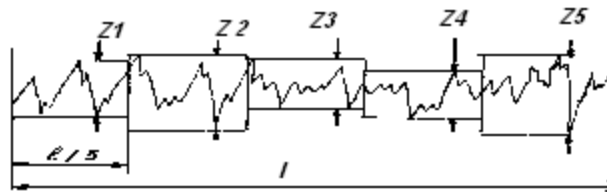


Figure I.32 : Critère de rugosité R_z

d) Rugosité maximum R_{max} : C'est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité R_{max} étant pris sur une saillie et un creux consécutif.

d) Rugosité R_p : C'est la hauteur maximale de saillie de rugosité. R_p est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

I.7 Travaux de recherches sur l'usure des outils de coupe

Diverses études ont été entreprises pour étudier le comportement du CBN et les outils céramiques lors de l'usinage dur :

E. Aslan et autres [21] ont fait une optimisation du processus de coupe lors de l'usinage de l'acier trempé AISI 4140 (63HRC) avec un outil en céramique mixte ($Al_2O_3 + TiCN$). La céramique mixte est un matériau approprié à l'usinage des aciers trempés en raison de sa dureté et sa résistance à l'usure élevée malgré son degré élevé de fragilité qui mène habituellement aux résultats contradictoires et aux échecs catastrophiques soudains. Les auteurs ont présenté une recherche expérimentale en employant la technique de Taguchi. Les effets combinés de trois paramètres de coupe, à savoir la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur deux paramètres de sortie, l'usure en dépouille (VB) et la rugosité de surface (Ra), ont été étudiés en utilisant un choix orthogonal et l'analyse de la variance (ANOVA) (Tableau I.3).

Niveau	$V_c(m/min)$	$f(mm/tr)$	$ap(mm)$
1	100	0,05	0,25
2	175	0,10	0,5
3	250	0,20	1

Tableau I. 3: Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan 3^3 [21]

Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit:

* La vitesse de coupe est le seul facteur statistiquement significatif qui a une influence sur l'usure de l'outil, (30,62% de la variation totale) suivie par la profondeur de passe avec une contribution de 18,32%. Ils ont constaté que lorsque la vitesse de coupe augmente, l'usure de l'outil diminue. Afin de réduire l'usure de l'outil, il est préférable que la vitesse de coupe soit fixée à un niveau plus élevé que 250 m/min, et que la profondeur de passe soit entre 0,25 et 0,50 mm (figures I.33).

* Seuls deux interactions, ayant statistiquement une influence significative sur la rugosité de surface V_c*f et $f*ap$ avec une contribution respectivement de 28% et 23,33% de la variation totale. Une analyse des résultats a révélé qu'afin de réduire la rugosité de surface, il faudra exercer une grande vitesse de coupe fixée à 250 m/min, opter pour une légère profondeur de passe de 0,25 mm, et utiliser une vitesse d'avance moyenne de 0,10 mm/tr (figures I.34).

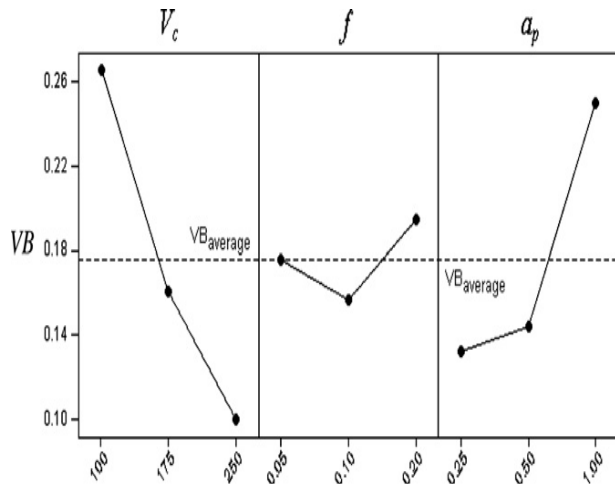


Figure I.33: Graphique des effets principaux pour VB [21]

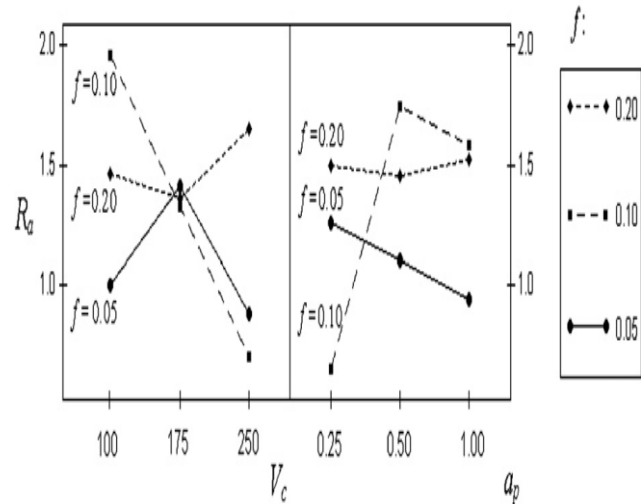


Figure I.34: Graphique des interactions pour Ra [21]

G. Mamalis¹ et autres [22] ont proposés une nouvelle équation générale de la durée de vie des outils de coupe $T = f(V_c)$. Ils ont utilisé des outils en poly-cristalline CBN qui sont largement utilisés dans le tournage de finition des pièces en construction des aciers durs (60-70 HRC) inoxydables, résistants à la chaleur et à l'oxydation. La durée de vie maximale de l'outil change d'un point haut à un autre bas en fonction des variations de la vitesse de coupe, la profondeur de passe et les valeurs de la vitesse d'avance (figure I.35 (a)).

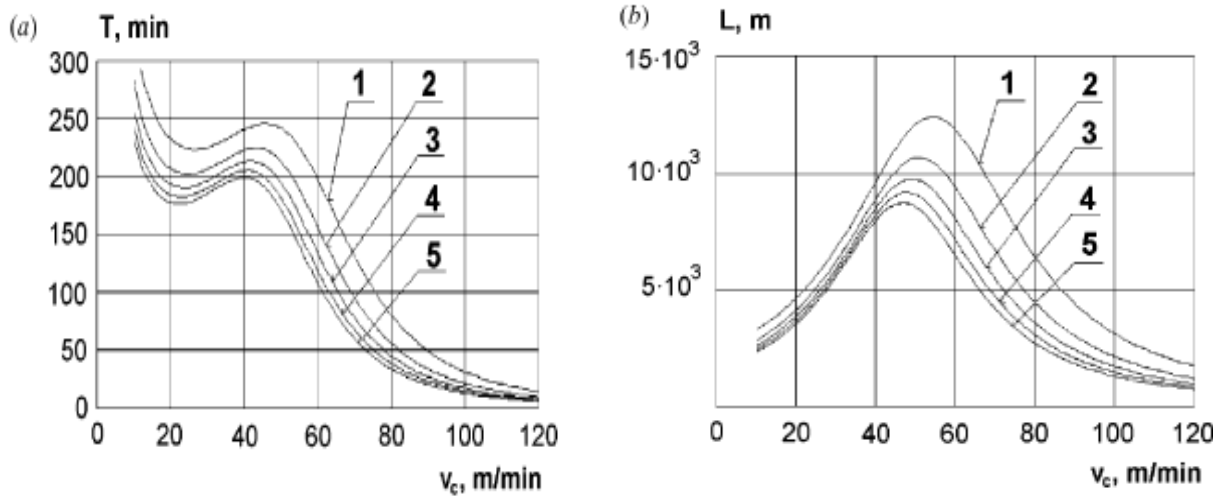


Figure I.35: la durée de vie et la longueur de coupe avec des outils en CBN
 1- a_p=0.05; 2- a_p=0.1; 3- a_p=0.15; 4- a_p=0.2; 5- a_p=0.25 (mm)
 (f=0,05mm/tr, diamètre 45 mm) [22]

Les résultats trouvés par les auteurs prouvent qu'a avec l'apparition d'outils extrêmement résistants, la possibilité d'applications d'un usinage de précision s'est considérablement élargie. Ses expériences menées et des résultats rapportés devraient nous aider à promouvoir l'application économique des outils CBN. Application d'une nouvelle équation de durée vie des outils est suggérée et ses avantages ont été représentés, c'est à dire qu'elle est valable pour l'ensemble de la vitesse de coupe, elle considère l'influence conjointe des éléments d'information technologique, et elle peut être appliquée dans la pratique.

$$T = \frac{C_{T1}}{v_c^3 + C_{T2}v_c^2 + C_{T3}v_c} \quad \dots\dots\dots(I.19)$$

C_{T1} , C_{T2} et C_{T3} dépend des conditions de coupe

$$L = Tv_c \quad \dots\dots\dots(I.20)$$

$$L = \frac{C_{T1}}{v_c^3 + C_{T2}v_c^2 + C_{T3}v_c}$$

L : longueur de coupe

$$C_{T1} = T_{23}(v_{c23}^3 + C_{T2} \cdot v_{c23}^2 + C_{T3} \cdot v_{c23})$$

$$C_{T2} = -\frac{3}{2}(v_{c12} + v_{c23})$$

$$C_{T3} = 3v_{c12}v_{c23}$$

Y. Sahin [23] a fait une comparaison de la durée de vie entre les outils en céramique et les outils en nitrure de bore cubique (CBN) lors de l'usinage de l'acier dur à roulement en utilisant la méthode de Taguchi. Ils ont utilisé un plan orthogonal L9 (3²), un ratio signal/bruit (S/N) et une analyse de la variance (ANOVA) pour déterminer l'influence des paramètres de coupe sur la durée de vie de les outils. Des modèles linéaires et exponentiels du premier ordre ont été effectuées pour trouver la corrélation entre le temps de coupe et les variables indépendantes [la vitesse de coupe (V), l'avance par tour (f) et la dureté de l'outil de coupe (TH)].

Les résultats trouvés par l'auteur ont indiqué que la vitesse de coupe V est le facteur dominant sur la durée de vie de l'outil, suivie par la dureté TH et en dernier lieu l'avance f. L'outil de coupe de CBN a montré une meilleure performance que la céramique (figure I.36).

L'analyse de variance ANOVA a indiqué que la vitesse de coupe a un grand effet significatif sur la durée de vie de l'outil avec une contribution 41.63%, suivie par la dureté de l'outil avec une contribution 32.68% et en dernier lieu l'avance avec une contribution 25.22% pour un niveau de confiance de 90%.

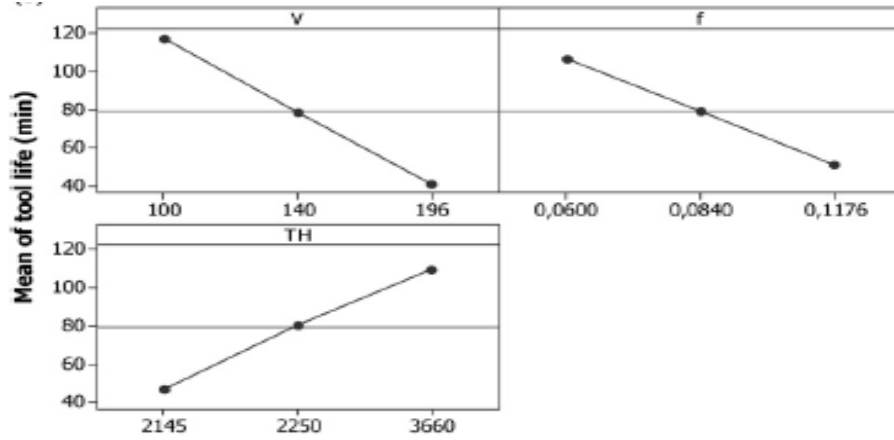


Figure I.36 : Graphique des effets principaux pour la durée de vie T [23]

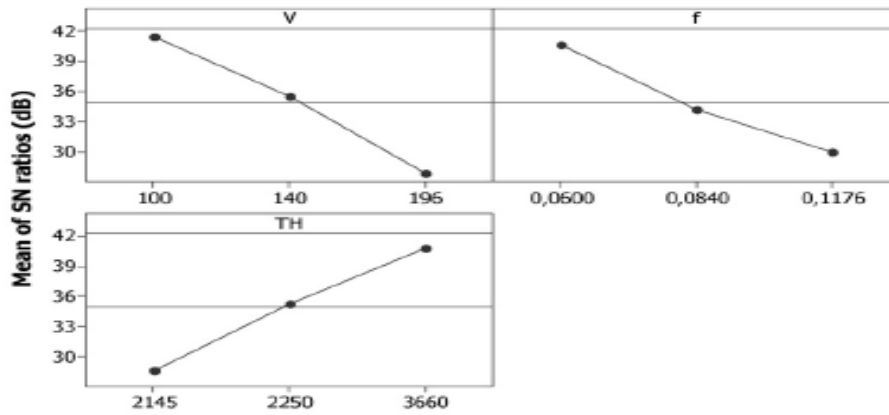


Figure I.37 : Graphique des effets principaux pour le ratio S/N [23]

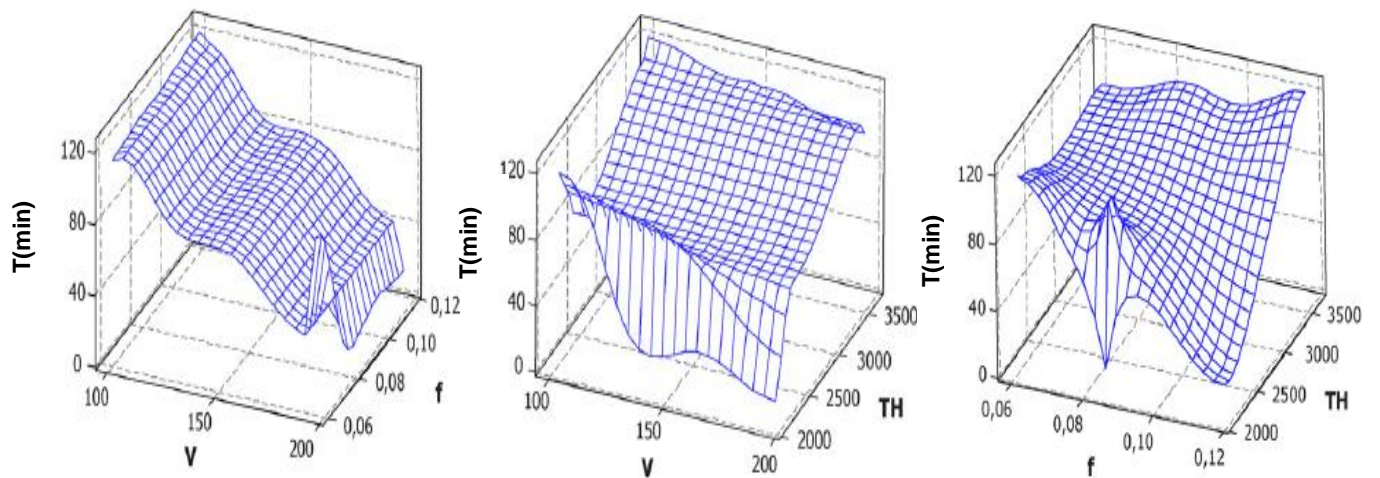


Figure I.38 : Diagramme de surface pour la durée de vie T en fonction de Vc, f et TH [23]

W. Grzesik et Z. Zalisz [24] ont identifié le phénomène d'usure des plaquettes en céramique mixte qui est principalement constituées de 70% Al_2O_3 et 29% de TiC y compris également environ 1% des particules sphériques de carbure de tungstène WC où W_2C lors des opérations du tournage dur et à sec de l'acier a une dureté de 60HRC. Ils ont pris en considération les aspects microscopiques et microstructures de l'usure des outils en céramique. Ces auteurs ont choisi pour les essais des diverses vitesses d'avance, une vitesse de coupe constante de 100 m/min et une légère profondeur de passe de 0,2 mm. Ils ont utilisés une microscopie optique (LOM), une microscopie électronique à balayage (MEB), une technique BSE et une caméra de diffraction en rayon-x (XRM) pour observer les surfaces usées de l'outil. Les mécanismes d'usure observés dans leurs essais d'usinage sont l'abrasion, la rupture, l'écoulement plastique, le transfert du matériau et les effets tribochimiques qui apparaissent en fonction des conditions mécaniques et thermiques générées sur les zones d'usure.

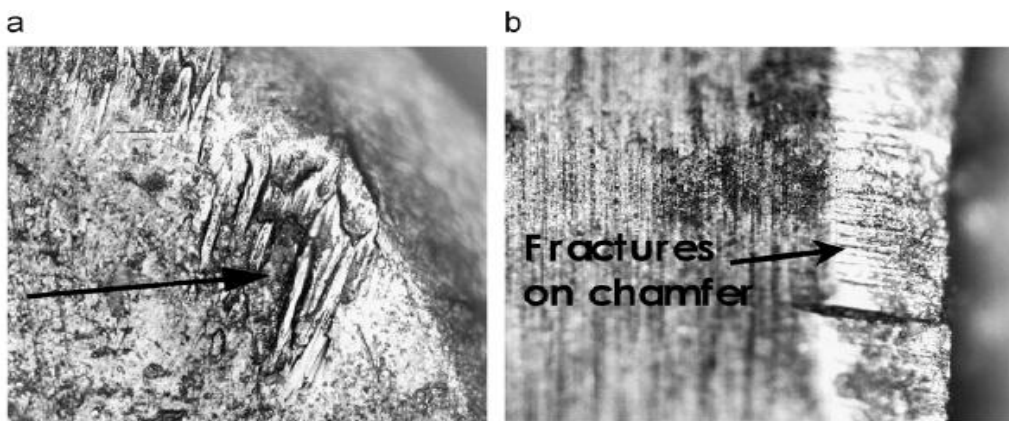


Figure I.39: l'effet de l'usure sur la face de coupe ($f=0,21$ mm/tr)
a) Début de crater b) ruptures fragiles de chanfrein [24]

Les résultats trouvés par les auteurs montrent que l'usure des faces de dépouille est principalement concentré sur la bordure d'outil et l'arrête tranchante secondaire active. Le grippage des sulfures de manganèse provoque la formation de bosselures concentrées (figure I.39).

Dans le cas des outils céramiques deux types de couche de transfert se produisent simultanément sur la face de coupe. La première bosselure compacte est localisée dans une petite région, tandis que la seconde avec une fragmentation importante et de l'allongement (figure I.39).

Tous ça est indiqué par une analyse par diffraction des rayons X approprié, le phénomène de grippage du aux sulfures de manganèse a été le début d'une agglomération de couches stables dans la zone adjacente au chanfrein. En outre, les oxydes de fer sont formés à haute température locale sur les sulfures.

D.Y. Jang et Hasio [25] ont étudié l'usure de l'outil en céramique et la performance de l'usinabilité de l'acier durci AISI M2 (60 HRC), ils ont déterminé l'usure en dépouille qui est le mode dominant d'usure sur les plaquettes. Ils ont trouvé que la profondeur de passe est le facteur le plus important qui influe sur la variation d'effort de coupe, et aussi la force de coupe accrue en raison de l'usure de l'outil

GE. D' Errico et autres [26] ont enquêté sur les performances de coupe de différentes classes de céramique (oxyde de nitrure) en termes de résistance à l'usure, résistance mécanique et la résistance aux chocs thermiques.

C. Xu et Huang, X. Ai [27] ont montré en détail l'effet de yttrium sur les propriétés mécanique et performance de l'usinage de $Al_2O_3/Ti(C, N)$ outils en céramique. Les résultats qui ont trouvés montrent que l'addition d'yttrium augmente les propriétés mécaniques du matériau de l'outil en céramique.

S.Y. Luo et autres [28] ont étudié le comportement de l'usure des outils en CBN et des outils en céramique (Al_2O_3 et TiC) lors du tournage de l'acier faiblement allier 35NCD6 [AISI 4340] avec une dureté de (35-55HRC).

Ils ont trouvé que le principal mécanisme d'usure pour les outils CBN a été montré comme une abrasion du liant du matériau du CBN par les particules dures en carbure de la pièce, alors que pour les outils en céramique, l'usure est dominée par l'adhésion et l'abrasion (figures I.40 et I.41).

En se basant sur les résultats expérimentaux, ils ont conclu que l'usure des outils en céramique et en CBN a diminué avec une augmentation de la dureté, mais aux environs de 50HRC l'usure commence à augmenter. Ce comportement est conformé à la variation de la force de coupe, qui alternativement a été inversement liée à la température de coupe.

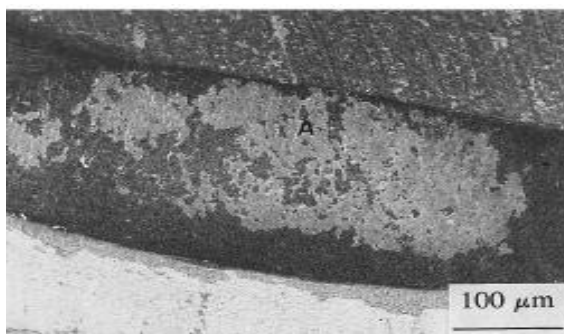


Figure I.40: L'aspect usé de l'outil en CBN lors de l'usinage de l'AISI 4340 avec une dureté de 50 HRC pour 5min

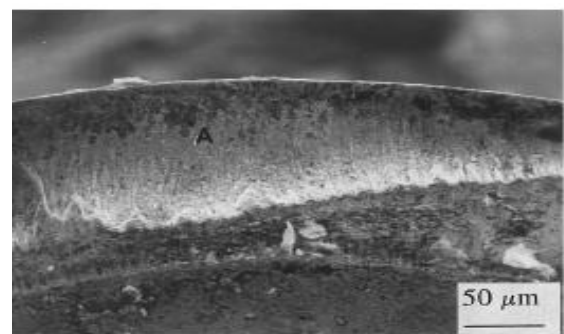


Figure I.40: L'aspect usé de l'outil en céramique lors de l'usinage de l'AISI 4340 avec une dureté de 50 HRC pour 5min

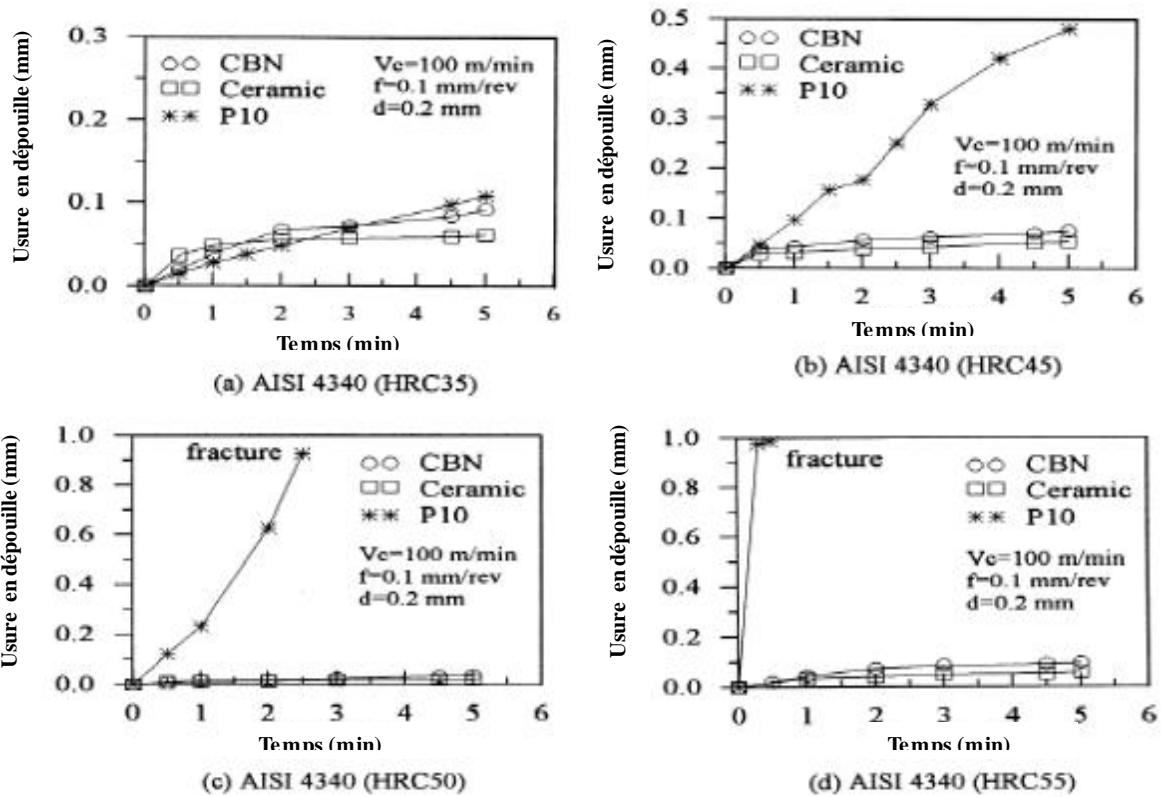


Figure I.42: Evolution de l'usure en dépouille en fonction des paramètres de coupe, de la dureté de la pièce et des matériaux de coupe [28]

H. Bouchlegem et autres [29] ont présenté dans ce travail les résultats d'une investigation expérimentale sur l'usure d'un outil en nitrure de bore cubique lors du tournage de l'acier AISI D3 traité à 60 (HRC).

En premier lieu, des essais d'usure de longue durée ont été planifiés pour élucider l'effet de la vitesse de coupe sur les différentes formes d'usure de l'outil CBN ainsi que l'étude des conséquences de l'usure sur la tenue et la productivité (figures I.43 et I.44).

Ensuite, une seconde série d'expériences a été dédiée à l'étude de l'impact de l'usure (VB) sur l'évolution de la rugosité des surfaces et sur les efforts de coupe.

Ses résultats montrent que le CBN présente une bonne résistance à l'usure malgré l'agressivité de l'acier AISI D3 (60 HRC). Au-delà de 240 m/min, le système usinant devient instable en produisant des étincelles et des vibrations importantes après quelques minutes d'usinage à cause de l'accroissement intensif du phénomène d'usure.

Malgré l'évolution de l'usure jusqu'à la valeur admissible $[VB]=0,3$ mm, la rugosité R_a n'a pas dépassé $0,85\mu\text{m}$. Au-delà de cette valeur, la rugosité subit une augmentation, mais elle reste fort acceptable ($R_a < 1.2\mu\text{m}$).

Le traitement des résultats a permis aux auteurs de déterminer d'une part des modèles mathématiques pour la prédiction de la tenue en fonction de la vitesse de coupe et d'autre part de proposer des corrélations entre la rugosité et l'usure VB sous la forme :

$$R_a = K e^{\alpha(VB)} \dots\dots\dots (I.21)$$

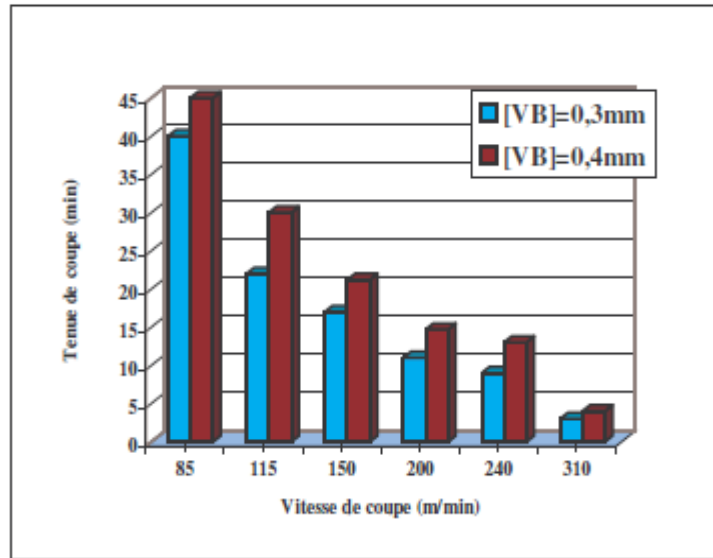


Figure I.43: Tenues expérimentales obtenues à différents vitesse de coupe du CBN [29]

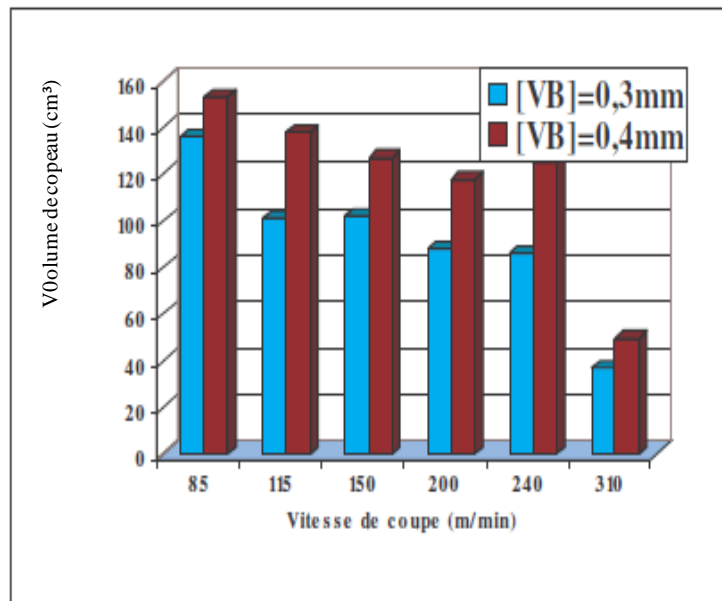


Figure I.44: Volume de copeau produit à différents vitesse de coupe du CBN [29]

J.P. Davim et L. Figueira [30] ont étudié l'influence des paramètres de coupe (V_c , f , ap) sur l'usure (VC), pression spécifique (K_s) et la rugosité de surface (R_a) lors de l'usinage de l'acier D2(AISI) qui a une dureté de 60 HRC. Le tournage dur réalisé à sec avec des outils de coupe en céramique mixte composé d'environ de (70% de Al_2O_3 et 30% de TiC).

Les auteurs ont utilisé un plan expérimental basant sur des tableaux orthogonaux avec des paramètres de coupe fixés (plan de Taguchi L27 (3^{13})). Ils ont employé une technique qui combine le tableau orthogonal et l'analyse de variance (ANOVA) avec les conditions de coupe indiquées au tableau I.4:

Niveau	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Temps de coupe (min)
1	70	0,05	0.25	5
2	150	0,10	0.5	10
3	220	0,15	1	15

Tableau I.4: Conditions de coupe [30]

Les conclusions données par les auteurs sont comme suit:

- 1- L'usure de l'outil est très influencé par la vitesse de coupe (57,4%) et dans un moindre degré par le temps de coupe (13,4%) (Tableau I.5).
- 2- L'augmentation de l'usure des outils en céramique avec des vitesses de coupe élevées mène à une diminution de la rugosité de surface.
- 3- Avec un choix approprié des paramètres de coupe, il est possible d'obtenir une rugosité de surface ($R_a < 0,8 \mu m$).
- 4- La pression de coupe spécifique est fortement influencée par l'avance par tour (64,1%) (Tableau I.6). La rugosité est influencée par le temps de coupe (32%) ensuite par l'avance (29,6%) (Tableau I.7).

Source of variance	SDQ	df ^a	Variance	F test	F 5%	P (%) ^b
A - V_c (m/min)	1.082	2	0.541	137.7	3.27	57.4
B - a (mm/rev)	0.058	2	0.029	7.3	3.27	2.7
C - t_c (min)	0.258	2	0.129	32.9	3.27	13.4
AB	0.141	4	0.035	9.0	2.64	6.7
AC	0.135	4	0.034	8.6	2.64	6.4
BC	0.061	4	0.015	3.9	2.64	2.4
Error	0.138	35	0.004	-	-	11.1
Total	1.872	53	-	-	-	100

Tableau I.5: Analyse de la variance ANOVA pour VC

Source of variance	SDQ	df ^a	Variance	F test	F 5%	P (%) ^b
A - V_c (m/min)	5578985.8	2	2789492.9	26.47	3.27	13.3
B - f (mm/rev)	26156533.5	2	13078266.8	124.11	3.27	64.1
C - t_c (min)	2411201.5	2	1205600.8	11.44	3.27	5.4
AB	1166866.2	4	291716.6	2.77	2.64	1.8
AC	1004349.7	4	251087.4	2.38	2.64	1.4
BC	453151.1	4	113287.8	1.08	2.64	0.1
Error	3688068.9	35	105373.4	-	-	13.9
Total	40459156.7	53	-	-	-	100

Tableau I.6: Analyse de la variance ANOVA pour K_s

Source of variance	SDQ	df ^a	Variance	F test	F 5%	P (%) ^b
A - V_c (m/min)	0.656	2	0.328	22.0	3.27	9.9
B - f (mm/rev)	1.906	2	0.953	64.1	3.27	29.6
C - t_c (min)	2.053	2	1.026	69.0	3.27	32.0
AB	0.477	4	0.119	8.0	2.64	6.6
AC	0.648	4	0.162	10.9	2.64	9.3
BC	0.071	4	0.018	1.2	2.64	0.2
Error	0.521	35	0.015	-	-	12.5
Total	6.331	53	-	-	-	100

Tableau I.7: Analyse de la variance ANOVA pour Ra

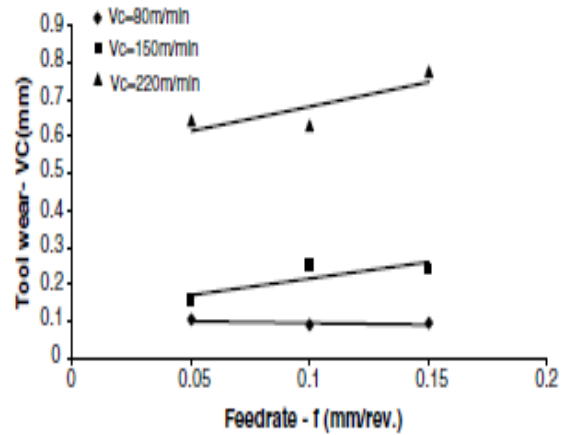
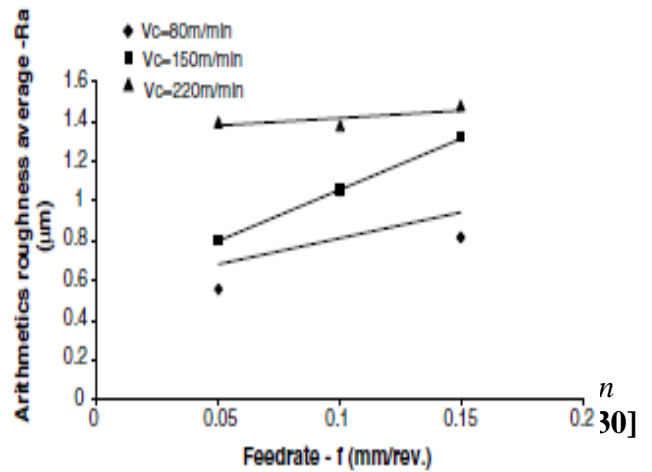
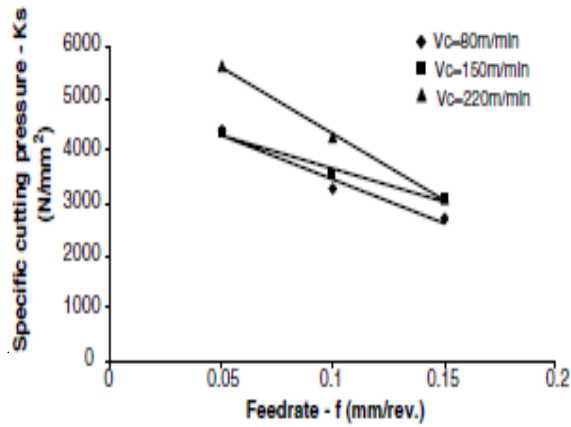
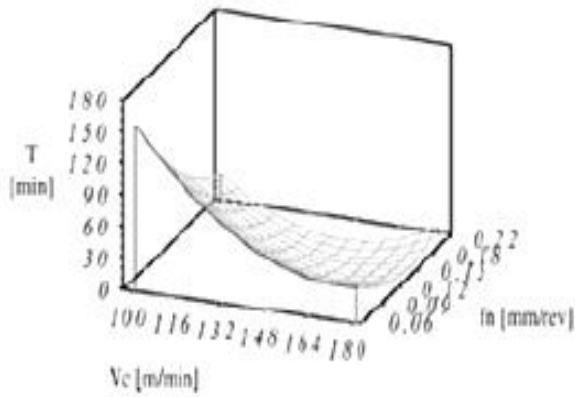


Figure 1.45: Evolution de l'usure VC en fonction de l'avance pour les trois vitesses [30]

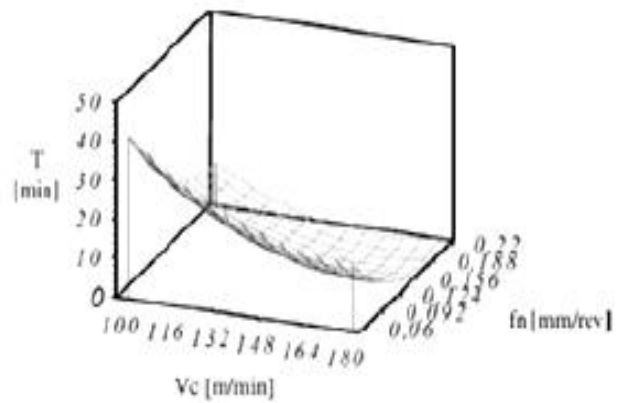


G. C. Benga et autres [31] ont étudié l'usinabilité de l'acier à roulement 100Cr6 (62 à 64HRC) pendant le tournage dur continu et sec, avec des matériaux de coupe différentes, céramique mixte, céramique renforcée dénommée Whiskers et nitrure de bore cubique.

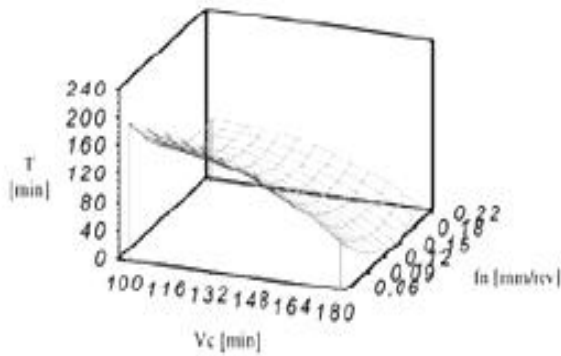
La méthode multifactorielle est utilisée et les conditions de coupe utilisées sont comme suit : vitesse de coupe de (70 à 210) m/min et l'avance de (0,08 à 0,28) mm/tr.



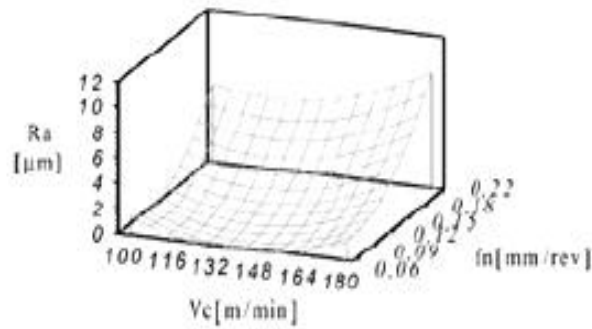
Surface de réponse de la durée de vie en fonction de Vc et f pour CC650



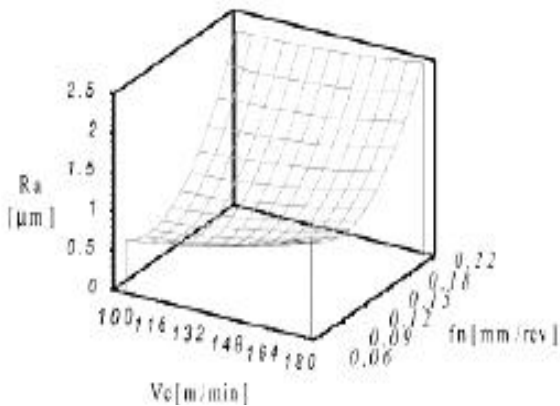
Surface de réponse de la durée de vie en fonction de Vc et f pour CC670



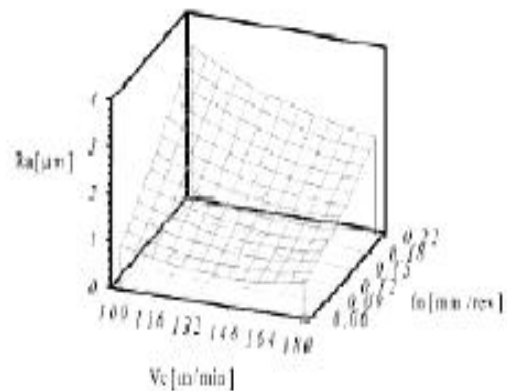
Surface de réponse de la durée de vie en fonction de Vc et f pour CB5020



Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de Vc et f pour CC650



Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de Vc et f pour CC670



Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de Vc et f pour CB7020

Figure I.48: Evolution de la rugosité et la durée de vie en fonction des paramètres de coupe et du matériau de coupe [31]

La durée de vie et l'état de la surface ont été évalués. Ils ont trouvés à la base des résultats expérimentaux que :

- ✓ Les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'outil de PCBN, suivi par la céramique mixte et en dernier par la céramique renforcée dénommée Whiskers.

- ✓ Les graphiques de surface pour la rugosité montrent que l'avance est le facteur le plus influent, alors que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur la durée de vie (pour tous les matériaux d'outil de coupe utilisés) (figure I.48);
- ✓ Les outils de coupe de PCBN fournissent une plus longue durée de vie que la céramique, lors de tournage de l'acier à roulement 100Cr6, pour une gamme de vitesse de coupe entre 100 et 180m/min et l'avance entre 0,06 et 0,22mm/tr.

A. Kumar et autres [32] ont étudié l'évolution de l'usure et la durée de vie d'un outil en céramique mixte à base d'alumine lors de l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC. Les auteurs ont élaboré des modèles de durée de vie de l'outil en fonction de l'usure.

Ils ont conclu que l'usure en dépouille affecte la durée de vie de l'outil à des faibles vitesses de coupe, cependant, l'usure en cratère ou l'usure d'entaille affecte la durée de vie aux vitesses élevées, au-dessus de 200 m/min (figure I.49).

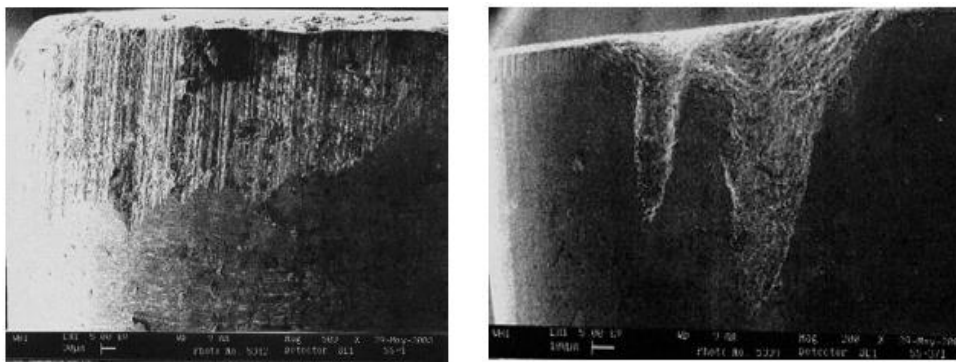


Figure I.49 : L'usure en dépouille d'une céramique mixte à base d'alumine lors l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC [32].

E. Aslan [33] a exploré les performances et le comportement d'usure de différents outils de coupe dans le fraisage de finition de l'acier d'outil pour travail à froid X210Cr12 durci à 62HRC.

Le but de ces expériences est l'étude de l'usure d'un carbure de tungstène revêtu TiCN, un carbure de tungstène revêtu TiCN+TiAlN, un cermet revêtu TiAlN, une céramique mixte avec l' $Al_2O_3 + TiCN$ et des outils en CBN.

Les résultats ont indiqué que l'outil CBN donne une meilleure performance de coupe en termes d'usure en dépouille et d'état de surface. Le volume d'enlèvement du métal le plus élevé a été obtenu avec l'outil CBN (figure I.50).

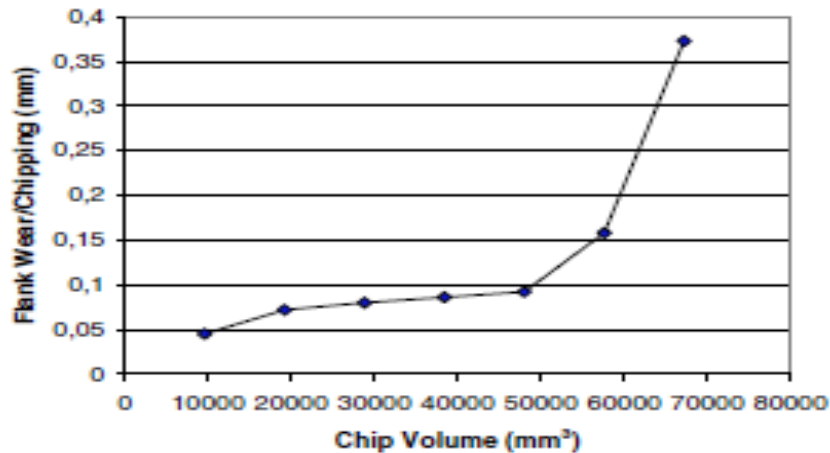


Figure I.50: Progression de l'usure en dépouille avec l'augmentation du volume de copeau enlevé avec un outil en CBN [33].

J S. Dureja et autres [34] et autres ont étudié la modélisation de l'usure de l'outil et la rugosité de surface, par la méthodologie de surface de réponse (RMS) lors du tournage dur de l'acier AISI H11 avec des plaquettes céramiques mixte revêtue de TiN.

L'effet des paramètres de coupe c-à-d la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce sur les facteurs de réponse, tels que : l'usure en dépouille et la rugosité de surface, ont été étudiés par l'analyse de la variance (ANOVA).

Ils ont trouvé que l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce ont un impact statistiquement significatif sur l'usure en dépouille (figures I.51 et I.52), tandis que l'avance et la dureté de la pièce sont les facteurs qui ont un effet significatif sur la rugosité de surface (figures I.53 et I.54). L'usure de l'outil a été observée par un microscope, et la caractérisation d'usure de certaines des plaquettes représentatives a été effectuée par un microscope électronique à balayage et une analyse par rayon X (MEB-DEX).

L'outil semble être usé par l'abrasion, l'usure en entaille, et l'écaillage de la surface d'outil dû au frittage et l'impact des particules dures dans le matériau de coupe sont les conséquences d'une usure d'adhésion.

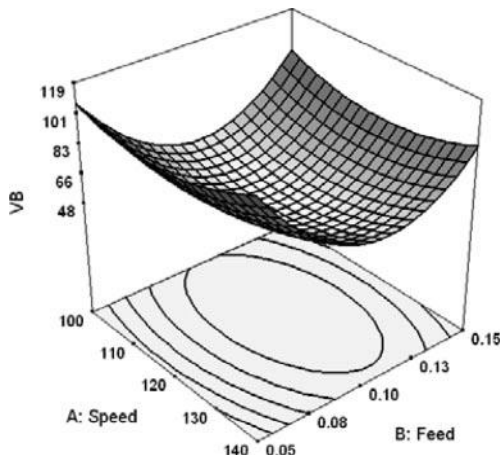


Figure I.51: Surface de réponse de l'usure VB en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance pour (profondeur de passe 0.14mm, dureté de la pièce 47 HRC) [34].

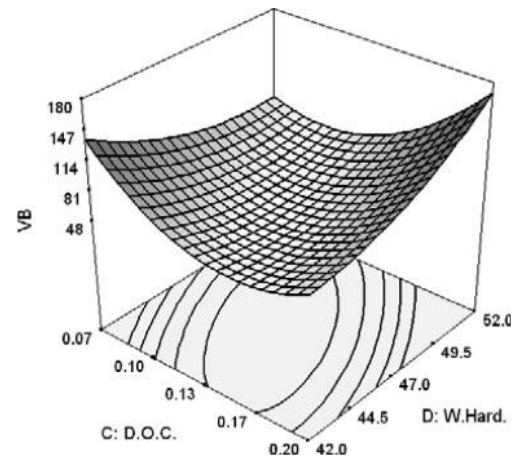


Figure I.52: Surface de réponse de l'usure VB en fonction de la profondeur de passe et de la dureté de la pièce pour ($V=200\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/tr}$) [34].

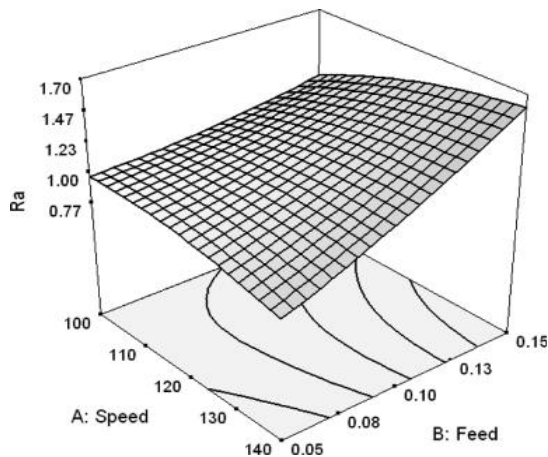


Figure I.53: Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance pour (profondeur de passe 0.14mm, dureté de la pièce 47 HRC) [34].

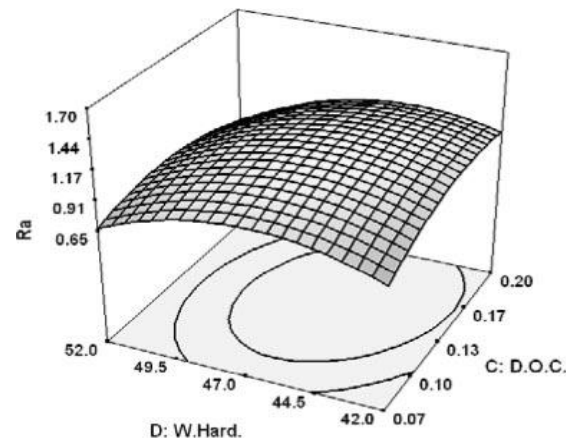


Figure I.54: Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de la profondeur de passe et de la dureté de la pièce pour ($V=200\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/tr}$) [34].

M.A Yallese et autres [35] ont étudié l'effet des paramètres de coupe sur l'usure des outils de coupe en céramique mixte CC650 et le CBN7020 lors du tournage dur de l'acier X200Cr12 qui a une résistance élevée à l'usure avec de diverses vitesses de coupe. Les résultats indiquent que l'envergure de comparaison pour les deux matériaux d'outil est limitée à une vitesse de 180m/min auquel un effondrement catastrophique de l'arête de coupe en céramique a été enregistré. Pour le CBN, le ratio de la durée de vie d'outil a monté de 4,37 à 17,14 lorsque la vitesse de coupe évolué de 90 à 180m/min.

ils ont proposé une corrélation entre la rugosité de surface et l'usure de l'outil. Leur analyse a également indiqué cela, sous la limite admissible d'usure, l'outil en céramique a donné des surfaces de qualité avec une rugosité plus élevée que l'outil en CBN.

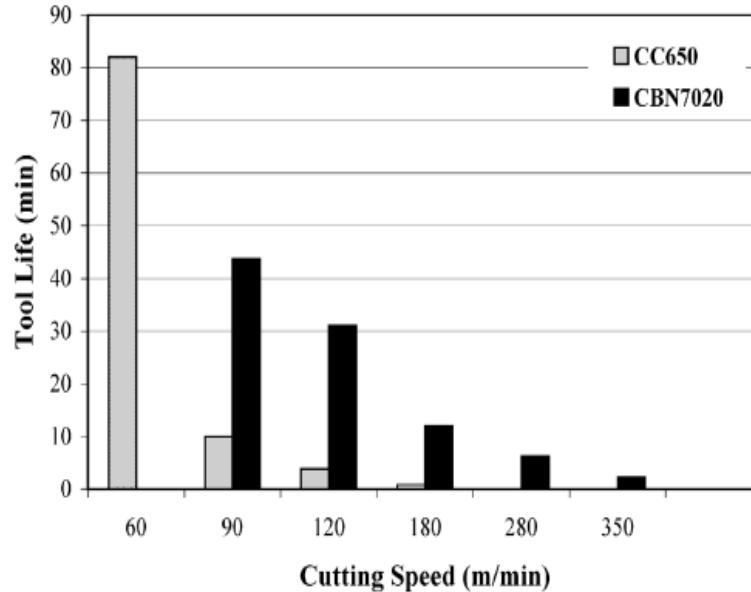


Figure I.55: la durée de vie de CC650 et CBN7020 pour les différentes vitesses de coupe [35]

Leur étude comparative a établi des variations des performances entre les deux outils CC650 et CBN7020 en terme usure, durée de vie, rugosité et productivité sous les mêmes conditions.

Les conclusions tirées par les auteurs sont comme suit:

- 1- La valeur optimale de la vitesse de coupe est de 120 m/min pour l'usinage de l'acier X200Cr12 en utilisant CBN7020, tandis que 60 m/min pour la céramique CC650 (figure I.55).
- 2- Les deux matériaux d'outils CC650 et CBN7020 présentent les caractéristiques d'usure communément assumé d'être due à la composition chimique et les propriétés physiques et mécaniques. Par conséquent, le meilleur comportement d'outil est donné avec le CBN en termes de tenue comparé à la céramique mixte CC650.
- 3- La dureté élevée de l'acier X200Cr12 (60HRC) limite l'utilisation de céramique mixte à des vitesses de coupe au dessous de 120 m/min à cause d'une part des risques de rupture et d'une durée de vie plus courte, d'autre part CBN supporte les vitesses de coupe les plus élevées et fourni aussi une très bonne qualité de surface des parties usinées. A des vitesses de coupe plus élevées le CBN mène un temps d'usinage plus court et une meilleure production. En dépit de cela, la céramique mixte CC650 reste une alternative très intéressante au CBN7020 à chaque fois la production concerne des petites séries.

4- Durant l'usinage dur de l'acier X200Cr12, un taux de chaleur considérable est généré et globalement dissipé avec les copeaux formés. De telles conditions diminuent la dilatation de la pièce et évite les effets thermiques indésirables.

5- L'usure associée de CBN7020 et la céramique mixte influence les valeurs de la rugosité de surface. L'usure d'outil augmente avec l'accroissement de la vitesse de coupe et mène directement à la dégradation de la qualité de surface. Dans ces conditions en dessous de la limite admissible de l'usure [VB], la moyenne de la rugosité Ra n'a pas excédé le 1µm (figure I.56 et I.57).

6- A une vitesse de coupe donnée, l'usure d'outil de coupe est fortement liée à la rugosité superficielle de la pièce. En mettant en relation les paramètres ci-dessus, ils semblent qu'une expression de la formule $R_a = K(VB)^\eta$ est mieux adaptée pour traduire une telle dépendance. Les k et η variés parmi les marges 0,92-1,86 et 0,35-0,85 respectivement pour la céramique CC650, et les variations étaient 1,60-3,53 et 0,56-0,63 respectivement pour le CBN7020.

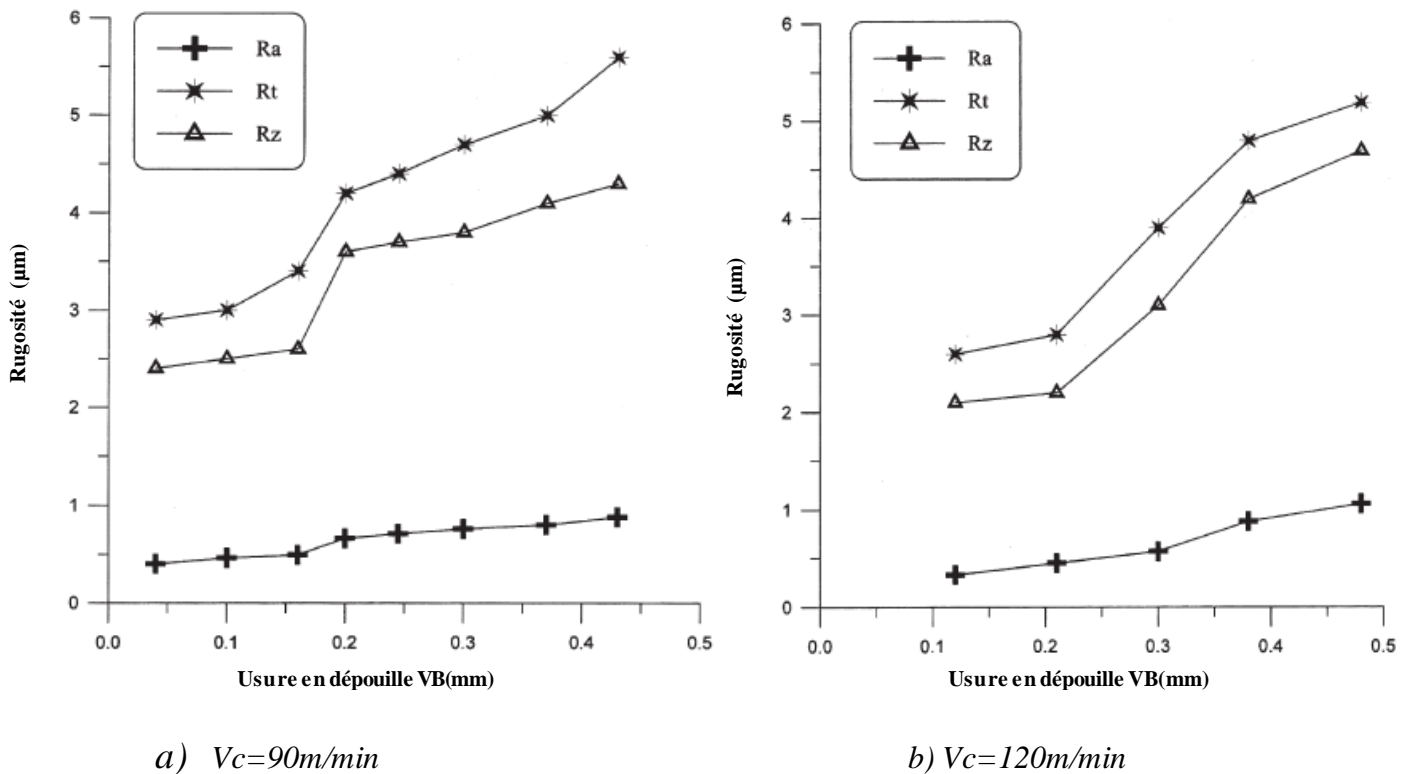


Figure II.56 : Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille pour la céramique CC6050 à deux vitesses de coupe $V_c=90\text{m/min}$ et $V_c=120\text{m/min}$ [35].

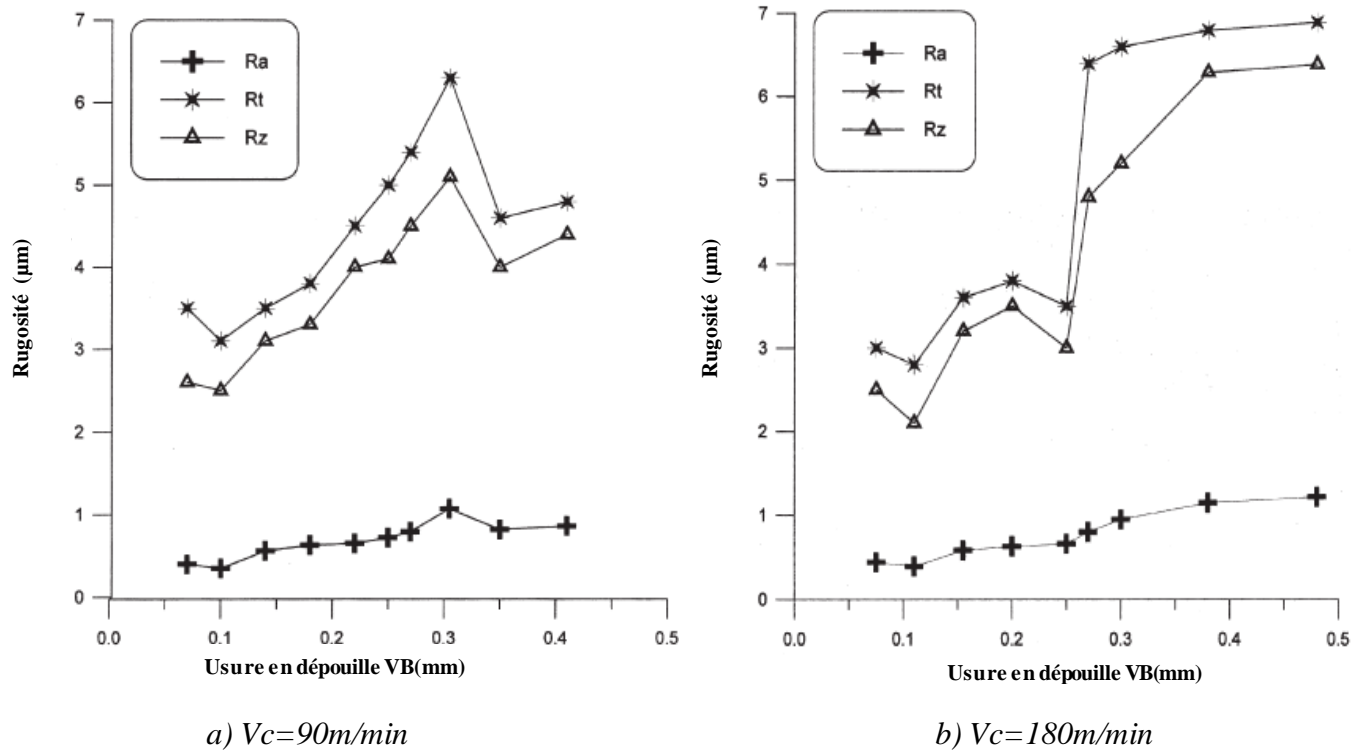


Figure II.57 : Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille pour le CBN 7020 à deux vitesses de coupe $V_c=90\text{m/min}$ et $V_c=180\text{m/min}$ [35]

I.8 Conclusion

Le premier chapitre a été réservé à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux.

La définition du tournage dur, la recherche en tournage dur, les matériaux usinés et usinants, les efforts, la rugosité, l'usure et ses modèles ont été définis.

La fin du chapitre débouche sur un résumé de plusieurs publications sur les travaux de recherche en tournage dur et particulièrement l'usure des outils de coupe.

Chapitre II

Procédure expérimentale et planification des expériences

II.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des outils et équipements mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le souci d'étudier l'usure et la durée de vie des outils de coupe en céramique. Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés qui servent au suivi de l'évolution de la rugosité des surfaces obtenues, des efforts de coupe générés, de l'usure. Nous présentons également la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences nécessaires à notre étude ont été effectuées au laboratoire de *Mécanique et Structures* (LMS) et au département de génie mécanique (Université 08 Mai 1945 de Guelma).

II.2 Equipements utilisés

II.2- 1 Machine outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un tour à charioter et à fileter, modèle SN40C (figure II.1). Il est équipé d'un moteur électrique de puissance 6,6KW, les fréquences disponibles sur la machine sont (45, 63; 90, 125, 180, 250, 355, 500,710; 1000; 1400, 2000) tr/min et les avances sont: (0.08; 0.9, 0.11; 0.12; 0.14; 0.16, 0.18, 0.20; 0.22, 0.24 ...0.8) mm/tr.



Figure II.1: Tour à charioter et à fileter modèle SN40C

II.2- 2 Outil de coupe utilisé

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé un porte outil sur lequel on fixe les plaquettes mécaniquement par trou central. La géométrie du porte outil est donnée dans le tableau II.1 et la plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte outil. Une cale-support en carbure métallique vissé et rectifiée, protège le porte outil et garantit un contact parfait de la plaquette (figure II.2).

Porte outil	Section (mm ²)	χr°	α°	γ°	λ°
PSBNR2525K12	25*25	75°	6°	-6°	-6°

Tableau II.1: Caractéristiques géométriques de porte outil



Figure II.2: Porte outil utilisé

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée à fixation par trou centrale. Elles sont de marque Sandvik et de désignation SNGA120408T01525S avec une composition chimique de : (70% Al_2O_3 + 30% TiC) et avec revêtement en TiN (figure II.3). Ces plaquettes possèdent une meilleure ténacité et une bonne conductivité thermique.

Toutes les informations relatives à ces plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau II-2.

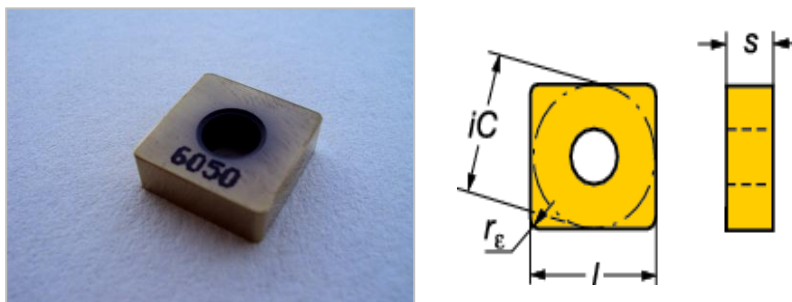


Figure II.3: Plaquette Céramique CC6050

Matériau de coupe	Désignation firme	Désignation ISO	Firme	Composition	Epaisseur de revêtement	Rayon r_c
Céramique mixte revêtue	CC6050	SNGA120408T01525S	Sandvik	70 % Al_2O_3 + 30 % TiC + revêtement en TiN	Fin	0,8mm

Tableau II.2: Informations relatives à la plaquette de coupe

II.2- 3 Matériau à usiner

Les opérations de chariotage relatives aux essais d'usure ont été effectuées sur des éprouvettes rondes en acier traité de nuance **X210Cr12**, de diamètre 94 mm et de longueur 87 mm, 131mm et 276 mm. Grâce à sa résistance élevée à l'usure, l'acier **X210Cr12** (afnor Z200Cr12) connu aussi sous la dénomination d'AISI D3 est un acier à outil à haute teneur en chrome présentant le minimum de risques de déformation et d'altération des dimensions aux traitements thermiques. Il a une excellente tenue à l'usure (haute résistance à l'usure), utilisé pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filière d'étrépage, galets profileurs, mollettes, outils à bois peigne à rouler les filets [34].

Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suit :

1. Densité : $7.7g/cm^3$.
2. Module d'élasticité: 21.10 MPA.
3. Conductibilité thermique: $20 W/m.C^\circ$.
4. Coefficient moyen de dilatation en $m/m^\circ C$:
 - entre $20^\circ C$ et $100^\circ C$: $10,5 \times 10^{-6}$
 - entre $20^\circ C$ et $300^\circ C$: $11,0 \times 10^{-6}$
 - entre $20^\circ C$ et $500^\circ C$: $12,0 \times 10^{-6}$

Sa composition chimique est donnée comme suit:

Elément	C	Mn	Si	P	S	Cu	Mo	Ni	Cr
%	2	0,29	0,31	0,011	0,009	0,162	0,124	0,259	12,00

Tableau II.3: Composition chimique de l'acier X210Cr12.



Figure II.4: Eprouvettes utilisées

Pour le traitement thermique des éprouvettes, nous avons réalisé une trempe suivie d'un revenu, ce qui a augmenté la dureté des éprouvettes à 54 HRC (tableau II.4)

Acier	Dureté avant traitement	Dureté après traitement	Traitement thermique		Temps de maintien
			Trempe	Revenu	
X210Cr12	27 HRC	54 HRC	960°C	510°C	60 minutes

Tableau II.4: Conditions de traitement thermique

La figure II.5 présente le diagramme de revenu de l'acier X210Cr12 établi par le fabricant [BÖHLER].

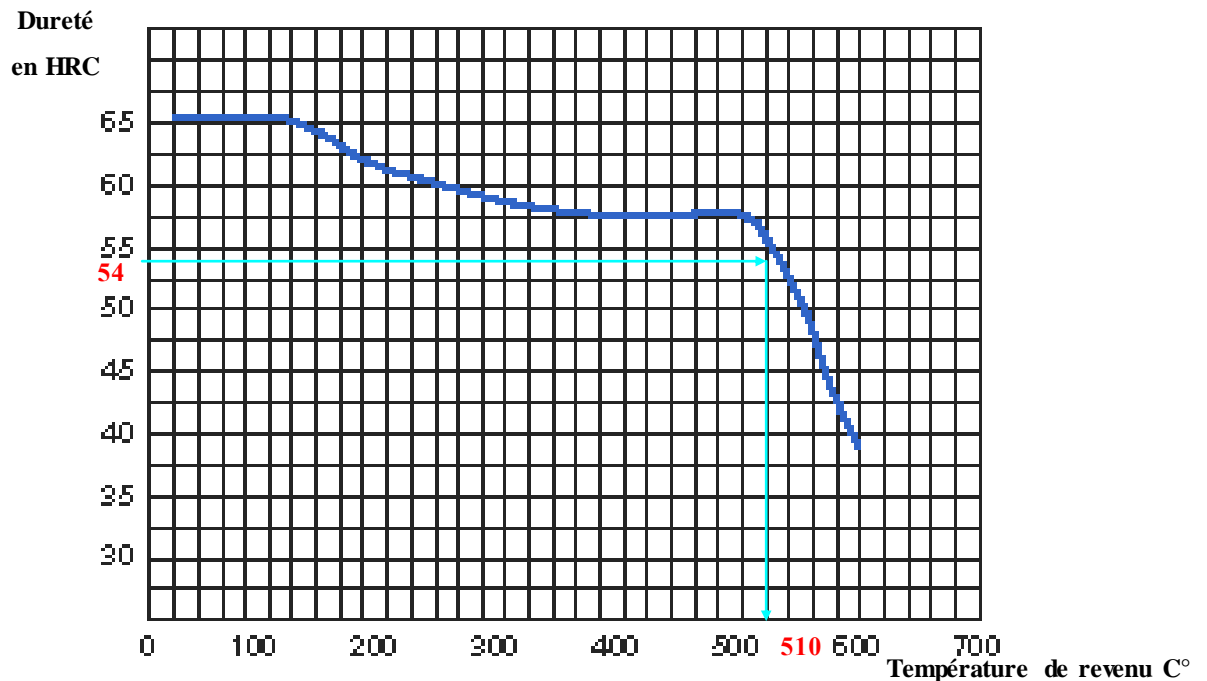


Figure II.5: Diagramme de revenu

Les traitements thermiques des éprouvettes ont été réalisés dans un four électrique pour atelier de production (figure II.6 a). Les caractéristiques de ce four sont citées dans le tableau II.5.

Marque	Dimensions (mm)			Puissance (KW)	T° max
	Largeur (b)	Longueur (L)	Hauteur (h)		
C100S	400	600	430	14	1200°C

Tableau II.5: Caractéristiques du four électrique



Figure II.6: Four à chambre électrique pour le traitement thermique des éprouvettes.

Les opérations de traitement thermique des éprouvettes sont représentées dans la figure II.7 ((a), (b) et (c)).



(a) Chauffage des éprouvettes

(b) Transport de la pièce

(c) Trempe à l'huile

Figure II.7: ((a), (b) et (c)) Opération de traitement thermique

II.3 Appareillages de mesure utilisés

II.3 -1 Microscope pour la mesure de l'usure

On a fait intervenir un microscope optique type **Hind (WAD)** (Figure II.8 a), qui nous donne la possibilité de mesurer les grandeurs d'usure sur la surface en dépouille principale et la surface en dépouille auxiliaire et la largeur du cratère. Pour cela la plaquette doit être placée sous l'objectif du microscope sur une table à mouvement croisé, on la translate suivant deux axes, ce qui nous permet de positionner cette dernière par rapport au repère de mesure du microscope. Le microscope est équipé de deux tambours ayant une précision de 0,001 mm.

La manœuvre de la vis ainsi que celle des jauges micro- métrique à lecture directe sur le tambour du microscope, permet une localisation préalable de la surface de la plaquette à contrôler dans les champs de vision de l'oculaire. Sa source lumineuse émet un faisceau de lumière à l'égard de la surface concernée. Les rayons réfléchis passant à travers l'objectif, empruntent en suite le système optique puis, sortent de l'oculaire pour donner ainsi une image claire en ajustant la distance focale du microscope à l'aide de la vis. C'est ainsi que la mesure des différents paramètres d'usure s'effectue.

Pour ce fait, on coïncide l'arête tranchante principale de la plaquette avec la ligne horizontale du repère puis, on fait une première lecture, soit (L_0), et après on déplace la plaquette à l'aide du tambour jusqu'au moment où la coïncidence de la limite supérieure de la bande d'usure avec la ligne horizontale du repère est faite, à cette position là, on fait une deuxième lecture, soit (L_1). L'écart entre (L_0) et (L_1) nous donne également l'usure à relever.



*Figure II.8 : (a) Microscope de mesure de l'usure frontale.
(b) Stéréo- microscope pour prendre les photos de l'usure.*

II.3- 2 Mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne (Plateforme KISTLER modèle 9257 B, figure II.9), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des efforts de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments qui sont :

1. La plateforme.
2. L'amplificateur de signaux.
3. Le PC avec logiciel, et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce où l'outil reste fixé. Ce dernier est montré sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz à trois éléments, qui sont assemblés sous hautes précontraintes, formant un dynamomètre qui peut mesurer trois composantes en même temps. Les efforts agissants sur cette plaque lors de la coupe sont convertis en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.

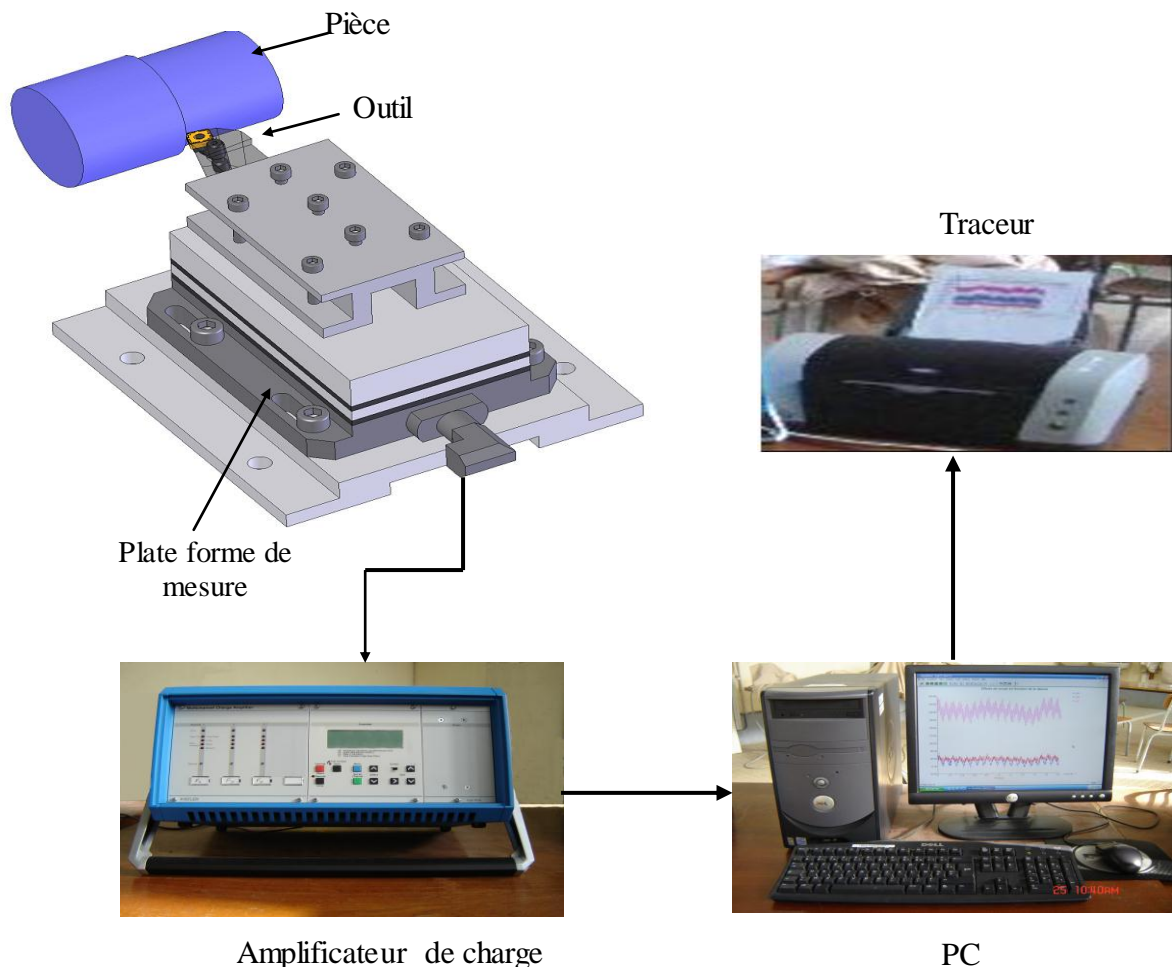


Figure II.9: Plateforme Kistler avec interface pour la mesure des efforts de coupe

II.3- 3 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) Surfrest 301 (Mitutoyo) avec une résolution de $0,1\mu\text{m}$ (figure II.10.b). Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur) avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation est de 4 mm avec une longueur de base de 0.8mm (0.8×5).

La plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à $40 \mu\text{m}$) pour R_a et de (0.3 à $160\mu\text{m}$) pour R_t et R_z . Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (figure II.10 a). Le rugosimètre a été étalonné avant chaque campagne d'essais sur un étalon de caractéristiques: R_a égale à $3,2\mu\text{m}$.

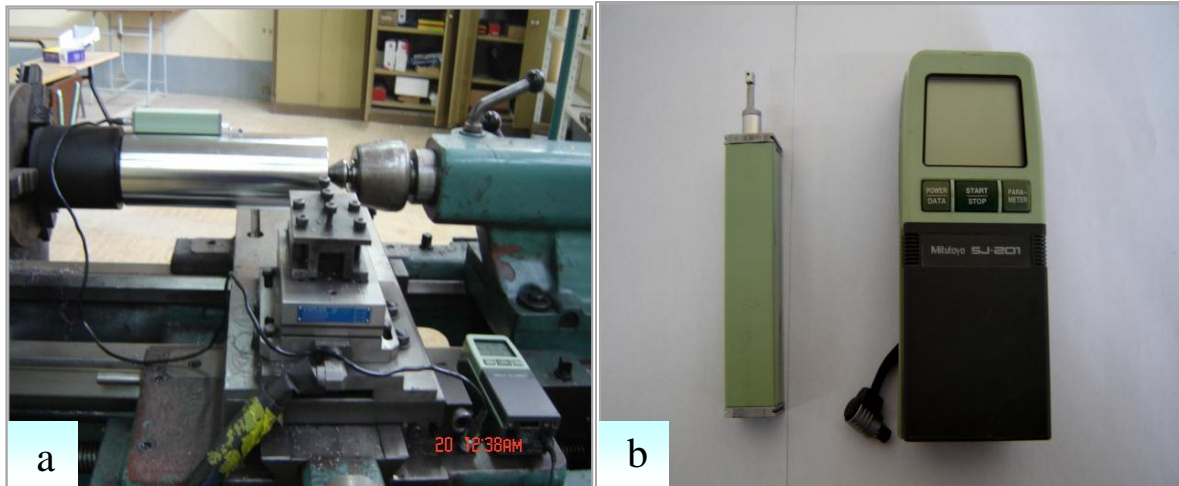


Figure II.10 : Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.

II.3- 4 Autres équipements

- Un chronomètre pour l'enregistrement du temps de coupe ;
- Un appareil d'essais de dureté pour mesurer la dureté de la pièce ;
- Le pied à coulisse pour mesurer les différentes dimensions de la pièce concernée ;
- Un appareil photo numérique pour prendre des photos.

II.4 Planification des expériences

II.4-1: Introduction

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer, les éléments du régime de coupe (V_c , a_p , f), la géométrie de la partie active de l'outil (r , λ , β , γ , ϵ ...etc), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine, lubrification ...etc). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, les efforts, la rugosité

et la température de coupe, représentent les paramètres de sortie. Dans notre étude, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution des paramètres suivant :

- 1- Evolution de l'usure des outils en céramique mixte (CC6050) en fonction du temps.
- 2- Evolution de la durée de vie
 - a- Effet de la vitesse de coupe
 - b- Effet de l'avance
- 3- Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de l'usure en dépouille VB.
- 4- Evolution de la rugosité de surface usinée en fonction du temps d'usinage et de l'usure en dépouille VB.

II.4-2 Méthodologie de recherche

Un très grand nombre de facteurs agit sur l'usinabilité d'un matériau, tels que les paramètres du régime de coupe (V_c , a_p , f), la géométrie de l'outil (α , β , γ , ϵ , χ , ..., etc.), les caractéristiques du matériau usiné (dureté, R_r , %C, % des éléments d'addition, etc.) et les conditions de travail, etc. Ces facteurs représentent les paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, l'usure, la précision, les efforts, etc., représentent les paramètres de sortie [8].

II.4-3 Méthode de planification des expériences

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f , a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (Usure, rugosité et efforts de coupe), avec un volume de copeau constant $V=98 \text{ cm}^3$. Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

$$N = q^k \dots\dots\dots (II.1)$$

Où:

- N: nombre d'essais ;
- q: nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;
- k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)).

Nous avons alors: $N=3^3 =27$.

Les essais sont numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II.6.

N° d'essai	Facteurs		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

Tableau II.6 Matrice de planification pour un plan 3³ [8]

L'expérimentateur, quel que soit son domaine d'étude, est toujours confronté au problème difficile de l'organisation optimale de ses essais. Comment obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ?

L'utilisation des plans d'expériences, et en particulier les tables orthogonales de Taguchi, a permis la détermination de l'influence des effets simultanés et de l'interaction des paramètres opératoires sur l'usure, les efforts de coupe et la rugosité.

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats.

Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats [8].

Dans cette recherche, la table orthogonale standard L27 (3^3) de Taguchi est adoptée comme plan expérimentale (tableau II.7). Les niveaux de paramètre ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company).

Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau II.9. La table orthogonale standard L27 (3^3) de Taguchi a 27 lignes correspondant au nombre d'essais et 13 colonnes à trois niveaux. Les facteurs et leurs interactions sont assignés aux colonnes.

En effet, la première colonne de la table a été assignée à la vitesse de coupe (V_c), la seconde à l'avance (f) et la cinquième à la profondeur de passe (ap).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
01	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
03	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
04	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
05	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
06	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
07	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
08	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
09	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Tableau II.7 : Plan d'expériences (table orthogonale de Taguchi (L27 (3^3))) [36].

II.5 Conditions de coupe

Les essais de chariotage sont effectués sur un acier traité de nuance X210Cr12, par un matériau à outil en Céramique mixte revêtu CC6050, tout en gardant un volume de copeau usiné constant.

À la fin de chaque opération d'usinage, on mesure: $VB, VC, VB_{max}, VN, Ra, Rt, Rz, Fx, Fy$ et Fz . Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage). La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification sous les conditions de coupe indiquées dans les tableaux II.8 et II.9:

- Essai de courte durée tableau II.8
- Essai de longue durée tableau II.9

Niveau	Vitesse de coupe V_c (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de coupe a_p (mm)	Volume de copeau Q (cm ³)
1	106	0,08	0,25	97
2	150	0,12	0,50	97
3	215	0,16	0,75	97

Tableau II.8: Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan 3³

Paramètre constant	valeur	Les paramètres variables	valeurs
a_p (mm)	0,2	V_c (m/min)	80; 110 ;140
		f (mm/tr)	0,08; 0,11; 0,14

Tableau II.9: Conditions de coupe pour les essais d'usure et de la rugosité et des efforts de coupe en fonction du temps (essai longue durée).

II. 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé (machine-outil, éprouvettes, four à chambre électrique, plaquette de coupe, porte-outil, dynamomètre, microscope optique, Plateforme KISTLER et rugosimètre). La planification des expériences et les conditions de coupe ont été établies.

Chapitre III

Usure de la céramique CC6050 et évaluation de la durée de vie

III.1 Introduction

La connaissance des mécanismes d'usure 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 à cause de l'usure, modifie les conditions d'usinage et par conséquent influe sur la qualité de coupe. Dans ce chapitre nous présentons les différentes formes d'usure de la céramique mixte revêtue CC6050, les efforts de coupe et les rugosités en fonction des conditions de coupe (temps d'usinage, avance par tour et vitesse de coupe) lors du tournage de l'acier X210Cr12 traités à 54 HRC. Nous présentons aussi les résultats de l'effet de l'usure VB sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe et de la rugosité des surfaces. Nous proposons aussi des modèles mathématiques pour la prédiction de chaque paramètre technologique étudié (usure, tenue, rugosité et effort de coupe).

III.2 Usure des outils en céramique mixte (CC6050)

III.2- 1 Usure en dépouille VB

Dans ce point, nous présentons le comportement à l'usure du matériau de coupe céramique (CC6050) lors d'usinage de l'acier X210Cr12 à différentes vitesses de coupe et différentes avances. Les essais réalisés en tournage sont ceux d'usure de longue durée et cela pour évaluer la tenue du matériau de coupe utilisé.

L'analyse des figures III.1 et III.2 montrent que l'allure de l'usure VB obéit à la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique. Autrement dit, cette évolution se caractérise par trois périodes principales.

La première période correspond aux premières secondes de travail, qui se distingue par une usure intensive appelée souvent « usure initiale ou rodage », avec uniquement l'usure en dépouille qui évolue rapidement. La grande vitesse d'accroissement de l'usure dans cette période s'explique par l'élimination des aspérités au niveau de l'arête de coupe ou à son voisinage. Par la suite, l'usure en dépouille se stabilise légèrement, et c'est l'usure en cratère qui est observée sur le chanfrein d'arête. L'usure dans cette zone évolue avec une vitesse relativement plus lente et devient plus au moins linéaire. Cette phase d'évolution est connue dans la littérature sous le nom de « usure normale », elle se distingue par une grande résistance à l'usure. Au fur et à mesure que l'outil travaille la température à l'interface outil/pièce et outil/copeau s'élève ce qui favorise et amorce l'apparition de la troisième zone.

Les figures III.1 et III.2 exposent les résultats de l'évolution de l'usure en dépouille (VB) en fonction du temps d'usinage à différentes vitesses de coupe (80; 110 et 140) m/min et différentes avances (0,08; 0,12 et 0,14) mm/tr.

L'analyse des résultats relatifs à la variation de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage pour vitesses de coupe (80 ; 110 et 140) m/min et trois avances différentes (0,08 ; 0,11 et 0,14) mm/tr montre avec l'augmentation du temps d'usinage, la température de coupe augmente ce qui conduit à une augmentation de l'usure VB. L'analyse des résultats montre que la vitesse de coupe et l'avance ont une influence significative sur l'usure du matériau de coupe testé (figure III-1). La tenue de l'outil pour $V_c=140\text{m/min}$ et $f=0,14\text{mm/tr}$ est de 12minutes. L'usure VB est considérablement élevée à $V_c=140\text{m/min}$ comparée à celles obtenues pour les vitesses 110m/min et 80m/min avec la même avance.

Pour $V_c=110\text{m/min}$ et $f=0,08\text{mm/tr}$ et lorsque l'usure atteint la valeur de 0,3mm, on enregistre une durée de vie de l'outil de 33 minutes. Dans les mêmes conditions de coupe et à $f=0,14\text{mm/tr}$, la tenue est de 24 minutes. On remarque que la durée de vie diminue de 27%.

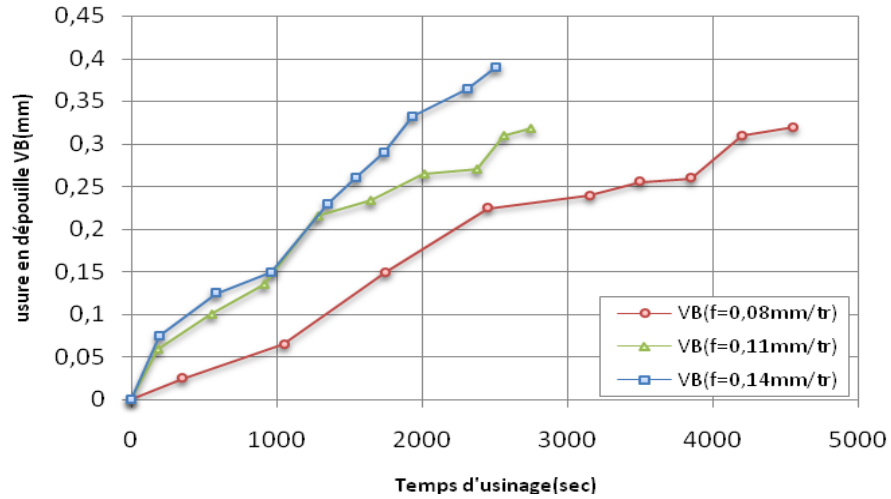
Cette analyse nous permet de conclure que la vitesse de coupe a un effet plus important que celui de l'avance.

Pour $V_c=80\text{m/min}$ et $f=0,08\text{mm/tr}$ la tenue de la céramique CC6050 est de 68 min.

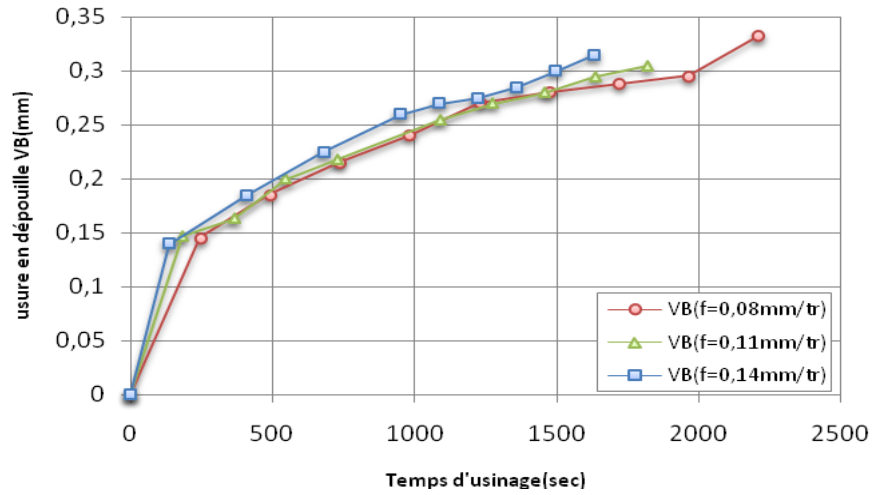
La variation de l'usure en fonction du temps d'usinage à trois avances (0,08 ; 0,12 et 0,16) mm/tr pour trois vitesses différentes (120 ; 180 et 240) m/min est représentée dans la figure IV-2. On remarque bien que l'avance et la vitesse de coupe ont une influence significative sur l'usure du matériau de coupe avec l'augmentation du temps d'usinage.

On enregistre aussi une rupture de la plaquette à cause de la progression de l'usure suivie d'un recul important de l'arête de coupe. Ce phénomène se manifeste après 35.41min, 32.5min et 12.5min du temps d'usinage qui correspond aux trois avance ($f=0,08; 0,11; 0,14\text{tr/min}$) avec une vitesse de coupe constante $V_c=140\text{m/min}$.

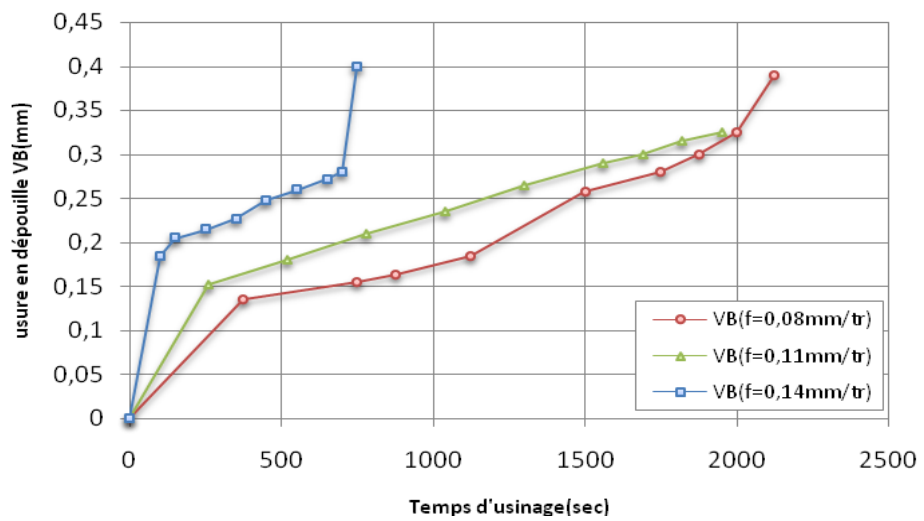
Le suivi de l'usure en cratère KT, a montré que cette usure évolue à un rythme beaucoup plus lent que celle de l'usure VB. C'est pour cela que [VB] est adopté comme critère d'usure principale.



(a)



(b)



(c)

Figure III.1: Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usage à trois avances pour : (a) $V_c=80\text{m/min}$, (b) $V_c=110\text{m/min}$ et (c) $V_c=140\text{m/min}$

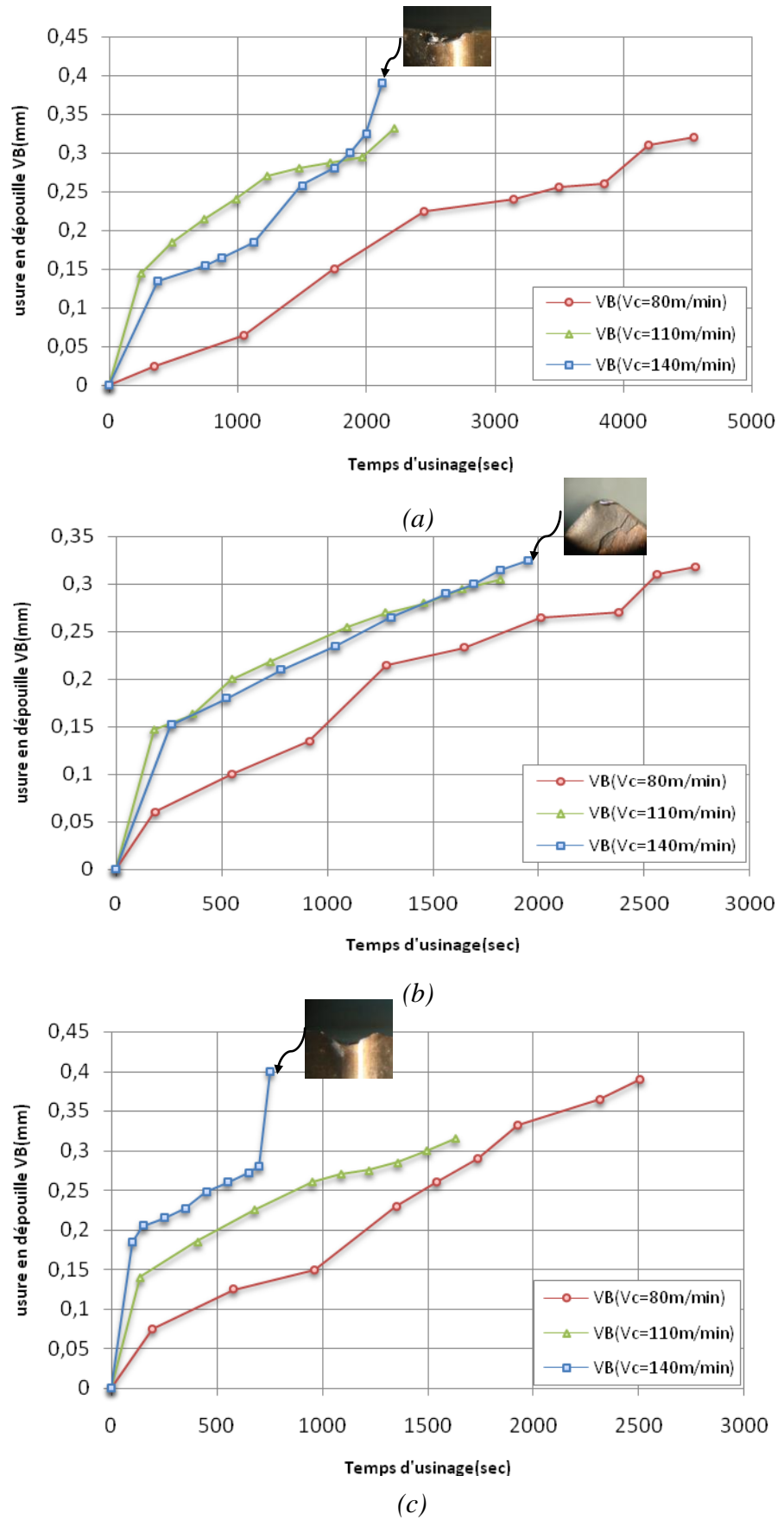


Figure III.2: Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage à trois vitesses pour : (a) $f = 0,08 \text{ mm/tr}$, (b) $f = 0,1 \text{ mm/tr}$ et (c) $f = 0,14 \text{ mm/tr}$

III.2- 2 Usure VC

La figure III-3 illustre l'impact du temps d'usinage sur l'usure VC de la plaquette CC6050 pour trois vitesses et à trois avances différentes. Avec l'augmentation du temps d'usinage, le frottement augmente ce qui accélère les mécanismes d'usure. A la vitesse de coupe de 80m/min et pour un temps d'usinage de 700 secondes (11min 40sec), on enregistre des valeurs de ($VC_{0,08}$; $VC_{0,11}$ et $VC_{0,14}$) de (0,05 ; 0,11 et 0,13) mm. Pour les mêmes conditions de coupe et à $V_c=140m/min$, les valeurs de ($VC_{0,08}$; $VC_{0,11}$ et $VC_{0,14}$) sont de (0,15 ; 0,20 et 0,28) mm, ce qui correspond à une augmentation de (200; 81,81 et 115,38) %. Ce constat nous permet de conclure que la vitesse a un grand effet sur l'évolution de l'usure.

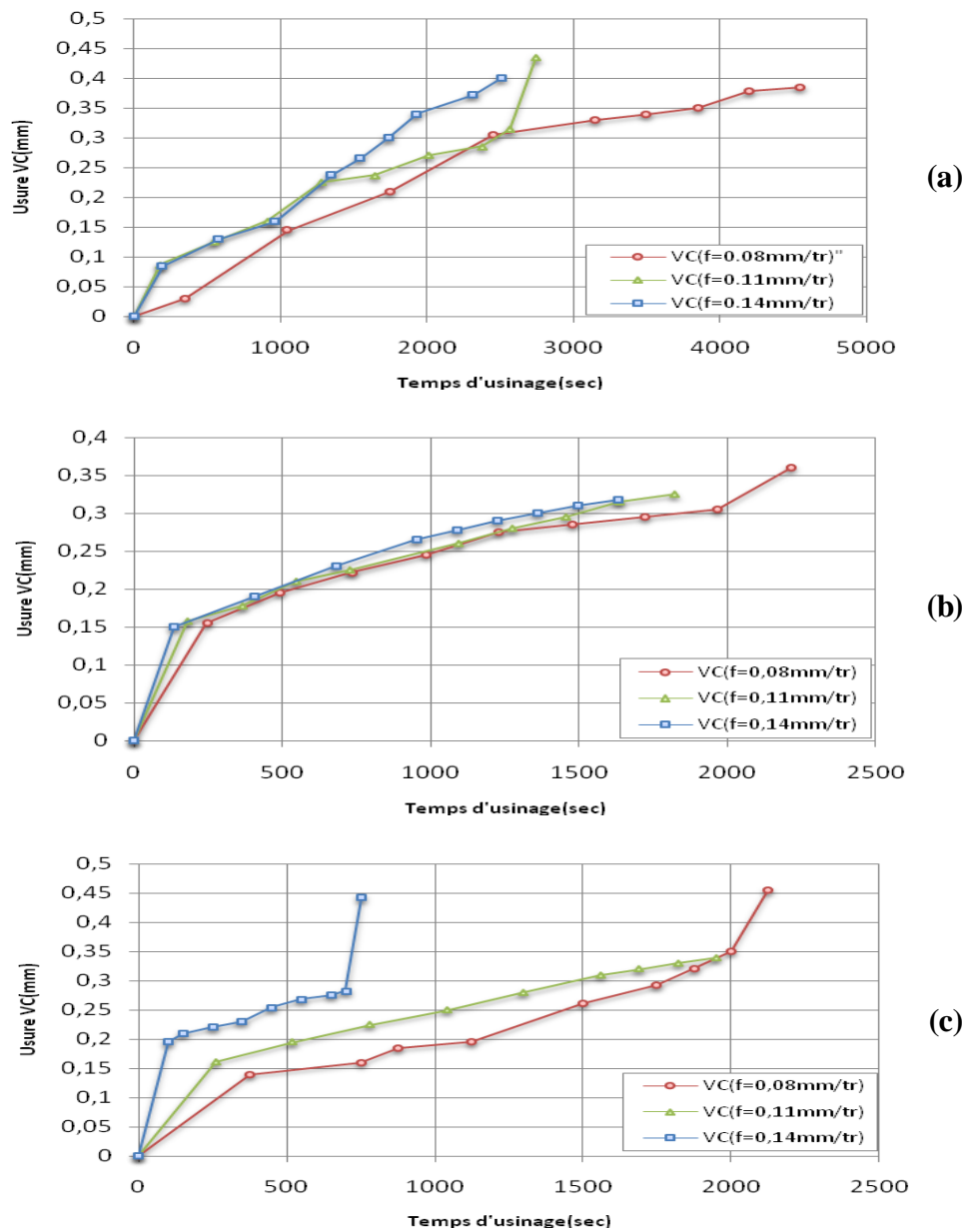
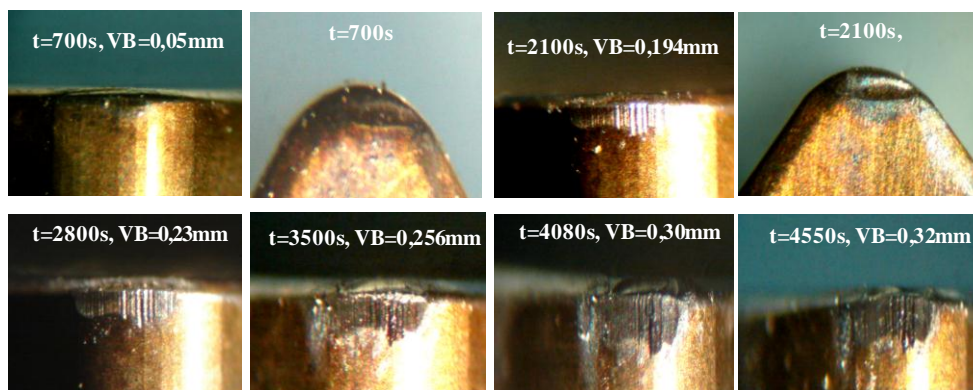
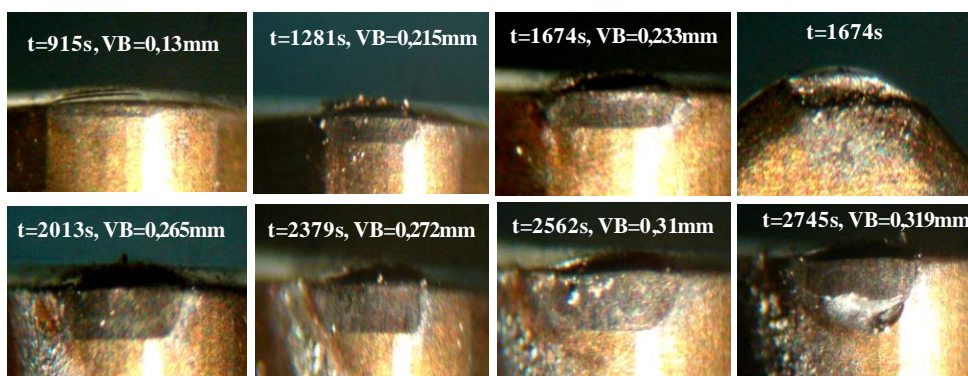


Figure III. 3: Evolution de l'usure VC en fonction du temps d'usinage à trois avances pour : (a) $V_c=80m/min$, (b) $V_c=110m/min$ et (c) $V_c=140m/min$

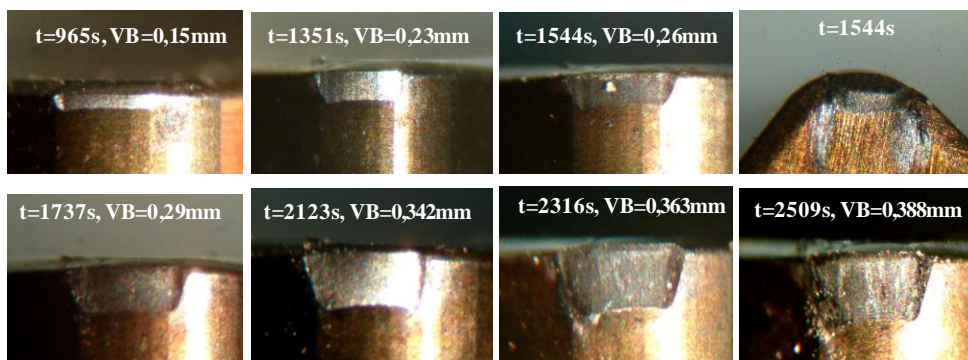
Les figures (III.4; III.5 et III.6) mettent en évidence la morphologie de l'usure sur le bec de l'outil en fonction du temps d'usinage pour des vitesses de coupe différentes et à trois avances différentes (0,08; 0,11 et 0,14) mm/tr.



(a) : $V_c = 80\text{m/min}$ et $f = 0,08\text{mm/tr}$

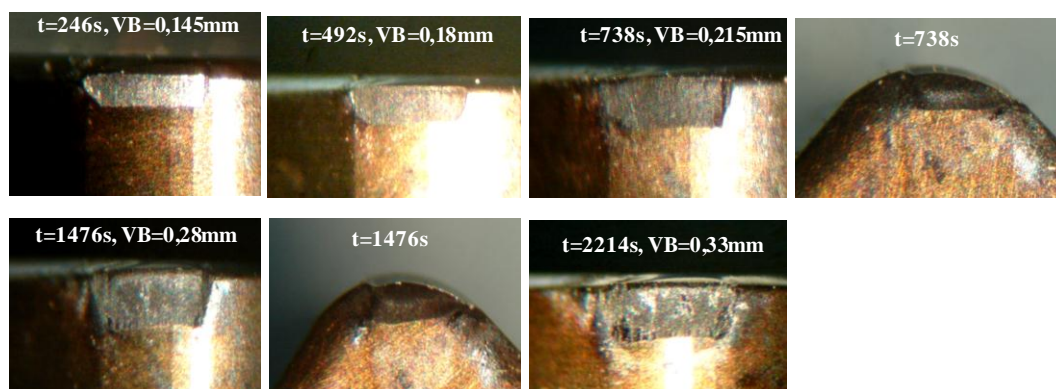


(b) : $V_c = 80\text{m/min}$ et $f = 0,11\text{mm/tr}$

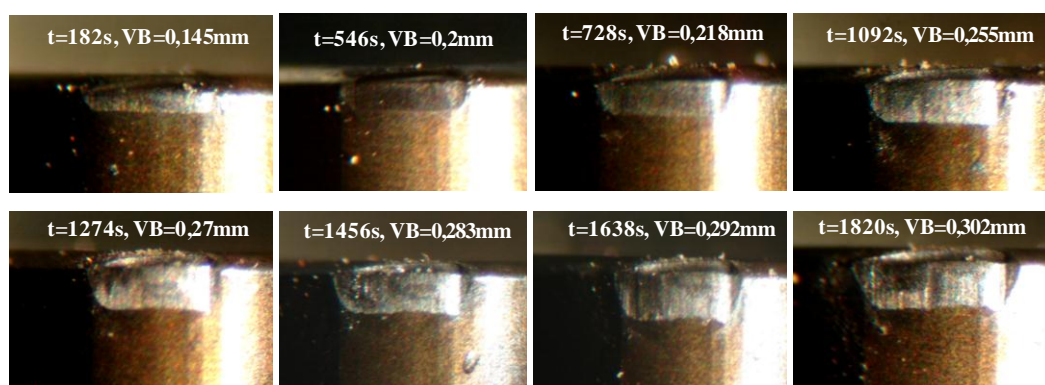


(c) : $V_c = 80\text{m/min}$ et $f = 0,14\text{mm/tr}$

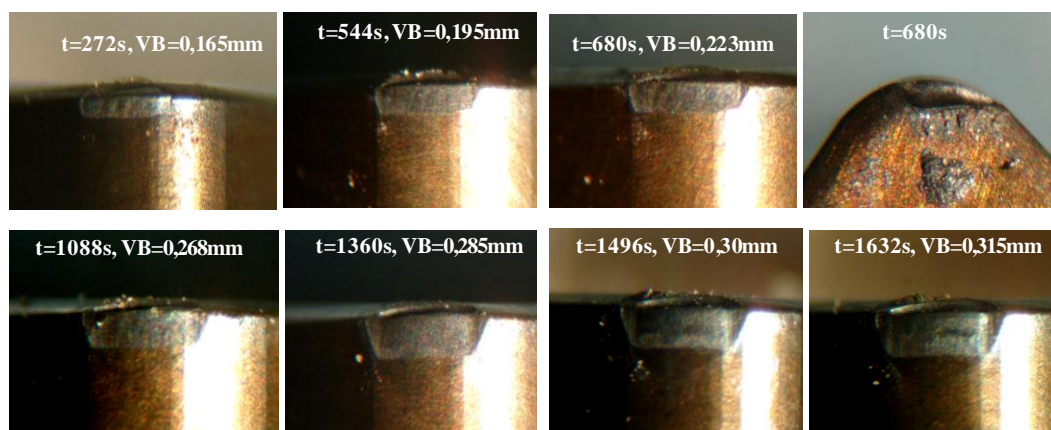
Figure III.4: Morphologie de l'usure VB en fonction du temps d'usinage à trois avances pour $V_c = 80\text{m/min}$



(a) : $V_c=110 \text{ m/min}$ et $f=0,08 \text{ mm/tr}$

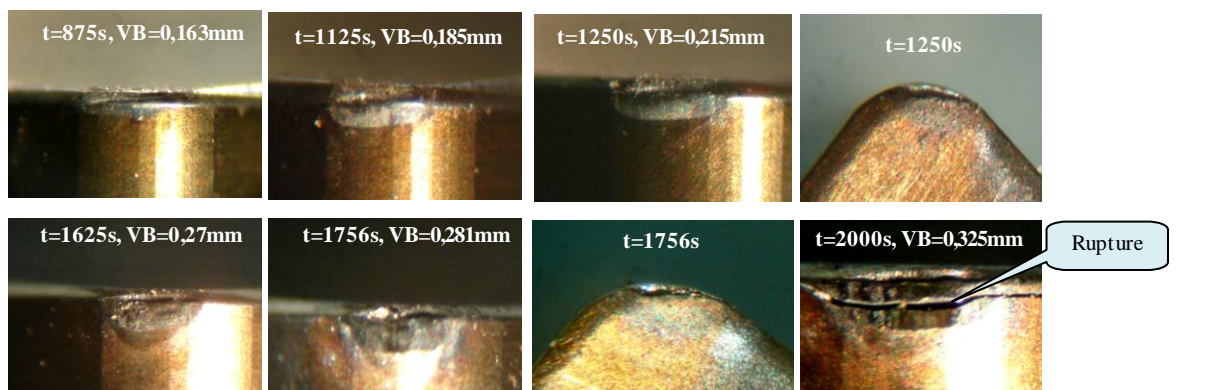


(b): $V_c = 110 \text{ m/min}$ et $f = 0,11 \text{ mm/tr}$

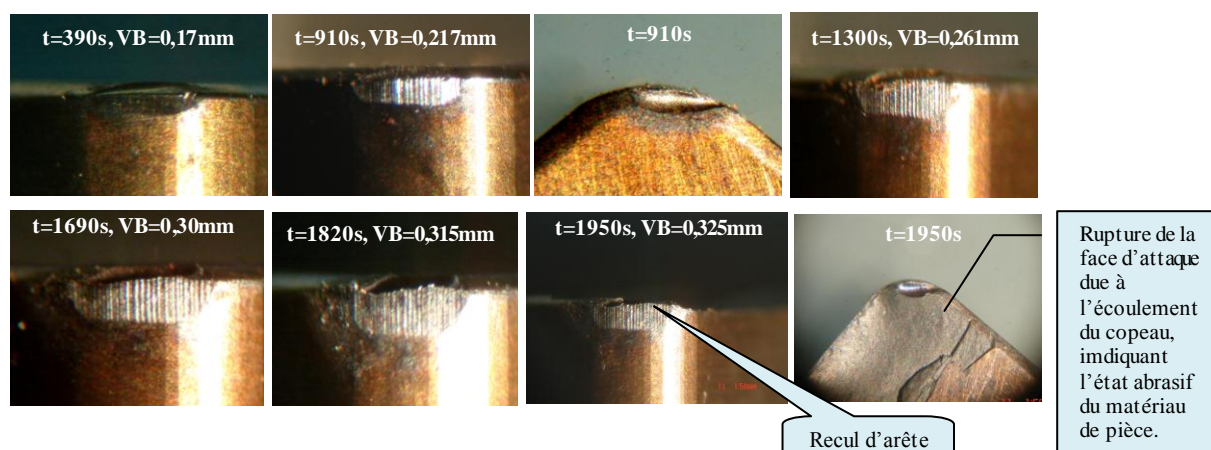


(c): $V_c = 110 \text{ m/min}$ et $f = 0,14 \text{ mm/tr}$

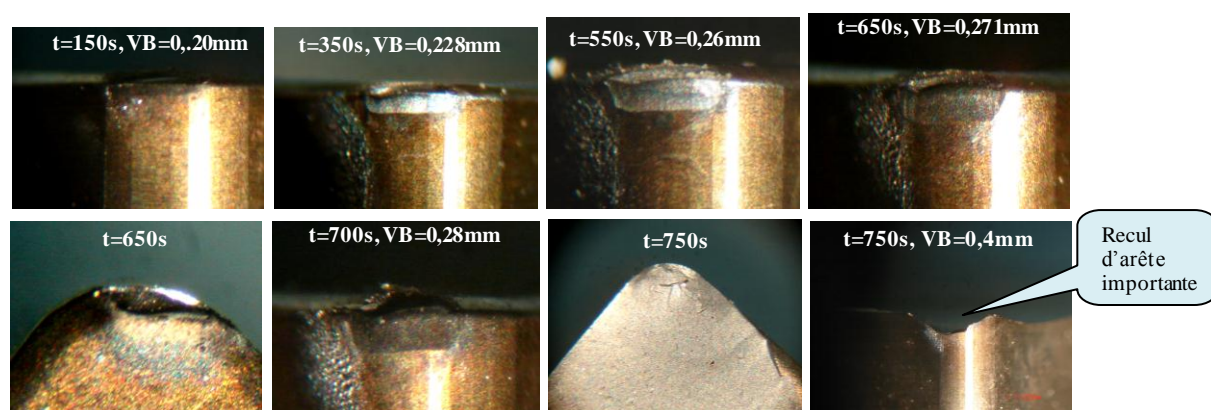
Figure III.5: Morphologie de l'usure VB en fonction du temps d'usinage à trois avances pour $V_c=110 \text{ m/min}$



(a) : $V_c = 140\text{m/min}$ et $f = 0,08\text{mm/tr}$



(b): $V_c = 140\text{m/min}$ et $f = 0,11\text{mm/tr}$



(c): $V_c = 140\text{m/min}$ et $f = 0,14\text{mm/tr}$

Figure III.6: Morphologie de l'usure VB en fonction du temps d'usinage à trois avances pour $V_c = 140\text{m/min}$

L'analyse des différentes photos de la Morphologie de l'usure montre que pendant tous les essais d'usinage, l'usure en dépouille VB de la céramique revêtue CC6050 se développe suivant une bande régulière qui s'élargit avec le temps. L'usinage est caractérisé par une stabilité pas d'écaillage sur l'arête de coupe. On remarque aussi sur la surface en dépouille de l'outil la présence des cannelures qui présentent la caractéristique d'une haute usure abrasive essentiellement due aux frottements outil/pièce et copeau/outil, ce qui montre l'agressivité du matériau usiné.

A la fin de l'usinage pour les vitesses $V_c=80$ et 110 m/min et $f=0,08$ mm/tr, l'usure en dépouille VB reste toujours régulière et des rayures sur la bande d'usure apparaissent. A 80 m/min et $f=0,14$ mm/tr, VB se manifeste toujours par une petite bande brillante et régulière. L'outil atteint la valeur admissible de l'usure après 30 minutes d'usinage avec une rugosité moyenne arithmétique (R_a) de $1,03\mu\text{m}$. A 110 m/min et $f=0,14$ mm/tr, l'outil atteint la valeur admissible de l'usure après 24,56 min d'usinage avec une rugosité moyenne arithmétique (R_a) de $1,12\mu\text{m}$.

A la fin de l'usinage pour la vitesse de coupe $V_c = 140$ m/min, VB devient irrégulière et un effondrement est survenu après (35,41; 32,5 et 12,5) min de travail pour les trois avances ($f=0,08$; 0,11 et 0,14) mm/tr respectivement qui est caractérisé par une perte importante de matière suivi par une rupture de l'arête à cause de l'usure observée sur la face d'attaque de la plaquette comme s'est représenté sur la figure III.6. Cette usure est le résultat des sollicitations-thermomécaniques qui existe à la pointe de l'outil. Un autre facteur important qui influe et accélère l'usure de l'arête de coupe c'est l'engagement et désengagement de l'outil pendant l'opération de l'usinge.

On remarque aussi que l'usure en cratère apparaît beaucoup plus tôt lorsque la vitesse de coupe augmente car la température de coupe croît, favorisant ainsi le mode d'usure par diffusion.

III.3 Evaluation de la durée de vie de la céramique CC6050

La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure.

La définition de la durée de vie T d'un outil selon la norme ISO 3685: « C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique » [18].

En général, la tenue d'un outil de coupe est influencée par une série de facteurs notamment la vitesse de coupe [8]. A des vitesses importantes, les frottements outil-pièce sont en fonction

de la surface de contact. Cette dernière augmente avec l'usure, ce qui génère une quantité de chaleur altérant les arêtes de coupe par des phénomènes physico-chimiques complexes [37]. Le tableau III.1 présente la durée de vie pour un critère d'usure $[VB]=0,3$ mm et à différentes vitesses et avances. Ces résultats sont obtenues à partir des figures III.1 et III.2.

V_c (m/min)	f (mm/tr)	Durée de vie (min) pour $VB = 0,30$ mm
80	0,08	68,00
80	0,11	42,00
80	0,14	30,00
110	0,08	33,33
110	0,11	28,33
110	0,14	24,56
140	0,08	31,00
140	0,11	27,57
140	0,14	12,00

Tableau III.1: Durées de vie pour $VB=0,30$ mm et $ap=0,2$ mm

III.3- 1 Analyse de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance

Les figures (III-7 et 8) illustrent l'évolution de la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe à trois avances différentes (0,08 ; 0,11 ; 0,14) mm/tr et en fonction de l'avance à trois vitesses de coupe différentes (80 ; 110 et 140) m/min.

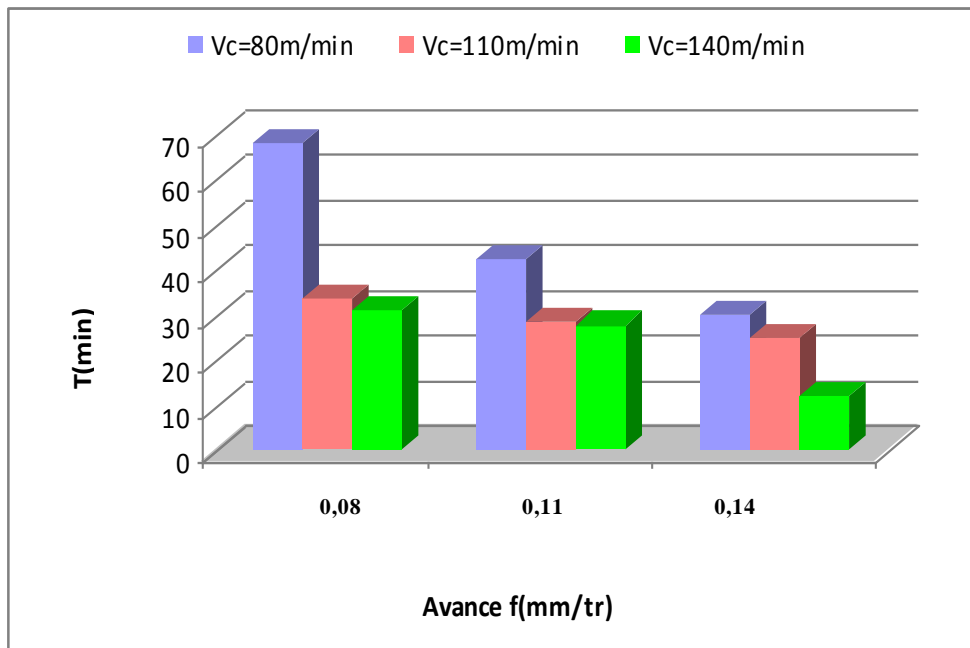


Figure III.7: Evolution de la durée de vie de l'outil en en fonction de la vitesse de coupe à trois avance

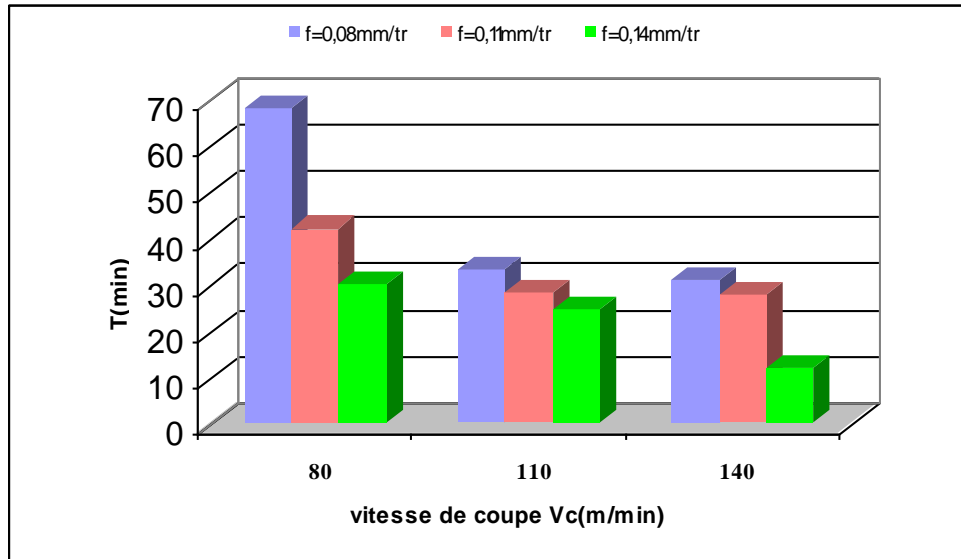


Figure III.8: Evolution de la durée de vie de l'outil en fonction de l'avance à trois vitesses de coupe

Le critère d'usure recommandé par ISO et adopté dans cette étude est celui de l'usure en dépouille de $[VB] = 0,3\text{mm}$.

L'effet de la vitesse de coupe peut être interprété par la comparaison des ratios des tenues de la céramique mixte CC6050.

A la vitesse de coupe de 140 m/min le ratio $(T_{f,0,08}/T_{f,0,11})$ n'est que 1,12 alors que $(T_{f,0,08}/T_{f,0,14})$ est plus que le double 2,58 fois.

Pour la vitesse 110 m/min, le ratio $(T_{f,0,08}/T_{f,0,11})$ prend la valeur de 1,18 alors que le ratio $(T_{f,0,08}/T_{f,0,14})$ décroît pour donner la valeur de 1,36. Le ratio (T_{Vc80}/T_{Vc110}) est (2,04; 1,48 et 1,22) pour les trois avances 0,08; 0,11 et 0,16 mm/tr respectivement, alors que le ratio (T_{Vc80}/T_{Vc140}) s'accroît est atteint les valeurs de (02,19; 1,52 et 2,5).

a) Effet de la vitesse de coupe

L'influence de ce paramètre est plus significative car lors des essais on a observé une diminution rapide de la durée de vie de l'outil avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

Pour les valeurs de la vitesse de coupe prises de (80 à 140) m/min, on enregistre une diminution de la durée de vie de l'outil pour les trois avances $(T_{0,08}$; $T_{0,11}$ et $T_{0,14})$ successivement de (54,41% ; 34,36% et 60%). Cette diminution est expliquée par le fait que lorsqu'on augmente la vitesse de coupe, la température dans la zone de coupe augmente, notamment aux interfaces « copeau-surface d'attaque », et « pièce-surface de dépouille principale », ce qui favorise la manifestation des différents mécanismes d'usure de l'outil céramique.

b) Effet de l'avance

De la même manière, l'influence de l'avance sur la durée de vie de l'outil est aussi importante. Les essais réalisés ont montré une diminution de la durée de vie d'outil avec l'augmentation de l'avance. Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de l'avance sur la durée de vie de l'outil sont comme suit :

L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,14 mm/tr fait chuter les durées de vie de l'outil pour les trois vitesses de coupe (T₈₀ ; T₁₁₀ et T₁₄₀) successivement de (55,88% ; 26,31% et 61,29%).

III.4 Modèles de l'usure

Cette partie est consacrée à la détermination des modèles mathématiques de l'usure et de la tenue de l'outil céramique. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (V_c, f, a_p) et la tenue et aussi entre l'usure VB et le temps d'usinage.

III.4- 1 Détermination des modèles de l'usure en fonction du temps

A partir des courbes de l'usure en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe présentées dans les figures III.1 et III.2, on peut déterminer les modèles mathématiques qui expriment la relation entre l'usure en dépouille VB et le temps de coupe pour différentes vitesses de coupe (Tableau III.2).

V _c (m/min)	f (mm/tr)	Modèles mathématiques de l'usure (VB)	Coefficient de détermination R ²
80	0,08	VB= $-4.10^{-13} t^3 - 3.10^{-9} t^2 + 9.10^{-5} t - 0.0068$	R ² =0.9833
80	0,11	VB= $7.10^{-12} t^3 - 5.10^{-8} t^2 + 0.0002t + 0.0082$	R ² =0.9859
80	0,14	VB= $1.10^{-13} t^3 - 4.10^{-9} t^2 + 0.0004 t + 0.018$	R ² =0.9872
110	0,08	VB = $8.10^{-11} t^3 - 3.10^{-7} t^2 + 0.0005 t + 0.0148$	R ² =0.981
110	0,11	VB = $1.10^{-10} t^3 - 4.10^{-7} t^2 + 0.0005 t + 0.0228$	R ² =0.9652
110	0,14	VB = $2.10^{-10} t^3 - 5.10^{-7} t^2 + 0.0006 t + 0.0255$	R ² =0.9657
140	0,08	VB = $9.10^{-11} t^3 - 3.10^{-7} t^2 + 0.0004 t + 0.008$	R ² =0.9835
140	0,11	VB = $9.10^{-11} t^3 - 3.10^{-7} t^2 + 0.0003 t + 0.015$	R ² =0.977
140	0,14	VB = $4.10^{-9} t^3 - 5.10^{-6} t^2 + 0.001 t + 0.012$	R ² =0.9494

Tableau III.2: Modèles mathématiques de VB en fonction du temps d'usinage.

Les modèles mathématiques de l'usure VB (tableau III.4) ont un intérêt pratique certain, car ils permettent de prédire l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage. Par exemple, pour une usure imposée on peut déterminer le temps d'usinage de la plaquette de céramique CC6050. Cela est très intéressant lorsque on veut changer une arête de coupe pour une usure imposée.

III.4.2 Modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe et l'avance

Ce point est consacré à la détermination du modèle mathématique de la tenue en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance (modèle de Gilbert). Ce modèle permet d'exprimer la relation entre les conditions de coupe (V_c , f) et la durée de vie de la plaquette céramique.

Modèle de Gilbert

Le traitement statistique des résultats (tableau III.1) de la tenue permet de déterminer un modèle mathématique, exprimant la relation fonctionnelle entre la durée de vie et les éléments du régime de coupe qui sont en l'occurrence la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Le modèle mathématique de Gilbert se présente sous la forme suivante:

$$T = C_0 \cdot V_c^{C_1} \cdot f^{C_2} \cdot a_p^{C_3} \dots\dots\dots(III.1)$$

Où :

C_0 : Constante tenant compte de l'influence de tous les autres facteurs qui ne figurent pas dans cette formule.

C_1, C_2, C_3 : Exposants indiquant le degré d'influence de chaque facteur correspondant sur la durée de vie.

Dans notre cas, nous sommes limitées au modèle sous la forme suivante :

$$T = C_0 \cdot V_c^{C_1} \cdot f^{C_2} \dots\dots\dots(III.2)$$

La détermination des constantes C_0, C_1, C_2 a été faite à l'aide d'un programme informatique en utilisant la méthode de moindre carrée.

Avec $a_p = \text{const} = 0.2\text{mm}$ et pour $[VB] = 0.3$.

Le traitement des résultats de la tenue du tableau IV.1, nous a permis de déterminer le modèle suivant :

$$T = e^{6,635} / V^{1,27} \cdot f^{1,212} \quad R^2 = 0,864 \dots\dots\dots(III.3)$$

Ce modèle montre que la durée de vie est inversement proportionnelle à l'augmentation des deux éléments de régime de coupe (V_c et f). En prenant la valeur des exposants en valeur

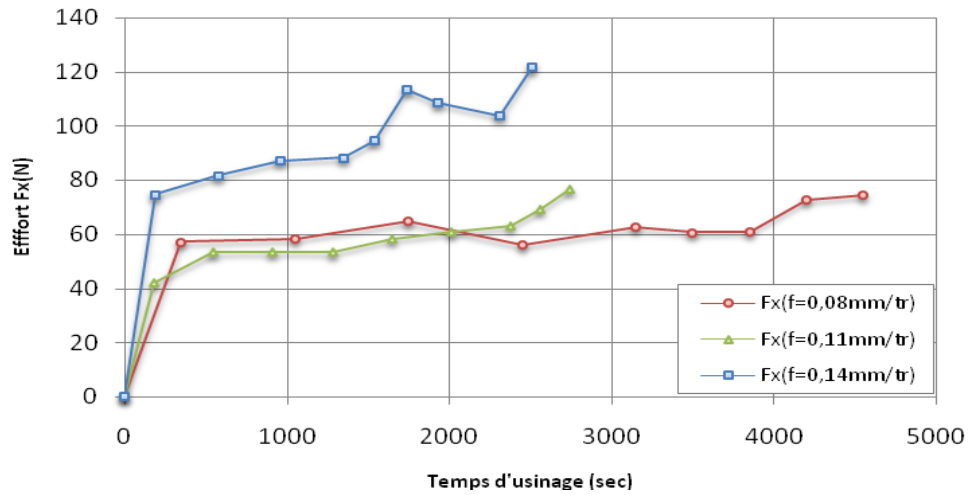
absolue, on arrive à déterminer le degré de l'influence de chaque facteur des éléments (V_c et f) sur la tenue. L'analyse des différents exposants montre que l'influence de la vitesse de coupe est un peu significatif que celle de l'avance.

III.5 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de VB

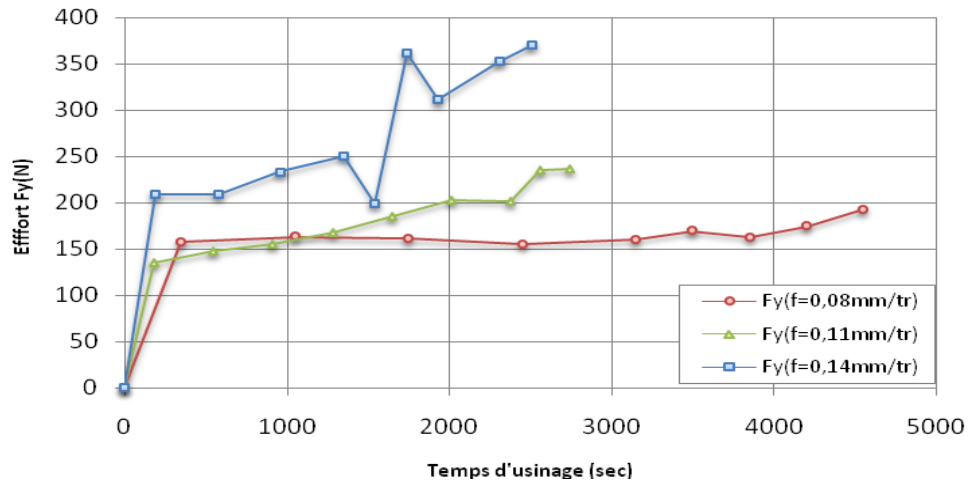
III.5-1 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage

Les résultats présentés sur les figures III.9 à III.11 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à trois avances (0,08 ; 0,11 et 0,14) mm/tr et pour trois vitesses de coupe différentes (80 ; 110 et 140) m/min à une profondeur de passe constante $a_p=0,2$ mm, lors de l'usinage de l'acier X210Cr12 par la céramique mixte CC6050. L'analyse des courbes de la figure III-9, III-10 et III-11 montre que l'augmentation du temps d'usinage entraîne un accroissement des trois composantes (F_x , F_y et F_z). Ceci est une conséquence de l'évolution de l'usure sur les surfaces en dépouille et d'attaque de l'outil, puisque dans ce cas la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente ce qui augmente les forces de frottement.

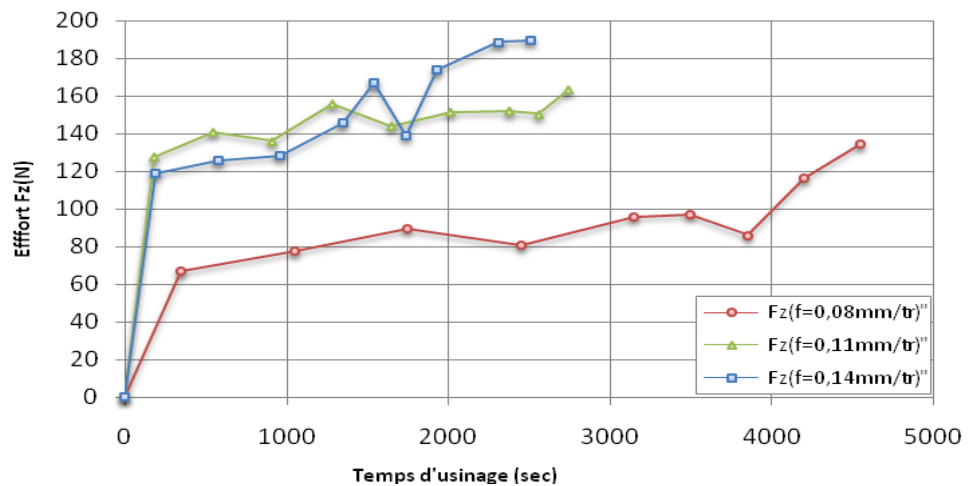
Au début de l'usinage, les efforts (F_x , F_y et F_z) relatifs à $V_c=80$ m/min sont supérieurs à ceux obtenus à $V_c=110$ m/min et à $V_c=140$ m/min pour les mêmes avances. L'analyse des résultats montre que les efforts de coupe pour des conditions sévères c à d ($V_{cmax}=140$ m/min et $f_{max}=0,14$ mm/tr), sont toujours supérieurs par rapport aux efforts obtenus pour les deux autres conditions. Pour $V_c=80$ m/min et $f=0,08$ mm/tr, les efforts (F_x , F_y et F_z) sont respectivement (64,7 ; 161,17 et 89,4) N. Ces valeurs ont été enregistrées pour $t=1750$ secondes. Pour $V_c=140$ m/min et $f=0,08$ mm/tr, les efforts (F_x , F_y et F_z) sont respectivement de (63,59 ; 184,5 et 114,83) N pour $t=1750$ secondes. On enregistre une augmentation des composantes de l'effort de coupe F_y et F_z de (12,64% ; 22,14%) et une petite diminution de F_x de 01,71%. Cette augmentation s'explique par le frottement entre l'outil et la pièce ce qui accélère le mécanisme d'usure et par conséquent les efforts augmentent. Il faut signaler aussi qu'aux conditions de coupe utilisées, l'effort principal est bien l'effort radial suivi par l'effort tangentiel et en dernier lieu l'effort axial.



(a)

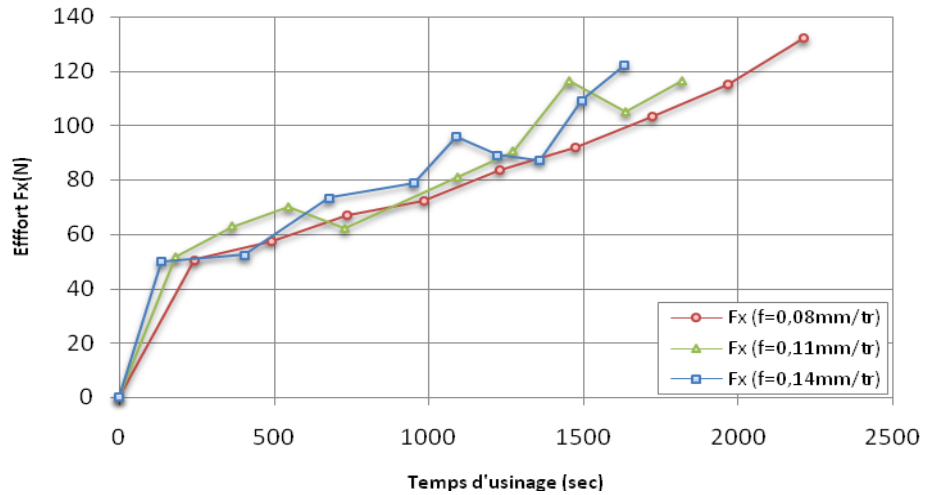


(b)

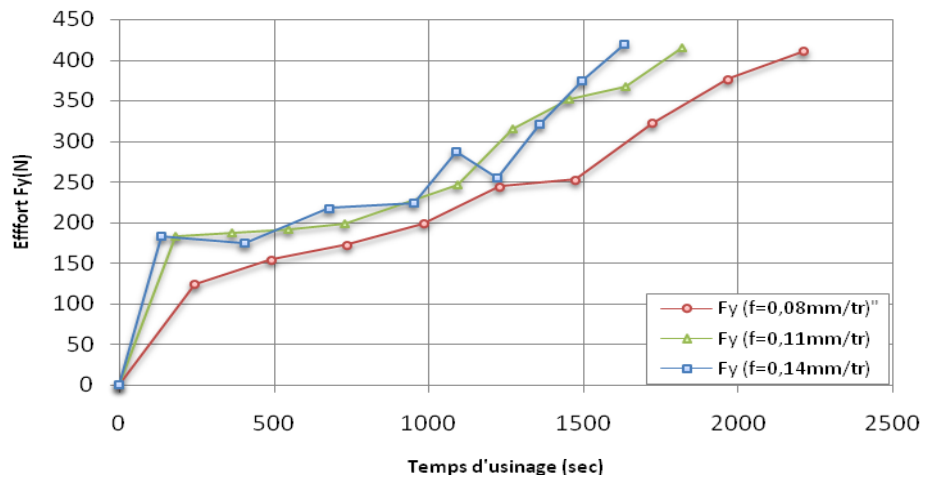


(c)

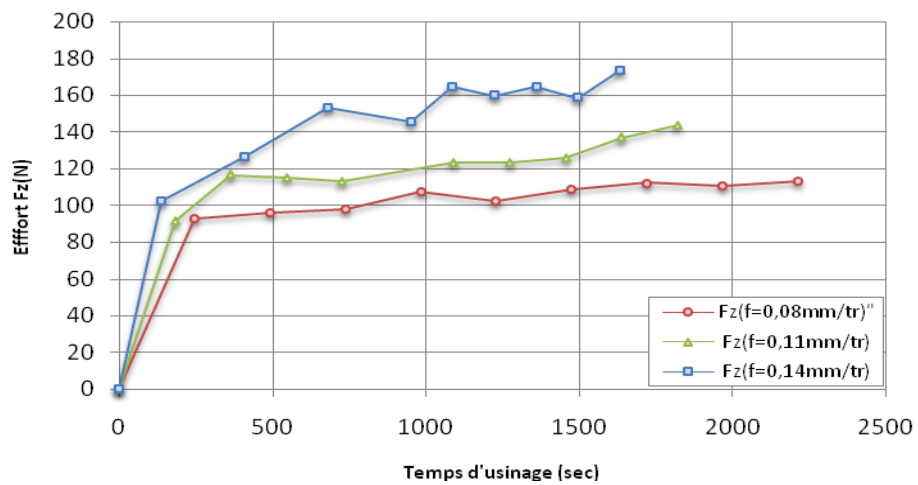
Figure III.9: Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à trois avances pour $V_c=80m/min$



(a)

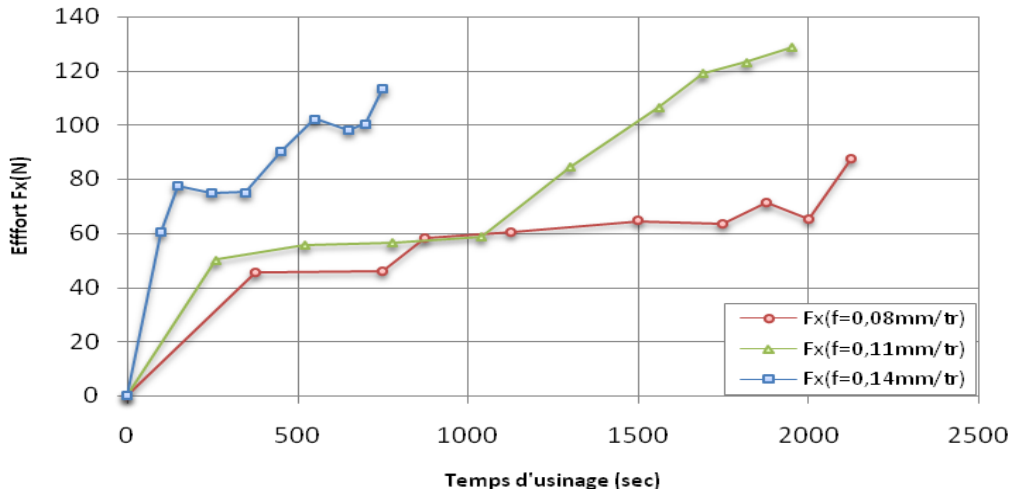


(b)

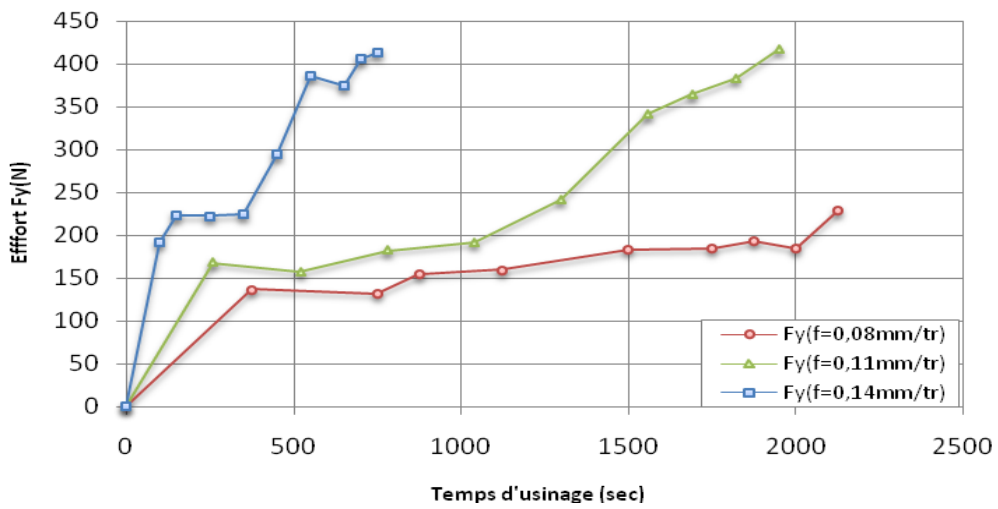


(c)

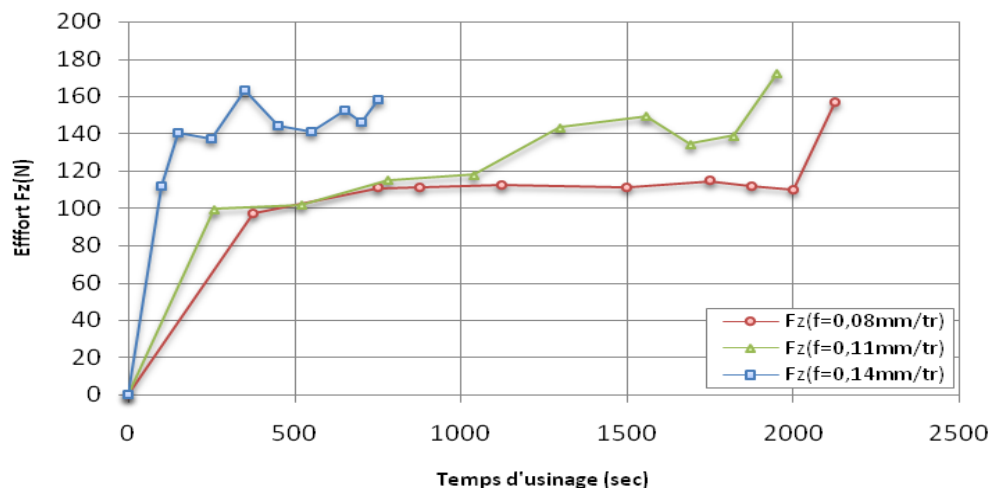
Figure III.10: Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à trois avances pour $V_c=110$ m/min



(a)



(b)



(c)

Figure III.11: Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à trois avances pour $V_c=140$ m/min

III.5-2 Analyse des efforts de coupe en fonction de VB

Les figures III-12, III-13 et III-14 illustrent l'impact de l'usure en dépouille VB sur les efforts de coupe à trois avances et pour trois vitesses différentes.

Pour $V_c=80$ m/min (figure III.9)

L'analyse de la figure III-12 montre que l'augmentation de l'usure en dépouille conduit à une augmentation des efforts de coupe et cela en trois zones d'évolutions distinctes. La première zone croissante correspond à $VB \leq 0,06$ mm, cette zone représente la zone de rodage de l'arête de coupe. La deuxième zone se caractérise par un intervalle où les efforts de coupe se stabilisent, cette zone correspond à la zone normale de l'usure VB. La troisième zone ($VB \geq 0,26$ mm) où les courbes de l'effort de coupe prennent une allure ascendante à cause de l'augmentation de l'usure VB.

* Pour une usure $VB=0,15$ mm, les efforts de coupe ($F_{x0,08}$; $F_{x0,11}$ et $F_{x0,14}$) enregistrés sont successivement (64,7 ; 53,46 et 87,12) N.

Pour $VB=0,310$ mm, les efforts de coupe ($F_{x0,08}$; $F_{x0,11}$ et $F_{x0,14}$) sont (72,7 ; 69,15 et 108,44) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (12,36% ; 29,35% et 24,47%).

* Pour une usure $VB=0,15$ mm, les efforts de coupe ($F_{y0,08}$; $F_{y0,11}$ et $F_{y0,14}$) enregistrés sont successivement (161,17 ; 155,17 et 233,31) N.

Pour $VB=0,310$ mm, les efforts de coupe ($F_{y0,08}$; $F_{y0,11}$ et $F_{y0,14}$) sont (174,64 ; 234,99 et 311,00) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (08,36% ; 51,44% et 33,30%).

* Pour une usure $VB=0,15$ mm, les efforts de coupe ($F_{z0,08}$; $F_{z0,11}$ et $F_{z0,14}$) enregistrés sont successivement (89,4 ; 135,92 et 128,32) N.

Pour $VB=0,310$ mm, les efforts de coupe ($F_{z0,08}$; $F_{z0,11}$ et $F_{z0,14}$) sont (116,25 ; 150,41 et 174,01) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (30,03% ; 10,66% et 35,60%).

□ **Pour $V_c=110$ m/min** (figure III.10)

* Pour une usure $VB=0,21$ mm, les efforts de coupe ($F_{x0,08}$; $F_{x0,11}$ et $F_{x0,16}$) enregistrés sont successivement (66,95 ; 70,02 et 73,26) N.

Pour $VB=0,30$ mm, les efforts de coupe ($F_{x0,08}$; $F_{x0,11}$ et $F_{x0,14}$) sont (114,96 ; 105,03 et 109,12) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (71,71% ; 50,00% et 48,95%).

* Pour une usure $VB=0,21$ mm, les efforts de coupe ($F_{y0,08}$; $F_{y0,11}$ et $F_{y0,14}$) enregistrés sont successivement (172,17 ; 191,46 et 217,5) N.

Pour $VB=0,30$ mm, les efforts de coupe ($F_{y0,08}$; $F_{y0,11}$ et $F_{y0,14}$) sont (376,13 ; 367,69 et 373,86) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (118,46% ; 92,04% et 71,89%).

* Pour une usure $VB=0,21$ mm, les efforts de coupe ($F_{z0,08}$; $F_{z0,11}$ et $F_{z0,14}$) enregistrés sont successivement (97,76 ; 115,14 et 153,23) N.

Pour $VB=0,30$ mm, les efforts de coupe ($F_{z0,08}$; $F_{z0,11}$ et $F_{z0,14}$) sont (110,41 ; 136,96 et 158,59) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (12,94% ; 18,95% et 03,50%).

□ **Pour $Vc=140$ m/min** (figure III.11)

* Pour une usure $VB=0,185$ mm, les efforts de coupe ($F_{x0,08}$; $F_{x0,11}$ et $F_{x0,14}$) enregistrés sont successivement (60,45 ; 55,6 et 60,54) N.

Pour $VB=0,30$ mm, les efforts de coupe ($F_{x0,08}$; $F_{x0,11}$ et $F_{x0,14}$) sont (71,23 ; 118,95 et 100,44) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (17,83% ; 113,94% et 65,91%).

* Pour une usure $VB=0,185$ mm, les efforts de coupe ($F_{y0,08}$; $F_{y0,11}$ et $F_{y0,14}$) enregistrés sont successivement (159,38; 157,23 et 191,68) N.

Pour $VB=0,30$ mm, les efforts de coupe ($F_{y0,08}$; $F_{y0,11}$ et $F_{y0,14}$) sont (192,84 ; 363,87 et 405,51) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (20,99% ; 177,14% et 111,55%).

* Pour une usure $VB=0,185$ mm, les efforts de coupe ($F_{z0,08}$; $F_{z0,11}$ et $F_{z0,14}$) enregistrés sont successivement (112,63 ; 101,57 et 112,13) N.

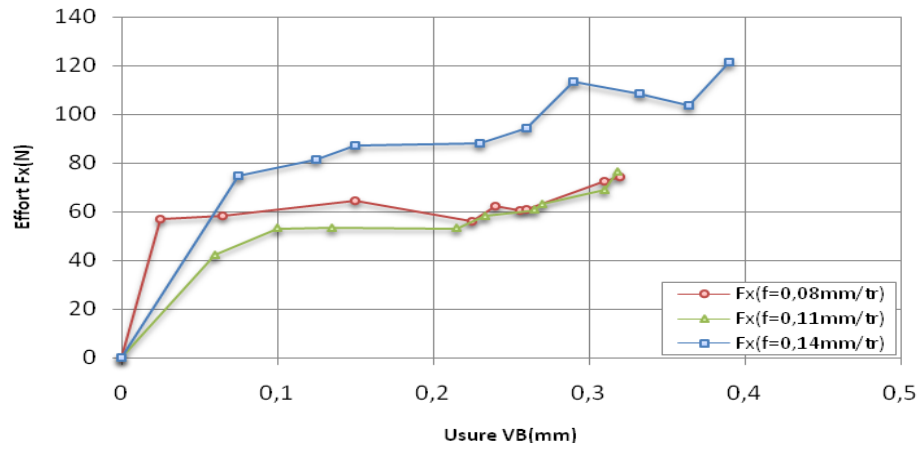
Pour $VB=0,30$ mm, les efforts de coupe ($F_{z0,08}$; $F_{z0,11}$ et $F_{z0,14}$) sont (114,83 ; 134,26 et 146,43) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (01,95% ; 32,18% et 30,59%).

Les allures des courbes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) représentées dans les figures III-13 et III-14 relatives aux vitesses de coupe 110 et 140 m/min se caractérisent par trois parties différentes.

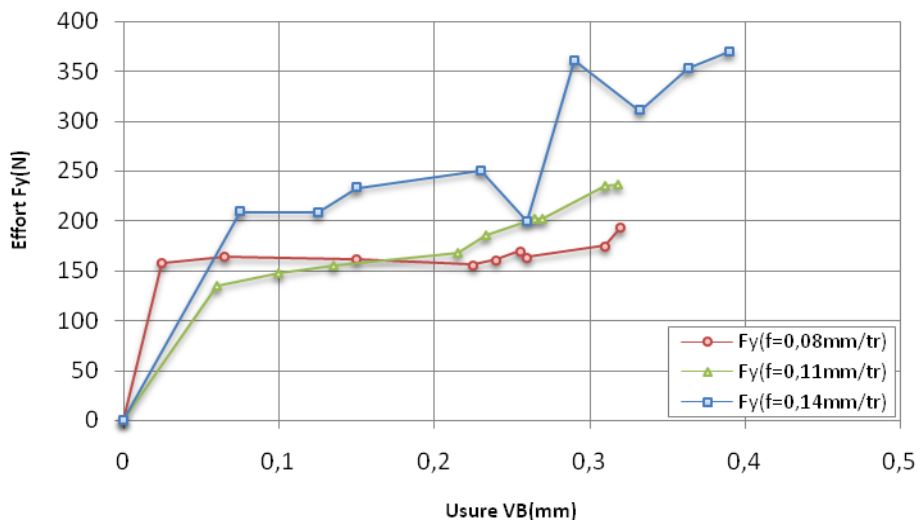
La première partie où l'usure VB ne dépasse pas 0,21mm, les efforts de coupe augmentent rapidement. La deuxième partie où l'usure VB se situe entre 0,21 et 0,29mm, les efforts de coupe se stabilisent légèrement suite à la stabilité de VB . La dernière partie où VB est supérieure à 0,30mm, les efforts de coupe augmentent considérablement à cause de l'augmentation de VB .

A partir des résultats du suivi de l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure, on peut tirer les remarques suivantes:

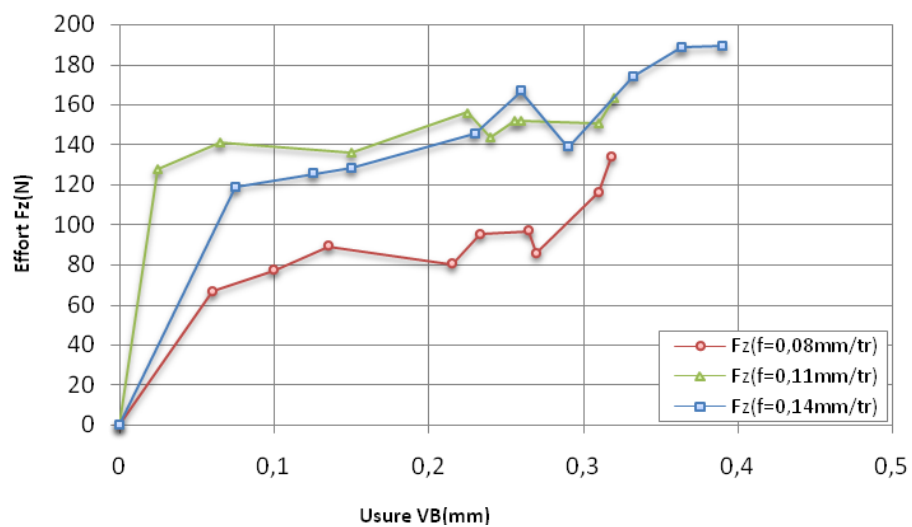
- L'augmentation de l'usure du matériau de coupe induit une augmentation des efforts de coupe et cela pour les différentes vitesses testées.
- Avec les conditions de coupe utilisées, l'effort principal est l'effort de coupe radial suivi par l'effort tangentiel, par contre l'effort axial est moins sensible à l'augmentation de l'usure pour la vitesse de coupe 140 m/min.



(a)



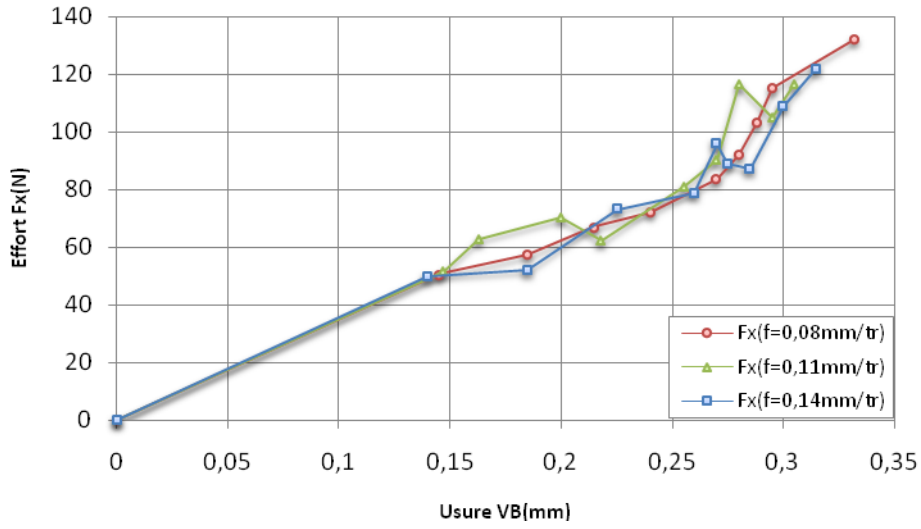
(b)



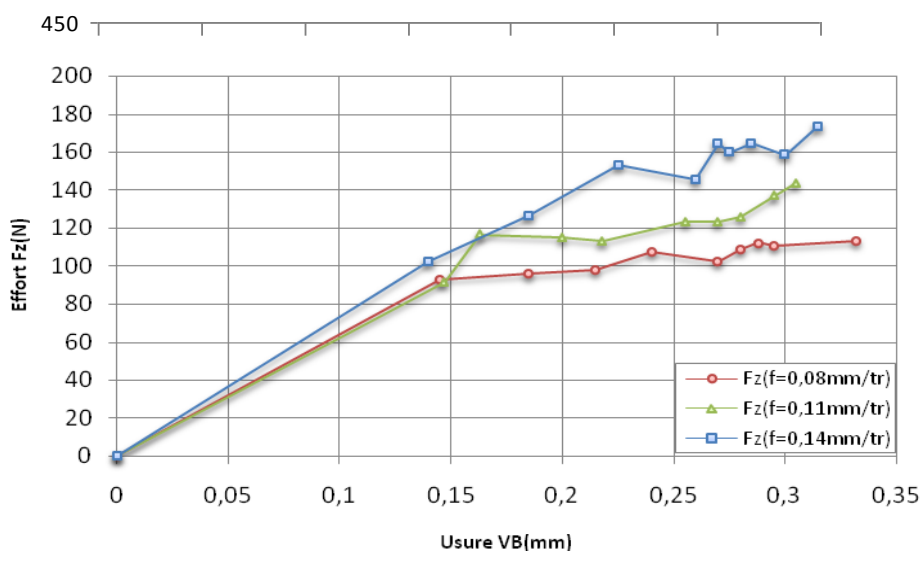
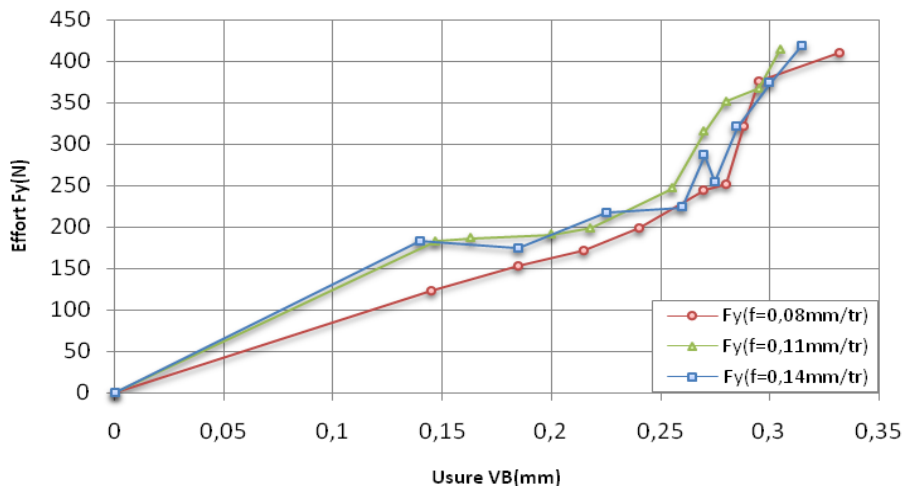
(c)

Figure III.12: Evolution des efforts de coupe en fonction de VB à trois avances pour $V_c=80$ m/min

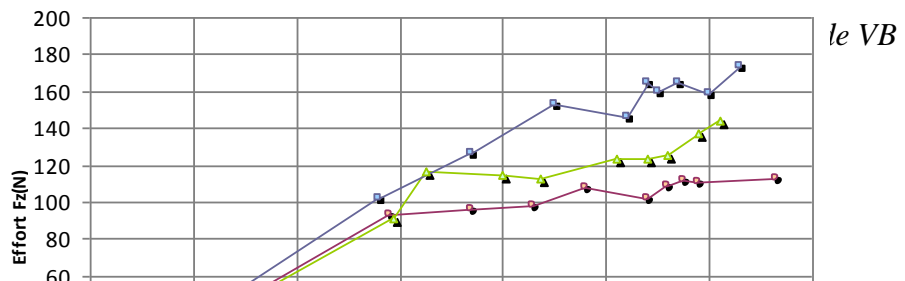
Chapitre III: Usure de la céramique CC6050 et évaluation de la durée de vie



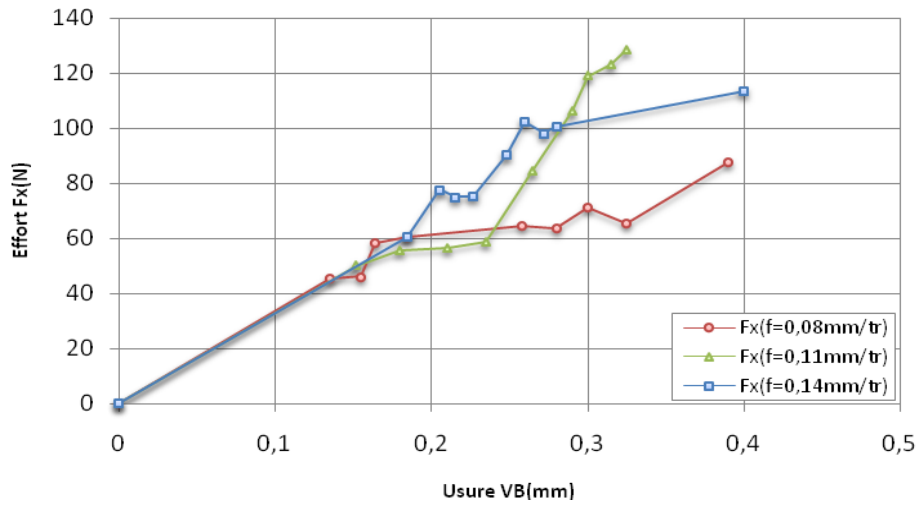
(a)



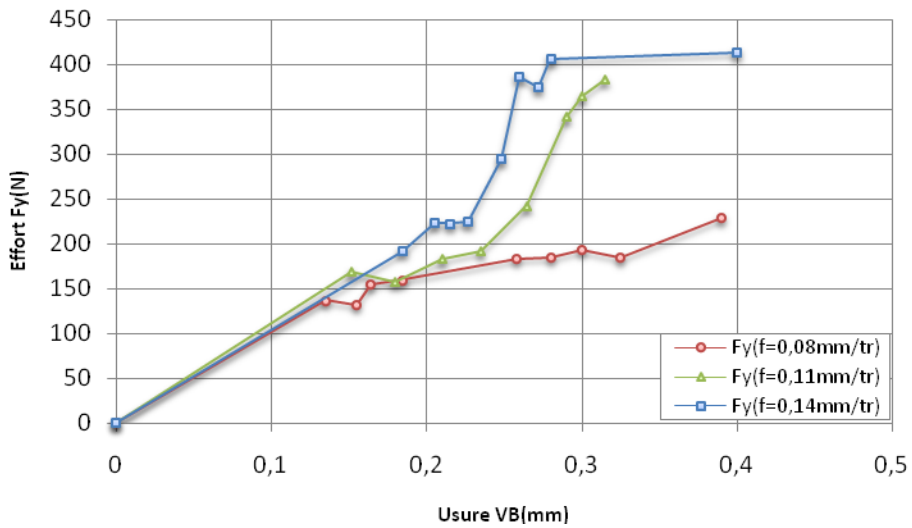
(c)



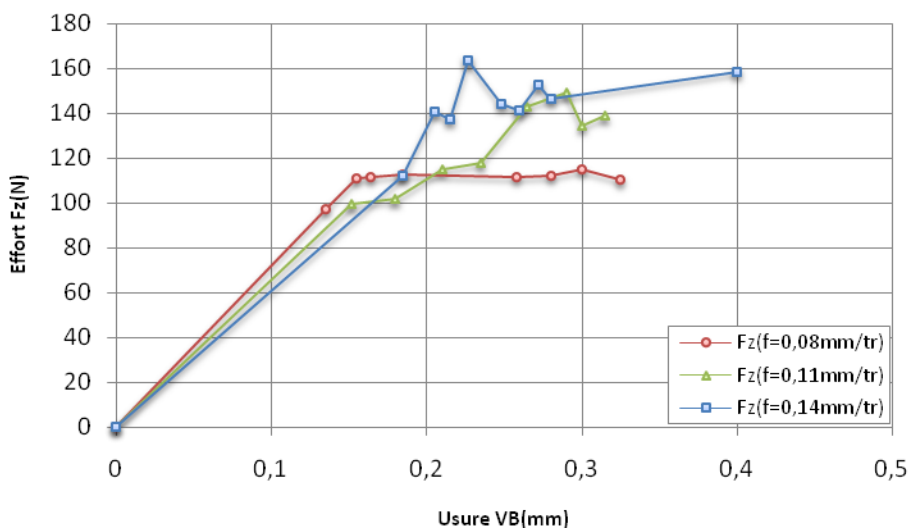
le VB



(a)



(b)



(c)

Figure III.14: Evolution des efforts de coupe en fonction de VB à trois avances pour $V_c=140$ m/min

III.6 Modèles de l'effort de coupe

III.6- 1 Détermination des modèles de l'effort en fonction du temps

A partir des courbes de l'effort en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe présentées dans les figures III.9, III.10 et III.11, on peut déterminer les modèles mathématiques qui expriment la relation entre les composantes de l'effort et le temps de coupe (Tableau III.3).

V_c (m/min)	f (mm/tr)	Modèles mathématiques de l'effort	Coefficient de détermination R^2
80	0,08	$F_x = -2.10^{-12} t^4 + 3.10^{-8} t^3 - 3.10^{-4} t^2 + 0,1345 t + 6,8344$	$R^2 = 0.8906$
		$F_y = -7.10^{-12} t^4 + 7.10^{-8} t^3 - 3.10^{-4} t^2 + 0,3676 t + 19,955$	$R^2 = 0.8783$
		$F_z = -2.10^{-12} t^4 + 2.10^{-8} t^3 - 9.10^{-5} t^2 + 0,1508 t + 8,2349$	$R^2 = 0.9895$
80	0,11	$F_x = -1.10^{-11} t^4 + 9.10^{-8} t^3 - 2.10^{-4} t^2 + 0.1746t + 6.0509$	$R^2 = 0.9387$
		$F_y = -4.10^{-11} t^4 + 3.10^{-7} t^3 - 6.10^{-4} t^2 + 0.4915t + 22.473$	$R^2 = 0.9203$
		$F_z = -4.10^{-11} t^4 + 2.10^{-7} t^3 - 5.10^{-4} t^2 + 0.4676t + 21.103$	$R^2 = 0.8592$
80	0,14	$F_x = -4.10^{-11} t^4 + 2.10^{-7} t^3 - 4.10^{-4} t^2 + 0.3082t + 9.888$	$R^2 = 0.8994$
		$F_y = -1.10^{-11} t^4 + 8.10^{-7} t^3 - 14.10^{-4} t^2 + 0.9328t + 24.519$	$R^2 = 0.8706$
		$F_z = -6.10^{-11} t^4 + 4.10^{-7} t^3 - 7.10^{-4} t^2 + 0.4992t + 15.17$	$R^2 = 0.9077$
110	0,08	$F_x = -3.10^{-11} t^4 + 2.10^{-7} t^3 - 3.10^{-4} t^2 + 0,2205 t + 2,8165$	$R^2 = 0.9833$
		$F_y = -1.10^{-10} t^4 + 5.10^{-7} t^3 - 8.10^{-4} t^2 + 0,6064 t + 4,1181$	$R^2 = 0.9833$
		$F_z = -6.10^{-11} t^4 + 3.10^{-7} t^3 - 6.10^{-4} t^2 + 0,4126 t + 5,7579$	$R^2 = 0.9833$
110	0,11	$F_x = -1.10^{-11} t^4 + 5.10^{-7} t^3 - 7.10^{-4} t^2 + 0.3505t + 2.1649$	$R^2 = 0.9697$
		$F_y = -4.10^{-11} t^4 + 2.10^{-6} t^3 - 2.10^{-3} t^2 + 1.0454t + 15.11$	$R^2 = 0.9731$
		$F_z = -2.10^{-10} t^4 + 7.10^{-7} t^3 - 1.10^{-3} t^2 + 0.5813t + 4.7865$	$R^2 = 0.9745$
110	0,14	$F_x = -4.10^{-11} t^4 + 2.10^{-7} t^3 - 3.10^{-4} t^2 + 0.2376t + 7.5391$	$R^2 = 0.9372$
		$F_y = -4.10^{-10} t^4 + 2.10^{-6} t^3 - 21.10^{-4} t^2 + 1.0721t + 23.042$	$R^2 = 0.9447$
		$F_z = -4.10^{-10} t^4 + 8.10^{-7} t^3 - 11.10^{-4} t^2 + 0.6641t + 10.01$	$R^2 = 0.9536$
140	0,08	$F_x = -5.10^{-11} t^4 + 2.10^{-7} t^3 - 3.10^{-4} t^2 + 0,2131 t + 0,2428$	$R^2 = 0.9833$
		$F_y = -2.10^{-10} t^4 + 9.10^{-7} t^3 - 13.10^{-4} t^2 + 0,8139 t + 1,136$	$R^2 = 0.9833$
		$F_z = -6.10^{-12} t^4 + 1.10^{-7} t^3 - 3.10^{-4} t^2 + 0,3433 t + 2,0207$	$R^2 = 0.9833$
140	0,11	$F_x = -3.10^{-11} t^4 + 2.10^{-7} t^3 - 3.10^{-4} t^2 + 0.2288t + 2.2116$	$R^2 = 0.9463$
		$F_y = -9.10^{-11} t^4 + 5.10^{-7} t^3 - 8.10^{-4} t^2 + 0.5776t + 7.6713$	$R^2 = 0.9411$
		$F_z = -6.10^{-11} t^4 + 3.10^{-7} t^3 - 6.10^{-4} t^2 + 0.4179t + 5.6974$	$R^2 = 0.9298$
140	0,14	$F_x = -3.10^{-9} t^4 + 5.10^{-6} t^3 - 32.10^{-4} t^2 + 0.8413t + 1.8574$	$R^2 = 0.9612$
		$F_y = -1.10^{-8} t^4 + 2.10^{-5} t^3 - 0.0121 t^2 + 2.7337t + 6.3141$	$R^2 = 0.9736$
		$F_z = -3.10^{-9} t^4 + 7.10^{-6} t^3 - 0.0052 t^2 + 1.5184t + 1.9714$	$R^2 = 0.9727$

Tableau III.3: Modèles mathématiques de l'effort en fonction du temps d'usinage.

III.6- 2 Détermination des modèles de l'effort en fonction de l'usure

A partir des courbes de l'effort en fonction de l'usure pour différentes vitesses de coupe présentées dans les figures III.12, III.13 et III.14, on peut déterminer les modèles mathématiques qui expriment la relation entre l'effort et l'usure en dépouille VB (Tableau III.4).

Vc (m/min)	f (mm/tr)	Modèles mathématiques de l'effort	Coefficient de détermination R ²
80	0,08	$F_x = -87154VB^4 + 70704VB^3 - 19084VB^2 + 1934VB + 5.9188$ $F_y = -303460VB^4 + 232394VB^3 - 59205VB^2 + 5612.4VB + 15.637$ $F_z = 18283VB^4 + 5597VB^3 - 6833VB^2 + 1423.8VB + 0.7014$	$R^2 = 0.9057$ $R^2 = 0.9043$ $R^2 = 0.9742$
80	0,11	$F_x = -25700VB^4 + 25896VB^3 - 8470.8VB^2 + 1135.7VB - 0.0617$ $F_y = -157635VB^4 + 126962VB^3 - 34090VB^2 + 3813.8VB + 0.5537$ $F_z = -269351VB^4 + 200027VB^3 - 49746VB^2 + 4702.8VB + 12.054$	$R^2 = 0.9941$ $R^2 = 0.9978$ $R^2 = 0.9203$
80	0,14	$F_x = -33073VB^4 + 32012VB^3 - 10748VB^2 + 1578.4VB + 0.7797$ $F_y = -154118VB^4 + 139270VB^3 - 41562VB^2 + 5096.6VB + 0.9454$ $F_z = -51603VB^4 + 50862VB^3 - 17120VB^2 + 2485.5VB + 1.3907$	$R^2 = 0.9673$ $R^2 = 0.9096$ $R^2 = 0.9683$
110	0,08	$F_x = -42423VB^4 + 38805VB^3 - 10652VB^2 + 1214.9VB - 0.0428$ $F_y = -223940VB^4 + 88411VB^3 - 47812VB^2 + 4567.3VB - 0.2612$ $F_z = -43105VB^4 + 37670VB^3 - 11830VB^2 + 1693.5VB + 0.0088$	$R^2 = 0.9879$ $R^2 = 0.9644$ $R^2 = 0.9944$
110	0,11	$F_x = -50244VB^4 + 44355VB^3 - 12031VB^2 + 1354.1VB - 0.0553$ $F_y = -276484VB^4 + 248549VB^3 - 67798VB^2 + 6758.6VB - 0.0658$ $F_z = 154328VB^4 - 97092VB^3 + 18057VB^2 - 378.73VB - 0.0449$	$R^2 = 0.9583$ $R^2 = 0.9916$ $R^2 = 0.9872$
110	0,14	$F_x = 42423VB^4 + 38805VB^3 - 10652VB^2 + 1214.9VB - 0.0428$ $F_y = 35718VB^4 + 33285VB^3 - 20651VB^2 + 3439.5VB + 0.0087$ $F_z = 69523VB^4 - 49725VB^3 + 10272VB^2 + 67.616VB + 0.0304$	$R^2 = 0.9879$ $R^2 = 0.9816$ $R^2 = 0.9889$
140	0,08	$F_x = -47616VB^4 + 36209VB^3 - 8452.5VB^2 + 943.48VB - 0.063$ $F_y = -213995VB^4 + 173418VB^3 - 44014VB^2 + 4550.5VB - 0.059$ $F_z = 48813VB^4 - 30088VB^3 + 3609.6VB^2 + 675.29VB - 0.0093$	$R^2 = 0.9911$ $R^2 = 0.9847$ $R^2 = 0.9966$
140	0,11	$F_x = 67624VB^4 - 43076VB^3 + 8070.8VB^2 - 143.37VB + 0.0203$ $F_y = 23953VB^4 - 6462.1VB^3 - 2344.4VB^2 + -2344.4VB + 0.1024$ $F_z = 16794VB^4 - 6204.3VB^3 - 845.4VB^2 + 843.56VB + 0.0727$	$R^2 = 0.9645$ $R^2 = 0.9743$ $R^2 = 0.9621$
140	0,14	$F_x = 3403.6VB^4 - 7631.2VB^3 + 3312.7VB^2 - 38.912VB + 0.0013$ $F_y = -608931VB^4 + 487938VB^3 - 122178VB^2 + 10804VB + 0.0212$ $F_z = 221994VB^4 - 191036VB^3 + 51155VB^2 - 3707VB - 0.0223$	$R^2 = 0.9851$ $R^2 = 0.9806$ $R^2 = 0.9764$

Tableau III.4: Modèles mathématiques de l'effort en fonction de l'usure.

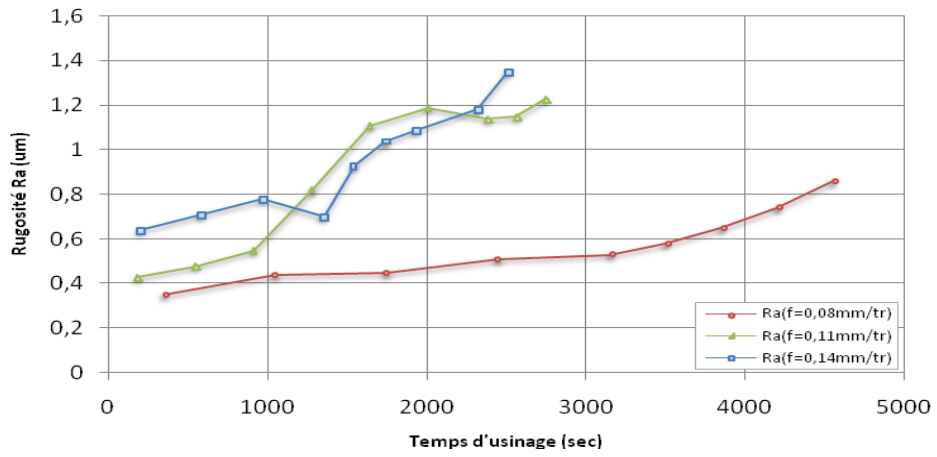
III.7 Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage et de l'usure VB

III.7- 1 Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage

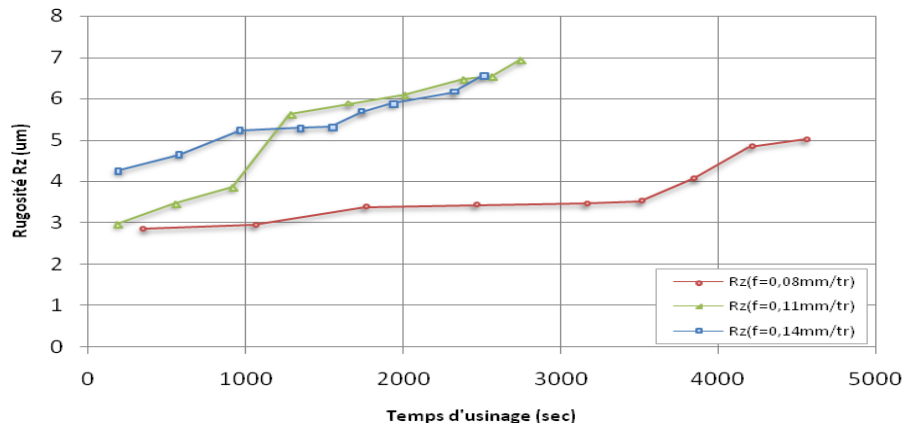
Les figures III-15, III-16 et III-17 présentent l'évolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à trois avances et pour trois vitesses différentes. On remarque que toutes les courbes prennent une allure ascendante ce qui signifie que le temps d'usinage a un effet important sur l'évolution de la rugosité. Aux vitesses de coupe de 80, 110 et 140 m/min, les rugosités Ra, Rt et Rz trouvées pour à $f=0,14$ mm/tr et à $f=0,11$ mm/tr sont plus grandes que celles obtenues à $f=0,08$ mm/tr. Pour les trois vitesses de coupe à un temps d'usinage de 1000 secondes, les rugosités Ra, Rt et Rz trouvées pour $f=0,11$ mm/tr sont plus grandes que celles obtenues à $f=0,08$ mm/tr.

Aussi, pour un temps de coupe de 1000 s, l'état de surface obtenu avec $V_c=80$ m/min et $f=0,08$ mm/tr est $R_a=0,44$ μm reste meilleure que ceux observés avec les autres avances(0,11 et 0,14) mm/tr ($R_a=0,61$ et 0,79) μm .

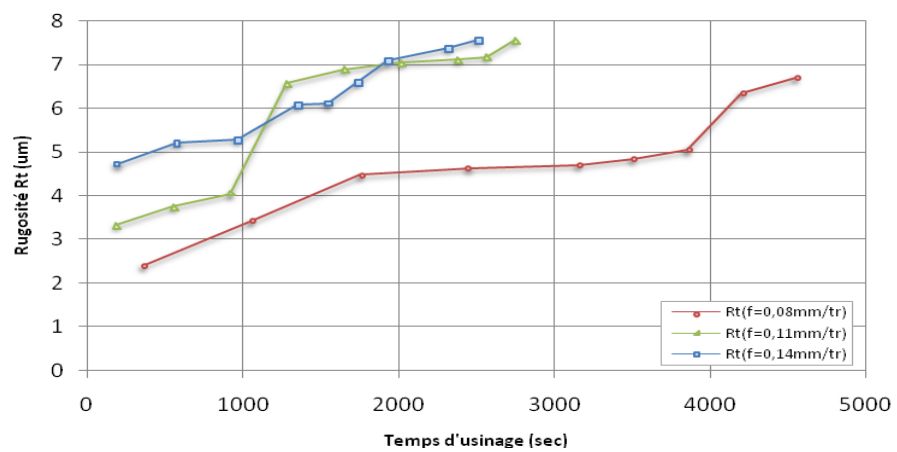
- Les valeurs maximales enregistrées pour Ra sont :
(0,86 ,1,23 et 1,35) μm pour la $V_c=80$ m/min, ($f=0,08$ mm/tr, 0,11 et 0,14) μm respictivement.
(0,91 ,1,28 et 1,35) μm pour la $V_c=110$ m/min, ($f=0,08$ mm/tr, 0,11 et 0,14) μm respictivement.
(1,54 ,1,17 et 1,06) μm pour la $V_c=140$ m/min, ($f=0,08$ mm/tr, 0,11 et 0,14) μm respictivement.
- Les valeurs maximales enregistrées pour Rz sont :
(5,03 ,6,95 et 6,58) μm pour la $V_c=80$ m/min, ($f=0,08$ mm/tr, 0,11 et 0,14) μm respictivement.
(6,75 ,6,86 et 6,80) μm pour la $V_c=110$ m/min, ($f=0,08$ mm/tr, 0,11 et 0,14) μm respictivement.
(8,07 ,6,95 et 6,33) μm pour la $V_c=140$ m/min, ($f=0,08$ mm/tr, 0,11 et 0,14) μm respictivement.
- Les valeurs maximales enregistrées pour Rt sont :
(6,96 ,7,57 et 7,56) μm pour la $V_c=80$ m/min, ($f=0,08$ mm/tr, 0,11 et 0,14) μm respictivement.
(7,58 ,7,53 et 7,09) μm pour la $V_c=110$ m/min, ($f=0,08$ mm/tr, 0,11 et 0,14) μm respictivement.
(9,24 ,7,34 et 6,74) μm pour la $V_c=140$ m/min, ($f=0,08$ mm/tr, 0,11 et 0,14) μm respictivement.



(a)

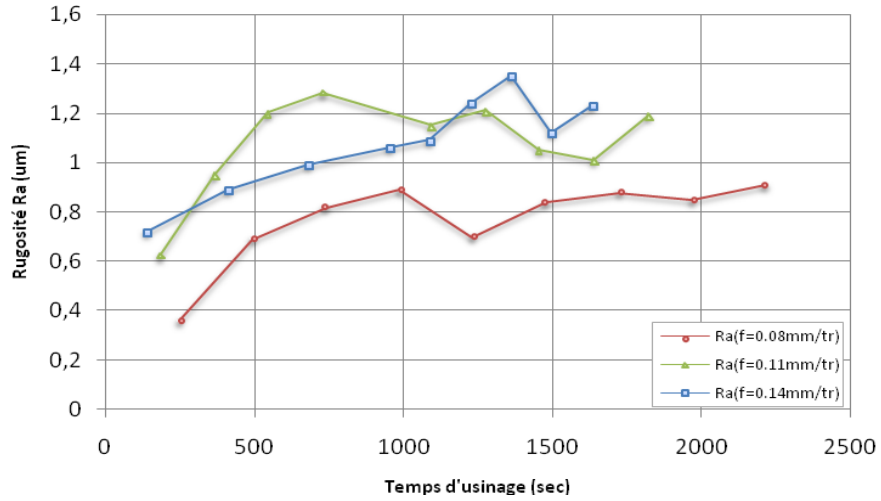


(b)

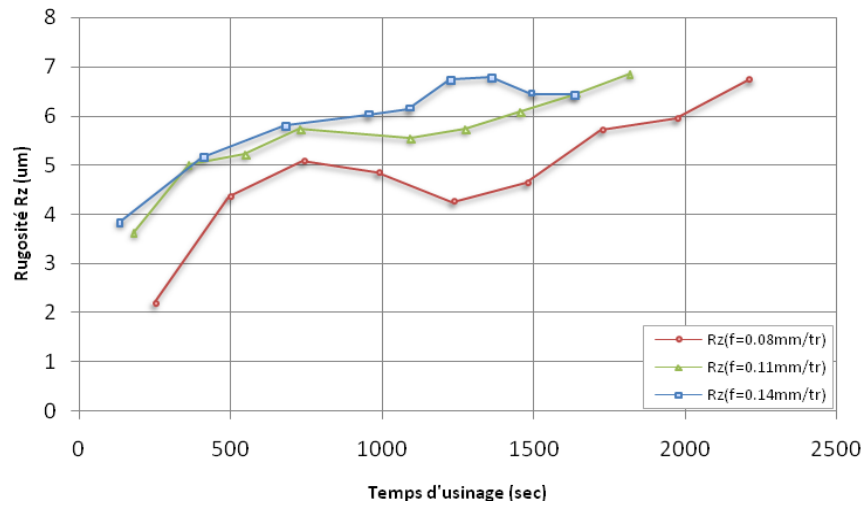


(c)

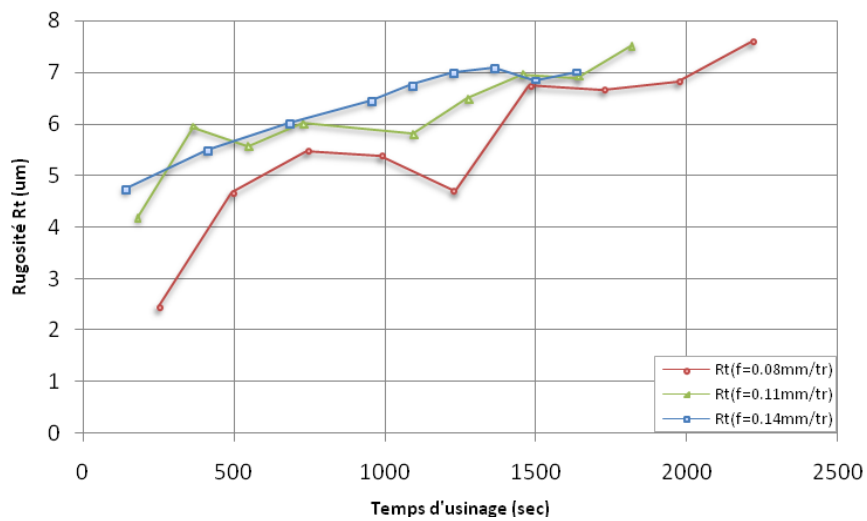
Figure III.15: Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à trois avances pour $V_c=80$ m/min



(a)

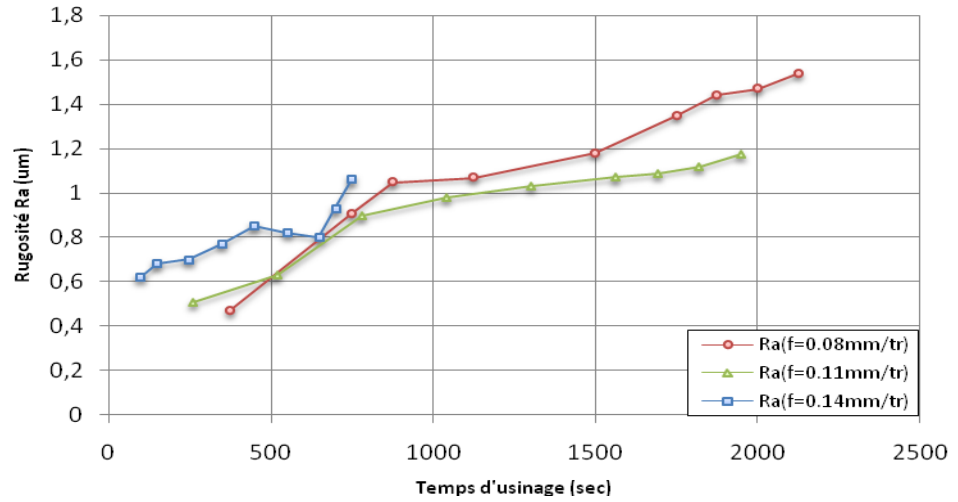


(b)

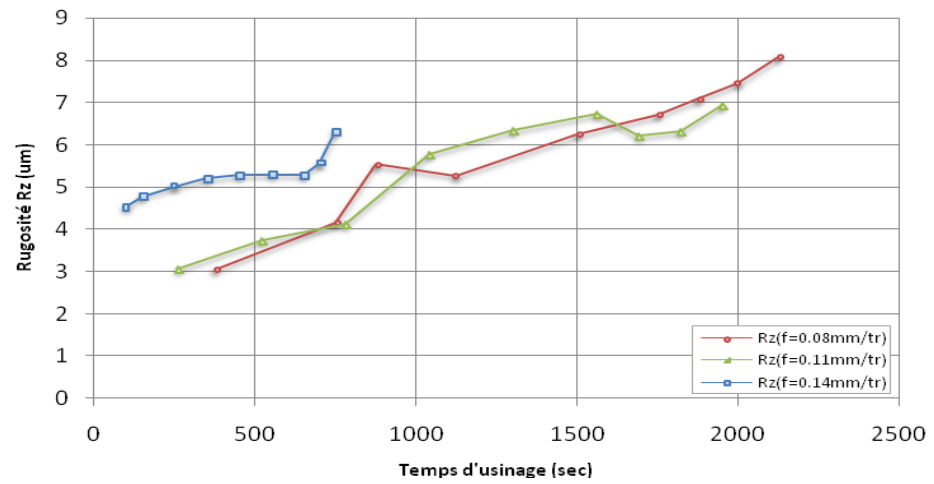


(c)

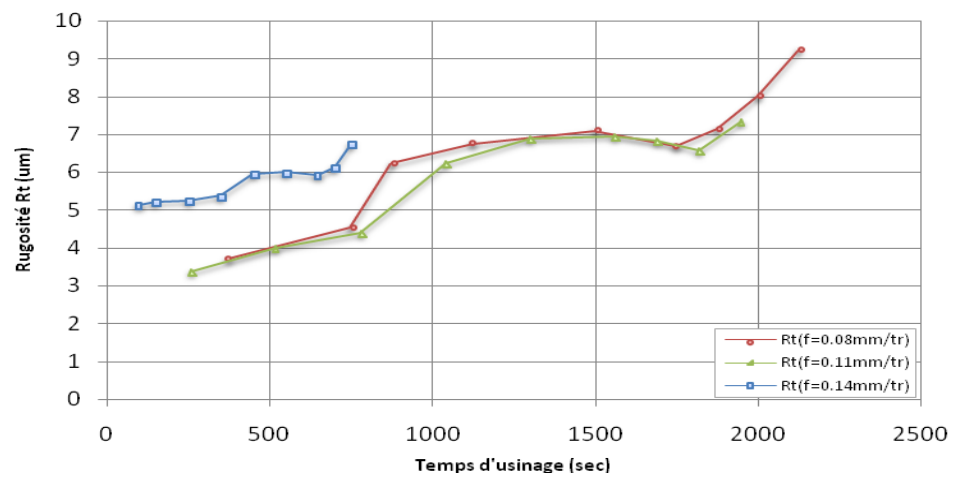
Figure III.16: Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à trois avances pour $V_c=110$ m/min



(a)



(b)



(c)

Figure III.17: Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à trois avances pour $V_c=140$ m/min

III.7- 2 Analyse de la rugosité en fonction l'usure VB

Les figures III-18, III-19 et III-20 présentent l'évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille pour trois vitesses et à trois avances différentes. Les rugosités Ra, Rt et Rz enregistrées à une avance $f = 0,14$ mm/tr pour ($V_c=80$ et $V_c=110$) m/min, sont plus grandes que celles obtenues à ($f = 0,11$ et $f = 0,08$) mm/tr pour les mêmes vitesses de coupe. Avec l'accroissement de l'usure, l'arête de coupe se dégrade et produit des profils d'état de surface différents.

A $V_c=140$ m/min, les courbes des rugosités prennent des allures ascendantes à cause de l'augmentation de l'usure VB.

Pour $V_c=80$ m/min :

Sur le plan expérimental, pour $V_c=80$ m/min et lorsque l'usure VB à est égale 0,15 mm, les rugosités ($R_{a0,08}$; $R_{a0,11}$ et $R_{a0,14}$) enregistrés sont (0,45 ; 0,55 et 0,78) μm .

Pour VB=0,31 mm, les rugosités ($R_{a0,08}$; $R_{a0,11}$ et $R_{a0,14}$) sont (0,74 ; 1,15 et 1,09) μm , ce qui représente une augmentation d'environ de (64,44% ; 109,09% et 39,74%).

Pour $V_c=110$ m/min :

Sur le plan expérimental, pour $V_c=110$ m/min et lorsque l'usure VB à est égale 0,21mm, les rugosité ($R_{a0,08}$; $R_{a0,11}$ et $R_{a0,14}$) enregistrés sont (0,82 ; 1,01 et 0,99) μm .

Pour VB=0,30 mm, les rugosités ($R_{a0,08}$; $R_{a0,11}$ et $R_{a0,14}$) sont (0,85 ; 1,2 et 1,12) μm , ce qui représente une augmentation d'environ de (03,65% ; 18,81% et 13,13%).

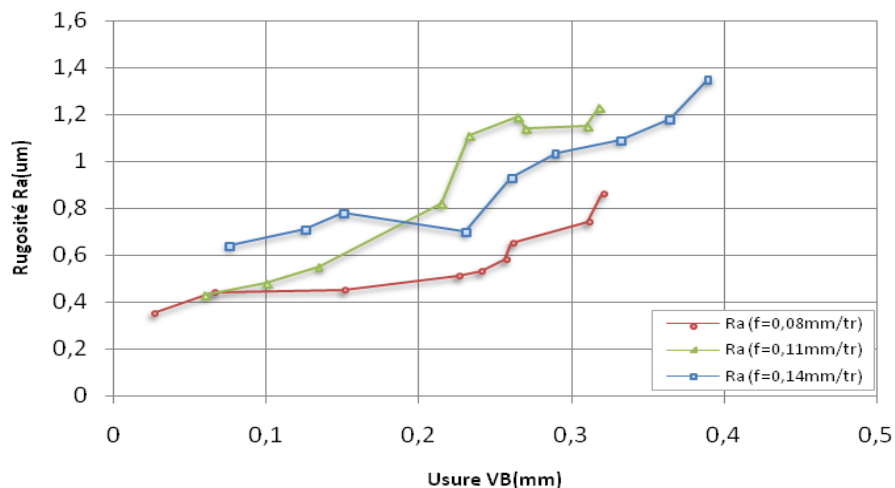
Pour $V_c=140$ m/min :

Sur le plan expérimental, pour $V_c=140$ m/min et lorsque l'usure VB égale 0,185 mm, les rugosités ($R_{a0,08}$; $R_{a0,11}$ et $R_{a0,14}$) enregistrés sont (1,07 ; 0,63 et 0,62) μm .

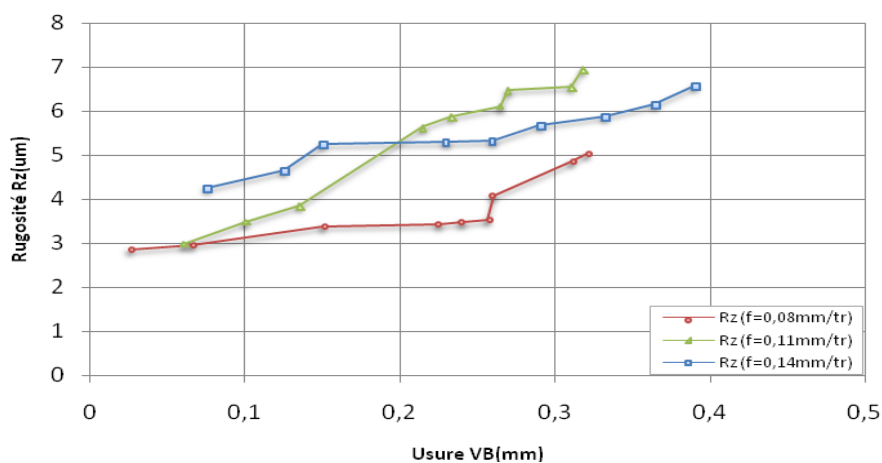
Pour VB=0,30 mm les rugosités ($R_{a0,08}$; $R_{a0,11}$ et $R_{a0,14}$) sont (1,44 ; 1,09 et 0,93) μm , ce qui représente une augmentation d'environ de (34,58% ; 73,01% et 50%).

A $V_c=140$ m/min et pour un temps d'usinage supérieur à 08 minute et 40 sec (520 secondes), les rugosités Ra, Rt et Rz relatives à $f = 0,11$ mm/tr deviennent plus importantes que celles trouvées à $f = 0,14$ mm/tr.

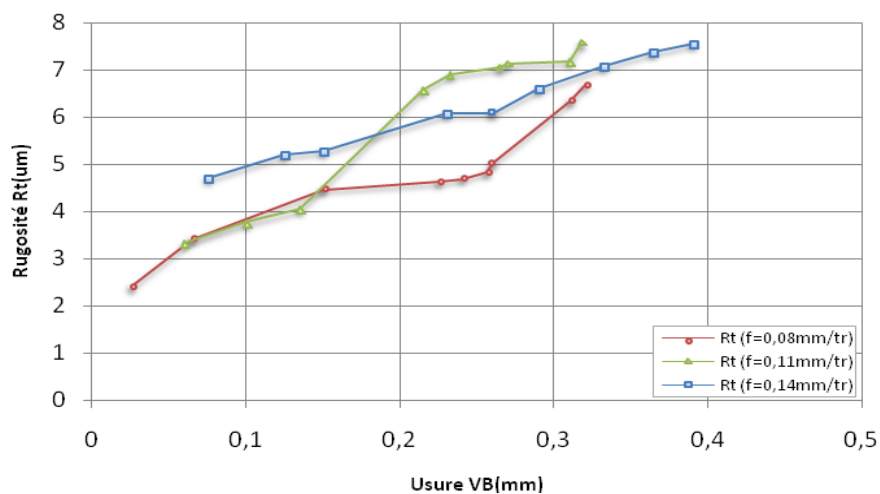
L'augmentation de l'usure mène à une augmentation accélérée des différents critères de la rugosité, cela peut être expliqué par la modification de la géométrie de l'outil ce qui conduit à une dégradation de la surface usinée.



(a)

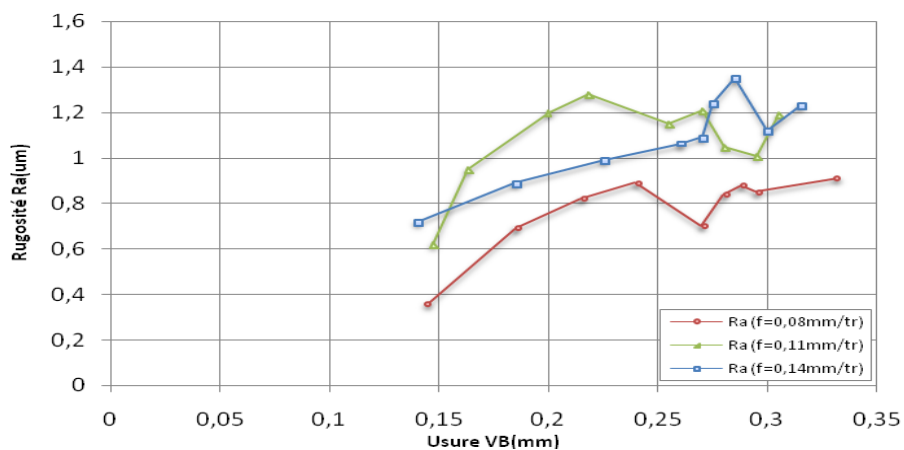


(b)

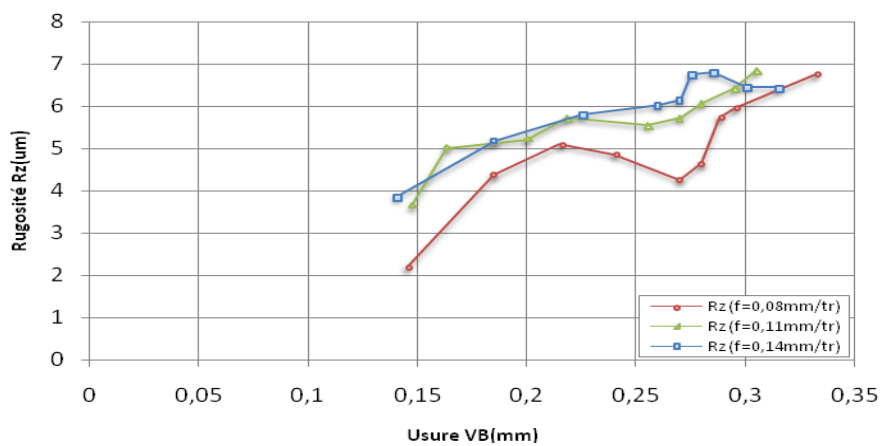


(c)

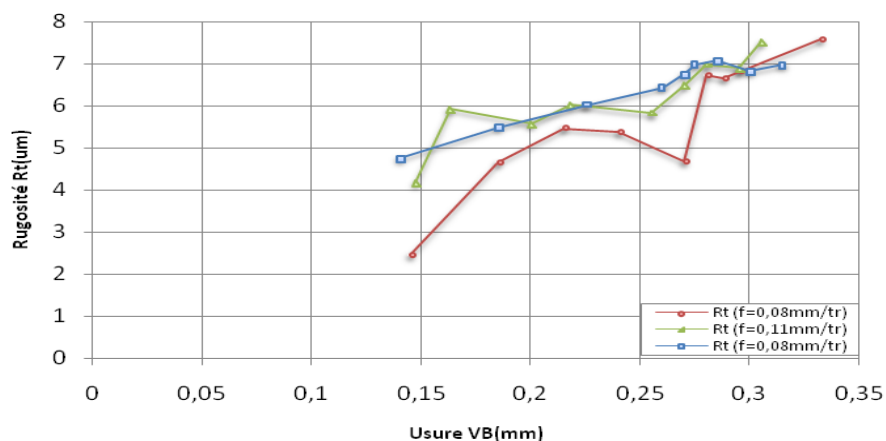
Figure III.18: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure VB à trois avances pour $V_c=80$ m/min



(a)

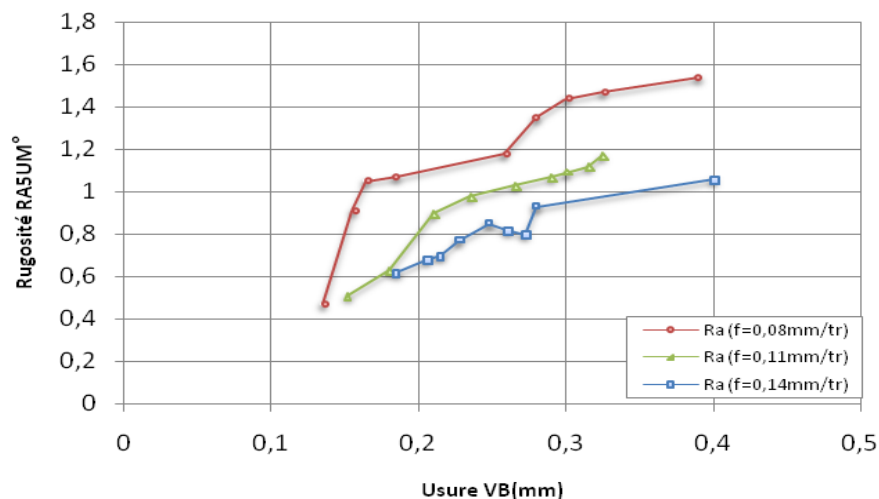


(b)

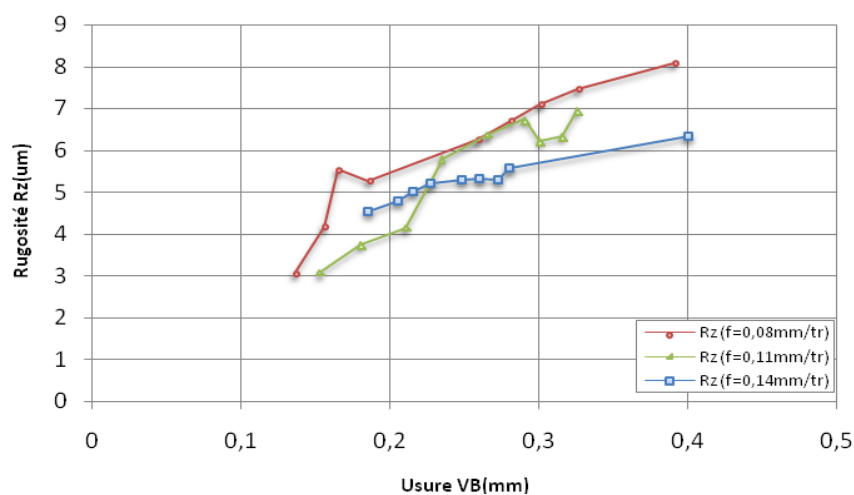


(c)

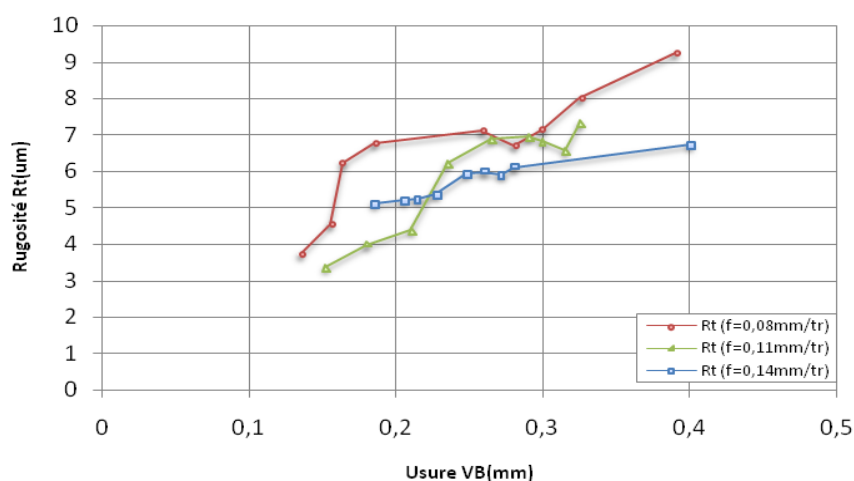
Figure III.19: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure VB à trois avances pour $V_c=110$ m/min



(a)



(b)



(c)

Figure III.20: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure VB à trois avances pour $V_c=140$ m/min

III.8 Modèles de la rugosité

III.8- 1 Détermination des modèles de la rugosité en fonction du temps

A partir des courbes de la rugosité en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe présentées dans les figures III.15, III.16 et III.17, on peut déterminer les modèles mathématiques qui expriment la relation entre les rugosités et le temps de coupe pour différentes vitesses de coupe et différentes avances (Tableau III.5).

V_c (m/min)	f (mm/tr)	Modèles mathématiques de la rugosité	Coefficient de détermination R^2
80	0,08	$R_a = 2.10^{-11} t^3 - 1.10^{-7} t^2 + 2.10^{-3} t + 0.2794$	$R^2 = 0.996$
		$R_z = 9.10^{-11} t^3 - 5.10^{-7} t^2 + 0.0011 t + 2.484$	$R^2 = 0.9502$
		$R_t = 2.10^{-10} t^3 - 1.10^{-6} t^2 + 0.0037 t + 1.1693$	$R^2 = 0.9701$
80	0,11	$R_a = -2.10^{-10} t^3 - 6.10^{-7} t^2 + 1.10^{-3} t + 0.436$	$R^2 = 0.963$
		$R_z = -2.10^{-10} t^3 + 4.10^{-7} t^2 + 0.001 t + 2.501$	$R^2 = 0.959$
		$R_t = -5.10^{-10} t^3 + 1.10^{-6} t^2 + 0.001 t + 2.878$	$R^2 = 0.925$
80	0,14	$R_a = -8.10^{-12} t^3 - 1.10^{-7} t^2 - 5.10^{-5} t + 0.659$	$R^2 = 0.935$
		$R_z = -3.10^{-10} t^3 - 1.10^{-6} t^2 + 0.002 t + 3.892$	$R^2 = 0.980$
		$R_t = -3.10^{-10} t^3 - 1.10^{-6} t^2 + 1.10^{-3} t + 4.788$	$R^2 = 0.980$
110	0,08	$R_a = -4.10^{-12} t^3 - 1.10^{-6} t^2 + 0.002 t + 0.017$	$R^2 = 0.863$
		$R_z = -3.10^{-9} t^3 - 1.10^{-5} t^2 + 0.012 t + 0.052$	$R^2 = 0.888$
		$R_t = -2.10^{-9} t^3 - 7.10^{-6} t^2 + 0.009 t + 0.721$	$R^2 = 0.874$
110	0,11	$R_a = -1.10^{-9} t^3 - 4.10^{-6} t^2 + 0.003 t + 0.029$	$R^2 = 0.951$
		$R_z = -3.10^{-9} t^3 - 9.10^{-6} t^2 + 0.009 t + 2.306$	$R^2 = 0.969$
		$R_t = -2.10^{-9} t^3 - 7.10^{-6} t^2 + 0.007 t + 3.356$	$R^2 = 0.875$
110	0,14	$R_a = -2.10^{-10} t^3 + 3.10^{-7} t^2 + 1.10^{-3} t + 0.691$	$R^2 = 0.868$
		$R_z = -3.10^{-10} t^3 - 2.10^{-6} t^2 + 0.005 t + 3.261$	$R^2 = 0.958$
		$R_t = -6.10^{-10} t^3 + 5.10^{-7} t^2 + 0.002 t + 4.456$	$R^2 = 0.9833$
140	0,08	$R_a = 4.10^{-10} t^3 - 2.10^{-6} t^2 + 0.002 t + 0.282$	$R^2 = 0.986$
		$R_z = 1.10^{-9} t^3 - 6.10^{-6} t^2 + 0.009 t + 0.242$	$R^2 = 0.972$
		$R_t = 3.10^{-9} t^3 - 1.10^{-5} t^2 + 0.015 t - 0.847$	$R^2 = 0.906$
140	0,11	$R_a = -2.10^{-10} t^3 - 7.10^{-7} t^2 + 0.001 t + 0.178$	$R^2 = 0.978$
		$R_z = -1.10^{-9} t^3 + 2.10^{-6} t^2 + 0.001 t + 2.399$	$R^2 = 0.944$
		$R_t = -1.10^{-9} t^3 - 3.10^{-6} t^2 + 0.001 t - 2.764$	$R^2 = 0.938$
140	0,14	$R_a = 5.10^{-9} t^3 - 7.10^{-6} t^2 + 0.002 t + 0.396$	$R^2 = 0.900$
		$R_z = 3.10^{-8} t^3 - 4.10^{-5} t^2 + 0.014 t + 3.404$	$R^2 = 0.930$
		$R_t = 5.10^{-9} t^3 - 5.10^{-6} t^2 + 0.003 t - 4.840$	$R^2 = 0.885$

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

III.8- 2 Détermination des modèles de la rugosité en fonction de l'usure

A partir des courbes de la rugosité en fonction de l'usure pour différentes vitesses de coupe présentées dans les figures III.18, III.19 et III.20, on peut déterminer les modèles mathématiques qui expriment la relation entre les rugosités et l'usure en dépouille VB (Tableau III.4).

Vc (m/min)	f (mm/tr)	Modèles mathématiques de la rugosité	Coefficient de détermination R ²
80	0,08	Ra = 51.06VB ³ - 20,64VB ² + 3.065VB + 0.294	R ² =0.967
		Rz = 288.1VB ³ - 118VB ² + 16.46VB + 2.452	R ² =0.959
		Rt = 599.1VB ³ - 305.1VB ² + 53.52VB + 1.181	R ² =0.996
80	0,11	Ra = -133.1VB ³ + 76.59VB ² - 9.544VB + 0.770	R ² =0.967
		Rz = -279.3VB ³ + 149.7VB ² - 7.272VB + 2.925	R ² =0.990
		Rt = -620.8VB ³ + 330.7VB ² - 32.72VB + 4.237	R ² =0.984
80	0,14	Ra = 17.16VB ³ - 5.543VB ² + 1.534VB + 0.564	R ² =0.939
		Rz = 177.1VB ³ - 121.7VB ² + 30.89VB + 2.532	R ² =0.972
		Rt = -1.112VB ³ + 6.984VB ² + 6.084VB + 4.250	R ² =0.991
110	0,08	Ra = 318.6VB ³ - 250.4VB ² + 65.28VB - 4.816	R ² =0.902
		Rz = 2813VB ³ - 2050VB ² + 498.4VB - 35.52	R ² =0.890
		Rt = 1793VB ³ - 1329VB ² + 340.4VB - 24.34	R ² =0.874
110	0,11	Ra = 816,1VB ³ - 612,4VB ² + 149,8VB - 10,75	R ² =0.919
		Rz = 3254VB ³ - 2241VB ² + 513,8VB - 33,60	R ² =0.958
		Rt = 2958VB ³ - 1993VB ² + 448,3VB - 27,66	R ² =0.860
110	0,14	Ra = -122,1VB ³ + 77,98VB ² - 12,75VB + 1,320	R ² =0.832
		Rz = -116,4VB ³ - 10,70VB ² + 38,88VB - 1,031	R ² =0.947
		Rt = -580,4VB ³ + 361,3VB ² - 57,20VB + 7,293	R ² =0.971
140	0,08	Ra = 174,0VB ³ - 153,8VB ² + 45,78VB - 3,217	R ² =0.916
		Rz = 683,8VB ³ - 596,8VB ² + 179,8VB - 11,74	R ² =0.945
		Rt = 1448VB ³ - 1183VB ² + 320,2VB - 21,46	R ² =0.928
140	0,11	Ra = 115,6VB ³ - 102,4VB ² + 32,15VB - 2,442	R ² =0.979
		Rz = -1154VB ³ + 734,1VB ² - 123,9VB + 8,947	R ² =0.945
		Rt = 1476VB ³ + 952,3VB ² - 170,6VB + 12,43	R ² =0.940
140	0,14	Ra = 19,99VB ³ - 23,40VB ² + 10,39VB - 0,633	R ² =0.936
		Rz = 434,1VB ³ - 386,0VB ² + 117,8VB - 6,799	R ² =0.979
		Rt = 387,6VB ³ - 305,3VB ² - 66,94VB + 9,467	R ² =0.958

Tableau III. 6 : Modèles mathématiques de la rugosité en fonction de l'usure.

III.9 Conclusion

Les essais d'usinage effectués sur l'acier X210Cr12 traité à 54HRC, nous ont permis d'une part d'étudier l'influence du temps d'usinage sur l'usure, les efforts de coupe et sur la rugosité des surfaces usinées pour trois avances et à trois vitesses différentes. D'autre part, l'évolution des efforts de coupe et de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille a été mise en évidence.

D'après les résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Le temps d'usinage a une grande influence sur l'usure ;
- ✓ L'effet de la vitesse de coupe et l'avance sur l'usure est important.
- ✓ L'usure est régulière pour toutes les conditions de coupe testées ;
- ✓ L'usure en cratère KT est négligeable devant l'usure en dépouille VB ;
- ✓ La rugosité est très affectée par l'avance et par l'usure ;
- ✓ L'usure et le temps d'usinage ont un grand impact sur les efforts de coupe.
- ✓ Les différents modèles proposés permettent de prédire l'usure, la durée de vie, les efforts de coupe et la rugosité en fonctions du temps d'usinage et les conditions de coupe.

Chapitre IV

Prédiction de l'usure de la céramique CC6050 face à l'acier X210Cr12

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (V_c , f , et ap) et les paramètres technologiques étudiés (usure, rugosité et effort de coupe) lors de l'usinage de l'acier fortement allié X210 Cr12 avec un outil de coupe en céramique mixte CC6050. Pour faire une analyse de variance (ANOVA) et pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (RMS), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « **MINITAB 15** ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés.

IV.2 Résultats avec l'outil céramique mixte CC6050

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe (V_c , f , ap) sur la rugosité de la surface, les efforts de coupe et l'usure de l'outil, nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, chaque facteur varie à trois niveaux (3^3). Dans cette recherche, le tableau orthogonal standard de Taguchi L27 est adopté comme conception expérimentale. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe. Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau II-8 (voir le Chapitre II). Le tableau orthogonal standard de Taguchi L27 à 27 lignes correspondre au nombre d'essais (26 degrés de liberté) à 13 colonnes à trois niveaux. Les résultats expérimentaux obtenus sont consignés au tableau IV.1. Ces résultats vont nous servir à la détermination des modèles mathématiques qui expriment la relation entre les paramètres d'entrées (V_c , f , ap) et les paramètres de sorties (critères de rugosité R_a , R_t , R_z ; les composantes de l'effort de coupe F_x , F_y , F_z et l'usure en dépouille VB). L'intérêt de cette modélisation est de faire des prédictions.

Tous les essais ont été réalisés avec un volume de copeau constant $V=97 \text{ cm}^3$, et chaque essai est réalisé avec une nouvelle arête de coupe.

Chapitre IV : Prédiction de l'usure de la céramique CC6050 face à l'acier X210Cr12

N° Essai	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Ap (mm)	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	VB (mm)
1	106	0,08	0,25	0,44	2,72	3,42	165,10	371,86	118,41	0,13
2	106	0,08	0,5	0,57	2,92	3,71	143,93	225,9	201,97	0,11
3	106	0,08	0,75	0,61	2,88	3,85	196,52	308,98	306,85	0,111
4	106	0,12	0,25	0,74	3,97	4,47	85,90	194,21	139,66	0,264
5	106	0,12	0,5	0,70	0,12	3,99	150,95	258,93	234,98	0,106
6	106	0,12	0,75	0,95	4,88	5,56	236,36	356,12	374,61	0,12
7	106	0,16	0,25	0,96	4,75	4,99	95,59	227,6	190,83	0,11
8	106	0,16	0,5	1,06	5,58	5,98	192,28	446,58	242,81	0,449
9	106	0,16	0,75	1,32	6,44	7,88	405,01	802,44	391,22	0,701
10	150	0,08	0,25	0,35	2,27	2,45	149,83	297,26	103,62	0,18
11	150	0,08	0,5	0,53	2,7	3,46	141,29	231,97	191,67	0,102
12	150	0,08	0,75	0,58	2,99	3,35	190,96	277,59	266,99	0,149
13	150	0,12	0,25	0,52	2,99	3,45	103,03	274,06	132,74	0,156
14	150	0,12	0,5	0,84	4,01	4,91	230,14	391,1	234,86	0,383
15	150	0,12	0,75	0,91	4,27	4,87	254,50	419,55	355,11	0,425
16	150	0,16	0,25	1,29	6,28	6,76	186,88	545,81	177,45	0,21
17	150	0,16	0,5	1,29	5,96	7,32	248,76	681,43	291,9	0,632
18	150	0,16	0,75	0,94	4,83	5,36	389,66	621,51	375,82	0,786
19	215	0,08	0,25	0,34	1,99	2,3	122,48	323,1	97,11	0,529
20	215	0,08	0,5	0,42	2,57	3,14	153,72	285,76	181,18	0,13
21	215	0,08	0,75	0,89	4,14	5,41	223,68	307,64	265,48	0,66
22	215	0,12	0,25	0,64	3,35	3,86	246,11	118,71	415,8	0,125
23	215	0,12	0,5	0,75	3,6	3,76	206,19	628,19	203,47	0,45
24	215	0,12	0,75	0,68	3,53	4,38	211,33	325,77	371,29	0,116
25	215	0,16	0,25	1,93	8,05	8,39	108,64	450,54	151,76	0,583
26	215	0,16	0,5	1,53	7,36	8,86	41,69	186,17	64,23	0,643
27	215	0,16	0,75	3,73	16,77	23,52	80,05	545,19	180,02	0,825

Tableau IV.1 : Résultats de la rugosité, effort de coupe et usure en dépouille en fonction des paramètres du régime de coupe (Le tableau orthogonal standard de Taguchi L27 ; $N=3^3$).

IV.3 Modèle de l'usure en dépouille VB en fonction des paramètres de coupe.

Les résultats présentés dans le tableau IV.1 sont analysés par le logiciel MINITAB 15 en appliquant l'analyse de variance (ANOVA). L'objectif de cette étude est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur l'usure en dépouille VB. Cette analyse a été effectuée pour un niveau de signification de 5% et pour un niveau de confiance de 95%.

IV.3- 1 Analyse de la variance (ANOVA) pour VB

Coefficients de régression estimés pour VB		Analyse des variances pour VB						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Vc (m/min)	-0,106741	Vc (m/min)	2	0,21367	0,10684	2,68	0,128	13,41
f (mm/tr)	-0,0042963	f (mm/tr)	2	0,58750	0,29375	7,38	0,015	36,88
ap (mm)	-0,106741	ap (mm)	2	0,01259	0,00629	0,16	0,856	0,79
Vc*f	-0,101852	Vc*f	4	0,12095	0,03024	0,76	0,580	7,59
Vc*ap	0,0028148	Vc*ap	4	0,16560	0,04140	1,04	0,444	10,39
f*ap	-0,0277407	f*ap	4	0,17423	0,04356	1,09	0,421	10,93
Constante	0,340185	Erreur	8	0,31847	0,03981			
Coefficient de détermination R ² = 80,01%		Total	26	1,59301				

$$S = 0,199523 \quad R-Sq = 80,01\% \quad R-Sq(adj) = 66,83\%$$

Tableau IV. 2 : Analyse de la variance (ANOVA) pour VB en utilisant les valeurs non codées (modèle linéaire complet).

D'après le tableau IV.2, on peut voir que le facteur de l'avance (P-value=0,015) a une grande influence sur l'usure en dépouille VB avec une contribution de 36,88%. Ensuite viens en deuxième lieu la vitesse de coupe avec une contribution de 13,41%. Les interactions Vc*f, Vc*ap et f*ap ont successivement une contribution de 07,59%, 10,39% et 10,93%.

IV.3- 2 Analyse de régression

L'équation (IV.I) exprime le modèle de l'usure en dépouille VB avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$VB = 0,340185 - 0,1067417 Vc - 0,0042963 f - 0,106741 ap - 0,101852 Vc*f + 0,0028148 Vc*ap - 0,0277407 f*ap \dots \dots \dots (IV-1)$$

Où R²=80,01%

IV.3- 3 Graphique des effets principaux pour VB

La figure IV.1 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur l'usure VB.

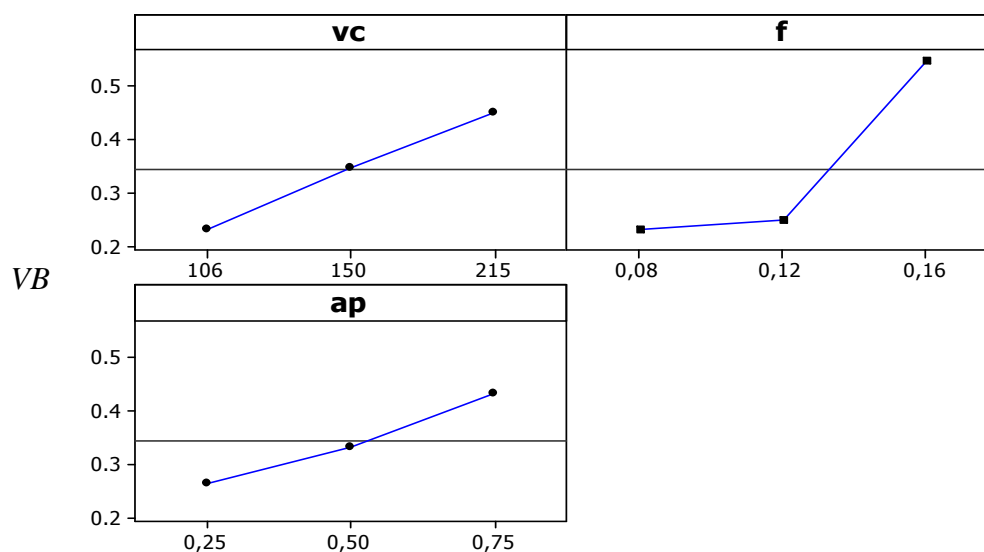


Figure IV.1 : Graphique des effets principaux pour VB

Cette figure montre que l'avance a un effet significatif sur la composante VB. En effet, on remarque que la pente du paramètre f est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de la profondeur de passe.

L'analyse des résultats de la figure IV.1 montre que l'augmentation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe entraîne une augmentation de l'usure VB.

IV.3- 4 Diagramme des interactions pour VB

L'étape suivante consiste donc à considérer l'interaction significative. Bien que nous avons déjà vérifié l'interaction significative via les résultats du (tableau IV.2), le diagramme des interactions nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. Le diagramme de la figure IV.2 montre l'impact exercé par la variation des valeurs d'un facteur sur un autre facteur.

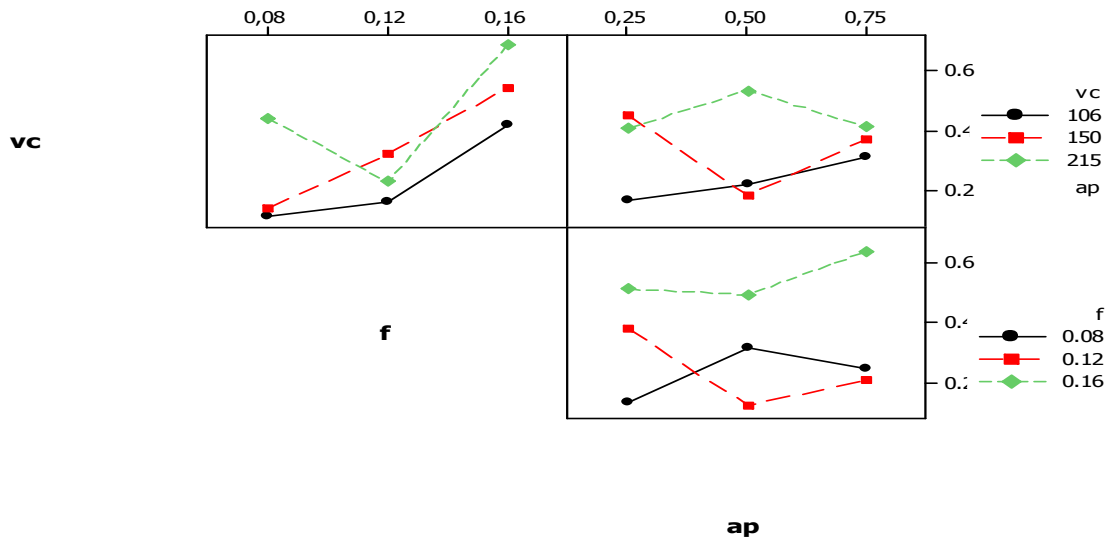
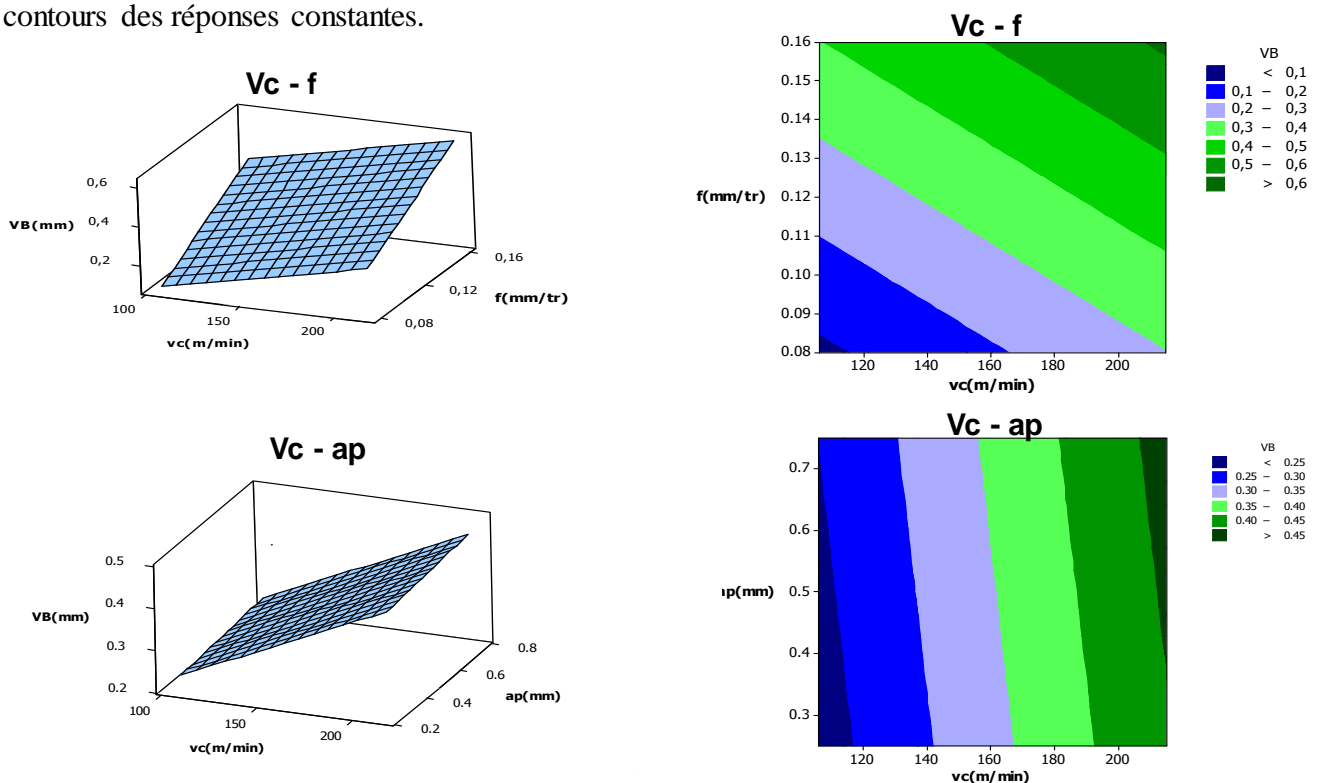


Figure IV.2 Graphe des interactions pour VB

IV.3- 5 Evolution de l'usure VB en fonction des paramètres du régime de coupe

La présentation en 3D (figure IV.4) montre que la pente de l'avance est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'usure VB.

D'autre part les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas VB) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.



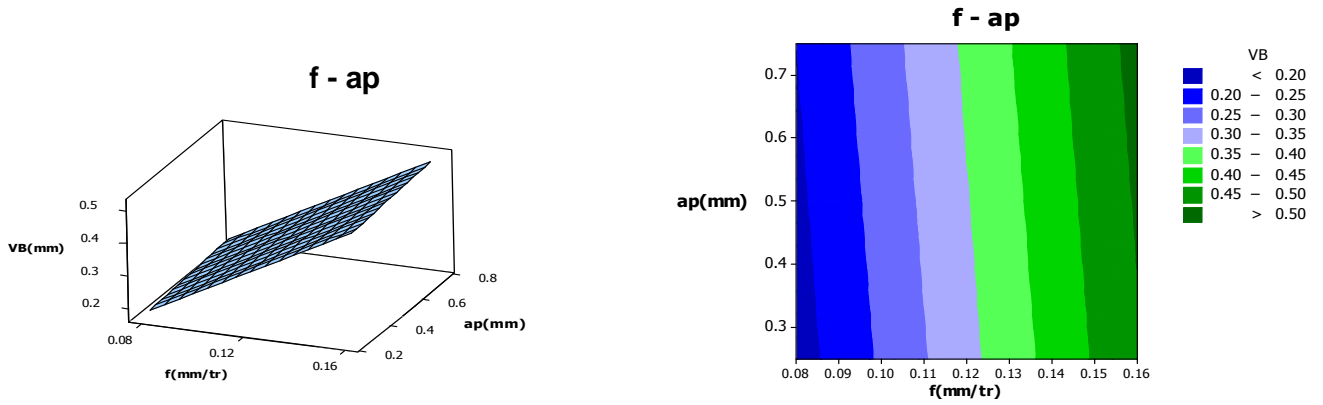


Figure IV.4: Diagramme de surface pour VB en fonction de Vc, f et ap et les graphes de contour

IV-4 Modèle de la rugosité Ra en fonction des paramètres de coupe

IV.4- 1 Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra

Les résultats présentés dans le tableau IV.3 (ANOVA) sont analysés par le logiciel MINITAB. En appliquant l'analyse de la variance, nous considérons un intervalle de confiance de 95% ($\alpha=0.05$), on constate que les facteurs de base (f et Vc) et l'interaction de la vitesse de coupe avec l'avance ont un impact significatif sur Ra, par contre la profondeur de coupe et les autres interactions n'ont pas un effet significatif puisque ses valeurs de la probabilité P est supérieur à 0,05.

Dans ce cas l'avance est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 45,45%.

Coefficients de régression estimés pour Ra		Analyse des variances pour Ra						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Vc (m/min)	-0,128148	Vc (m/min)	2	0,9659	0,4829	4,81	0,042	08,20
f (mm/tr)	-0,139259	f (mm/tr)	2	5,3498	2,6749	26,65	0,000	45,45
ap (mm)	-0,419259	ap (mm)	2	0,3533	0,1766	1,76	0,233	03,00
Vc*f	-0,197037	Vc*f	4	2,2056	0,5514	5,49	0,020	18,74
Vc*ap	-0,137037	Vc*ap	4	1,1776	0,2944	2,93	0,091	10,00
f*ap	0,142963	f*ap	4	0,9140	0,2285	2,28	0,150	07,76
Constante	0,944815	Erreur	8	0,8029	0,1004			
Coefficient de détermination R ² = 93,18%		Total	26	11,7691				

$$S = 0,316800 \quad R-Sq = 93,18\% \quad R-Sq(adj) = 77,83\%$$

Tableau IV. 3 : Résultats de l'analyse de la variance pour Ra

IV.4- 2 Analyse de régression

L'équation (IV.2) exprime le modèle de la rugosité Ra avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Ra = 0,944815 - 0,128148 Vc - 0,139259 f - 0,419259 ap - 0,197037 Vc*f - 0,137037 Vc*ap + 0,142963 f*ap \dots\dots\dots (IV-2)$$

Où $R^2 = 93,18\%$

IV.4- 3 Graphique des effets principaux pour Ra

La figure IV.5 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Ra.

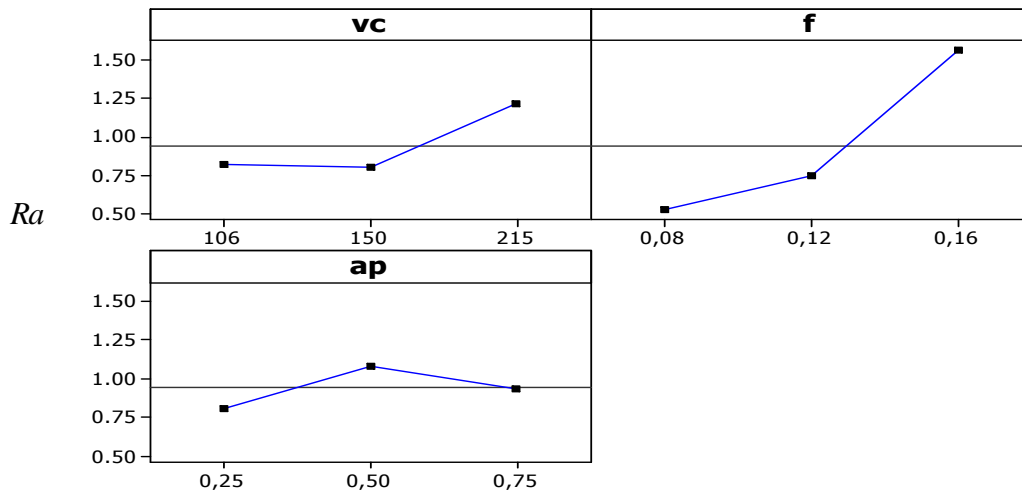


Figure IV.5 : Graphique des effets principaux pour Ra

L'avance a un effet significatif sur la composante Ra. En effet, on remarque bien que la pente du paramètre de l'avance f est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de la profondeur de passe, il est donc le facteur le plus influent sur la rugosité Ra suivie par la vitesse de coupe.

IV.4- 4 Diagramme des interactions pour Ra

La figure IV.6 présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. Ce diagramme montre l'impact exercé par la variation des valeurs d'un facteur sur un autre facteur. On remarque que

pour le cas des interactions $V_c \cdot a_p$ et $a_p \cdot f$, les lignes ne sont pas parallèles ce qui confirme l'existence d'une interaction entre la vitesse de coupe et la profondeur de passe, la profondeur de passe et l'avance.

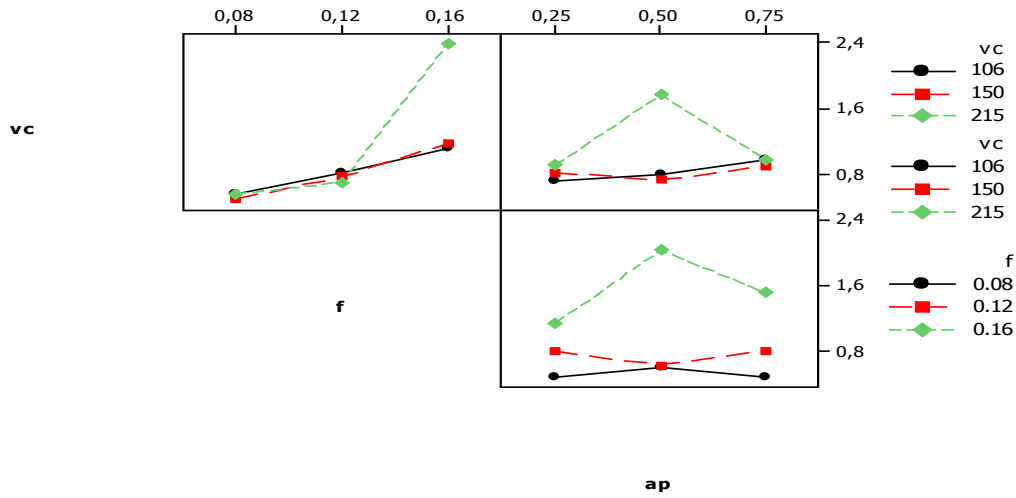
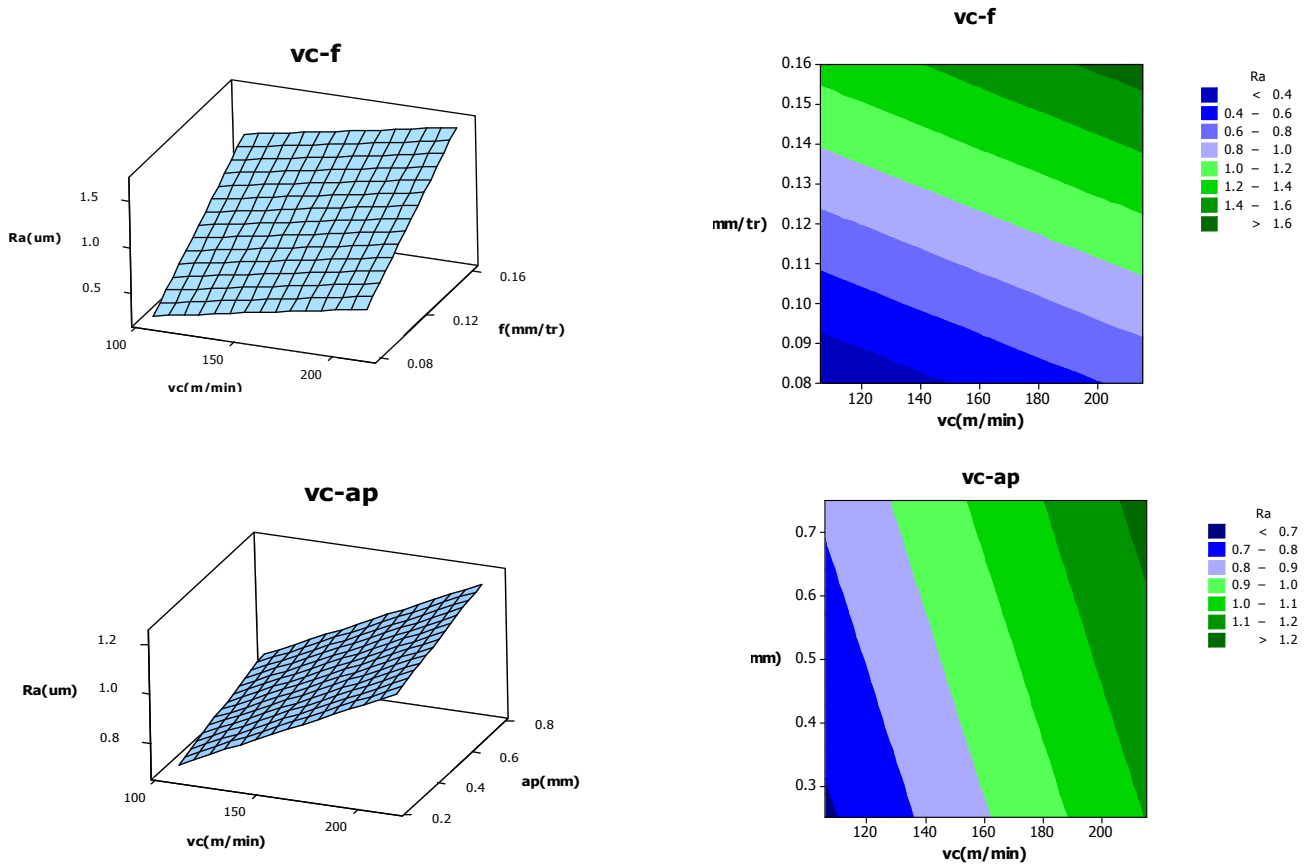


Figure IV.6: Graphe des interactions pour R_a

IV.4- 5 Evolution de la rugosité R_a en fonction des paramètres du régime de coupe

La figure IV.7 illustre la réponse de la rugosité (R_a) en fonction de (V_c , f , a_p) et les graphes de contour. Ces graphes permettent de visualiser la surface de réponse (R_a), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



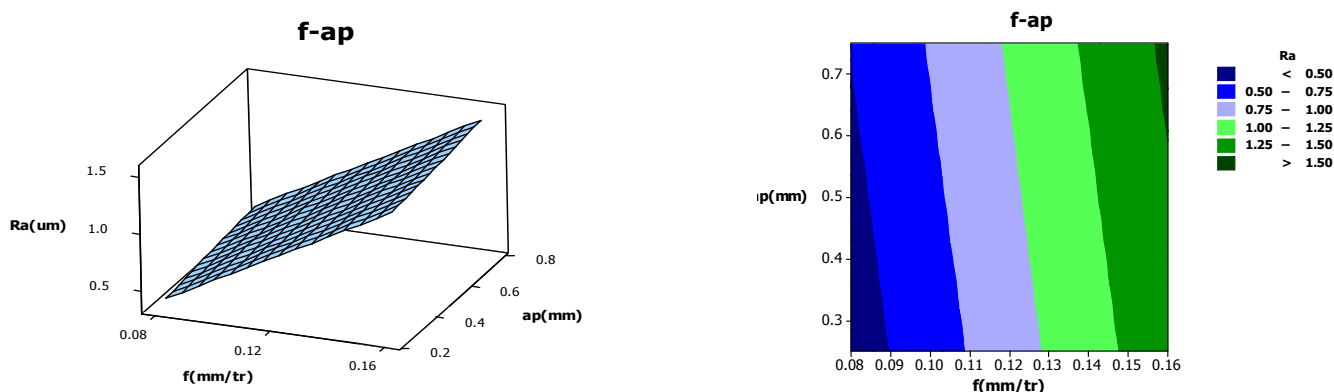


Figure IV.7 La surface de réponse de la rugosité de surface (Ra) en fonction de Vc , f , ap et les graphes de contour

IV-5 Modèles de la rugosité Rz en fonction des paramètres de coupe

IV.5- 1 Analyse de la variance (ANOVA) pour Rz

L'analyse de variance ANOVA présentée au tableau (IV.4) montre que l'avance a un effet significatif sur la variation des critères de la rugosité Rz , car sa valeur trouvée de P est inférieure à 5%. Par contre les valeurs de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont supérieures à 0,05. On remarque aussi que les différentes interactions n'ont pas d'effet significatif. L'avance a un effet important, car elle présente un pourcentage de contribution de 46,28%.

Coefficients de régression estimés pour Rz		Analyse des variances pour Rz						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Vc (m/min)	-0,708889	Vc (m/min)	2	19,384	9,692	2,21	0,173	08,21
f (mm/tr)	-0,482222	f (mm/tr)	2	109,062	54,531	12,41	0,004	46,28
ap (mm)	-1,71778	ap (mm)	2	17,101	8,551	1,95	0,205	07,25
$Vc*f$	-1,10222	$Vc*f$	4	33,389	8,347	1,90	0,204	13,99
$Vc*ap$	-0,474444	$Vc*ap$	4	15,095	3,774	0,86	0,527	06,40
$f*ap$	-0,646667	$f*ap$	4	6,741	1,685	0,38	0,815	02,86
Constante	4,51556	Erreur	8	35,149	4,394			
Coefficient de détermination $R^2 = 85,10\%$		Total	26	235,923				

$$S = 2,09609 \quad R-Sq = 85,10\% \quad R-Sq(adj) = 80,64\%$$

Tableau IV.4 : Résultats de l'analyse de la variance pour Rz .

IV.5 .2 Analyse de régression

L'équation (IV.3) de régression qui suit, exprime le modèle la rugosité Rz avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Rz = 4,51556 - 0,708889Vc - 0,482222f - 1,71778ap - 1,10222Vc*f - 0,474444Vc*ap - 0,646667 f*ap \dots\dots\dots (IV.3)$$

Où $R^2 = 85,10\%$

IV.5 .3 Graphique des effets principaux pour Rz

La figure IV.8 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Rz.

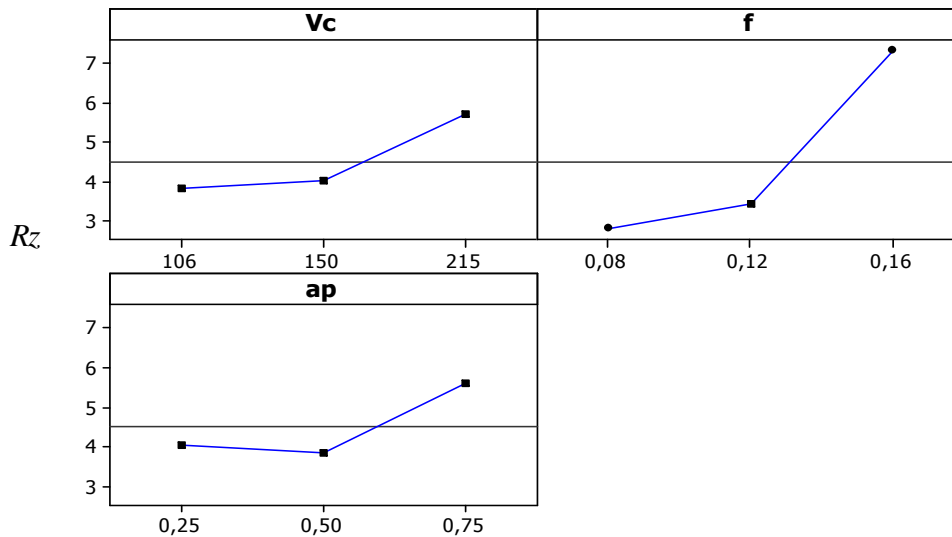


Figure IV.8 : Graphique des effets principaux pour Rz

L'avance a un effet significatif sur la composante Rz. On remarque bien sur la figure IV.8 que la pente du paramètre de l'avance f est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de la profondeur de passe, il est donc le facteur le plus influent sur la rugosité Rz.

IV.5- 4 Diagramme d'interaction pour Rz

Le diagramme des interactions nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. Le diagramme (figure IV.9) montre l'impact exercé par la variation des valeurs d'un facteur sur un autre facteur.

On remarque que la pente de l'interaction $V_c \cdot f$ est plus grande que les autres interactions. Cela est en accord avec les résultats du tableau IV.4 où la contribution est de 13,39%.

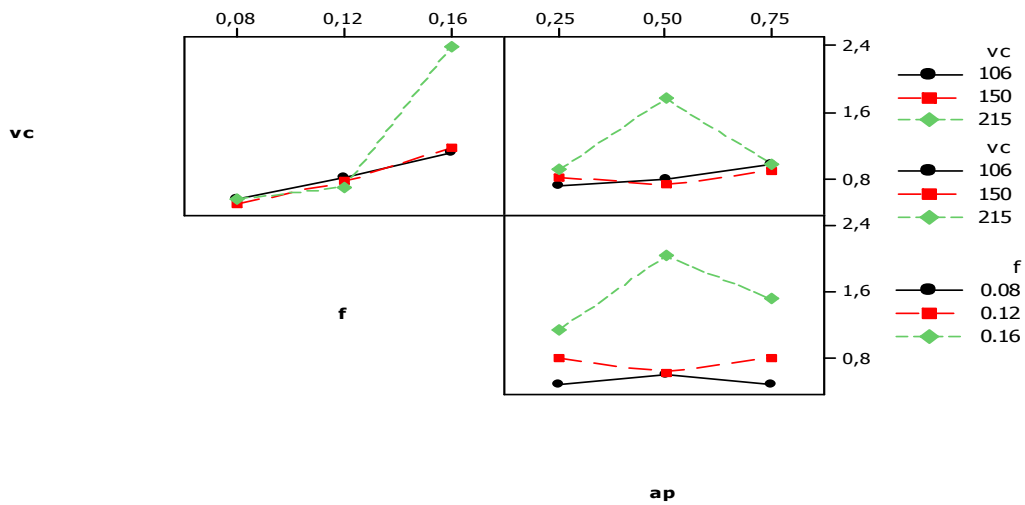
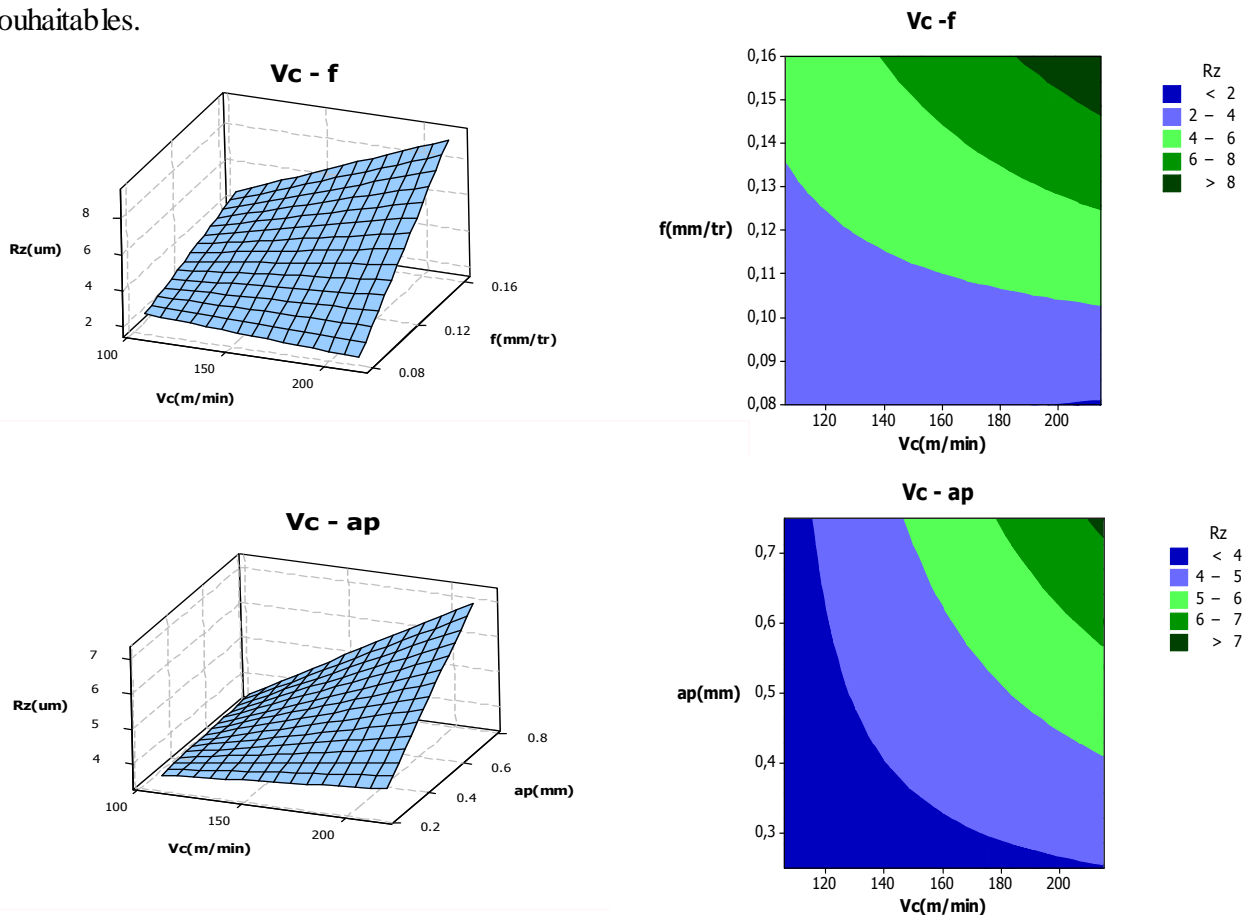


Figure IV.9: Graphe des interactions pour R_z

IV.5- 5 Evolution de la rugosité R_z en fonction des paramètres du régime de coupe

La figure IV.10 illustre la surface de réponse du critère de rugosité (R_z) en fonction de (V_c , f , ap) et les graphes de contour. Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (R_z), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



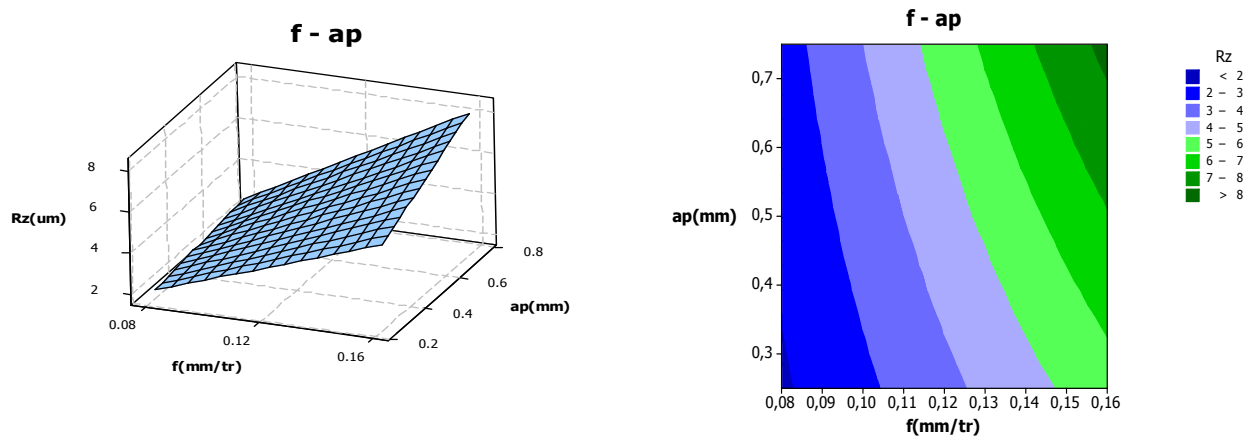


Figure IV.10: La surface de réponse de la rugosité de surface (R_z) en fonction de V_c , f , a_p et les graphes de contour

IV-6 Modèles de la rugosité R_t en fonction des paramètres de coupe

IV.6- 1 Analyse de la variance (ANOVA) pour R_t

L'analyse de variance ANOVA présentée au tableau (IV.5) montre que la vitesse de coupe et la profondeur de passe n'ont pas un effet significatif sur la variation du critère de la rugosité R_t , car les valeurs trouvées de P sont supérieures à 5%. Par contre la valeur de l'avance est inférieure à 0,05. On remarque aussi que les différentes interactions n'ont pas d'effet significatif. Le pourcentage de contribution de l'avance est 35,29%, il présente un effet important.

Coefficients de régression estimés pour R_t		Analyse des variances pour R_t						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
V_c (m/min)	-0,661111	V_c (m/min)	2	32,037	16,018	2,12	0,183	07,72
f (mm/tr)	-0,874444	f (mm/tr)	2	146,390	73,195	9,68	0,007	35,29
a_p (mm)	-2,07889	a_p (mm)	2	35,875	17,938	2,37	0,155	08,65
V_c*f	-1,17222	V_c*f	4	73,244	18,311	2,42	0,134	17,65
V_c*a_p	-1,07889	V_c*a_p	4	42,903	10,726	1,42	0,312	10,34
$f*a_p$	-0,518889	$f*a_p$	4	23,861	5,965	0,79	0,564	05,75
Constante	5,53333	Erreur	8	60,518	7,565			
Coefficient de détermination $R^2 = 85,41\%$		Total	26	414,828				

$$S = 2,75040 \quad R-Sq = 85,41\% \quad R-Sq(adj) = 52,59\%$$

Tableau IV.5 : Résultats de l'analyse de la variance pour R_t

IV.6 .2 Analyse de régression

L'équation (IV.4) de régression qui suit, exprime le modèle de la rugosité Rt avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$Rz = 5,53333 - 0,661111 Vc - 0,874444 f - 2,07889 ap - 1,17222 Vc*f - 1,07889 Vc*ap - 0,518889 f*ap \dots\dots\dots (IV.4)$$

Où $R^2 = 85,41\%$

IV.6 .3 Graphique des effets principaux pour Rt

La figure IV.11 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur Rt.

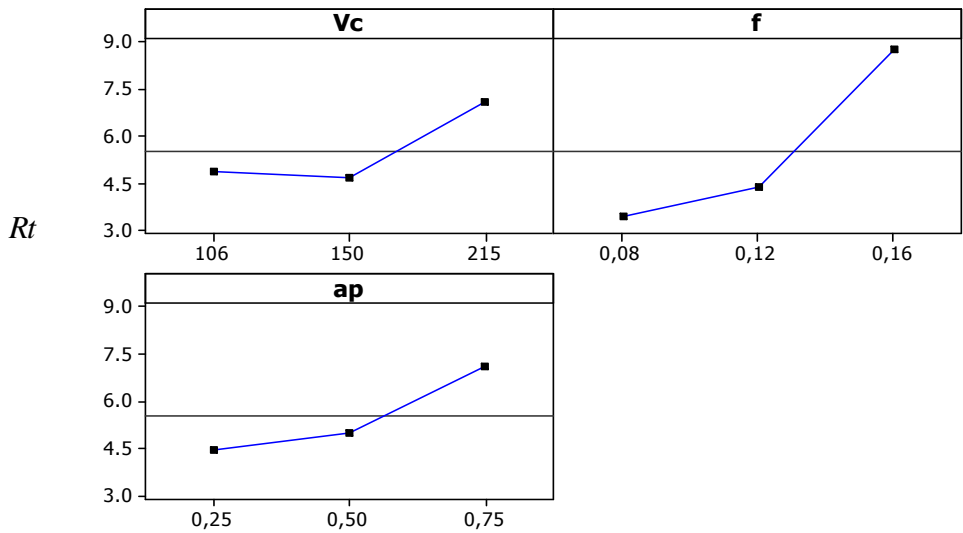


Figure IV.11 : Graphique des effets principaux pour Rt

L'avance a un effet significatif sur la composante Rt. La figure IV.11 montre bien que la pente du paramètre de l'avance f est plus grande que la pente de la vitesse de coupe et celle de la profondeur de passe, il est donc le facteur le plus influent sur la rugosité Rt.

IV.6- 4 Diagramme des interactions pour Rt

La figure IV.12 présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction Vc*f est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 17,65% suivant le tableau IV.5.

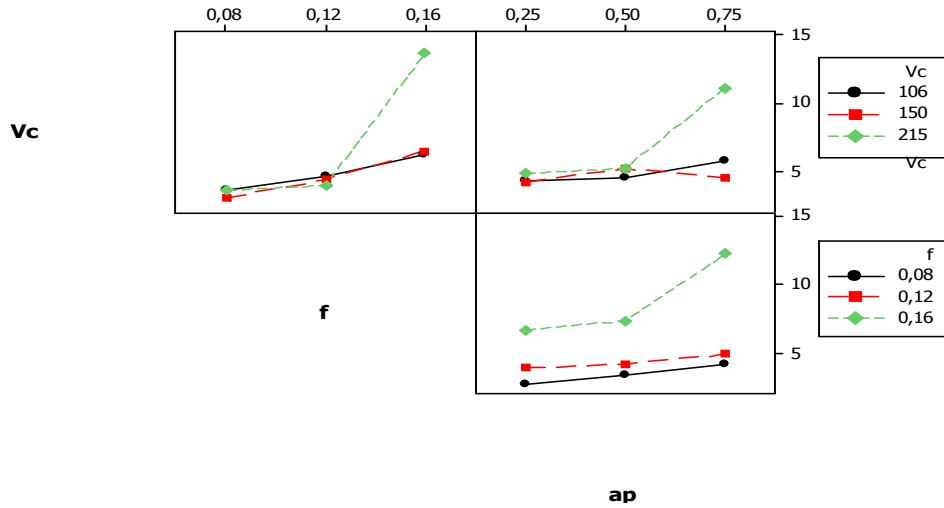
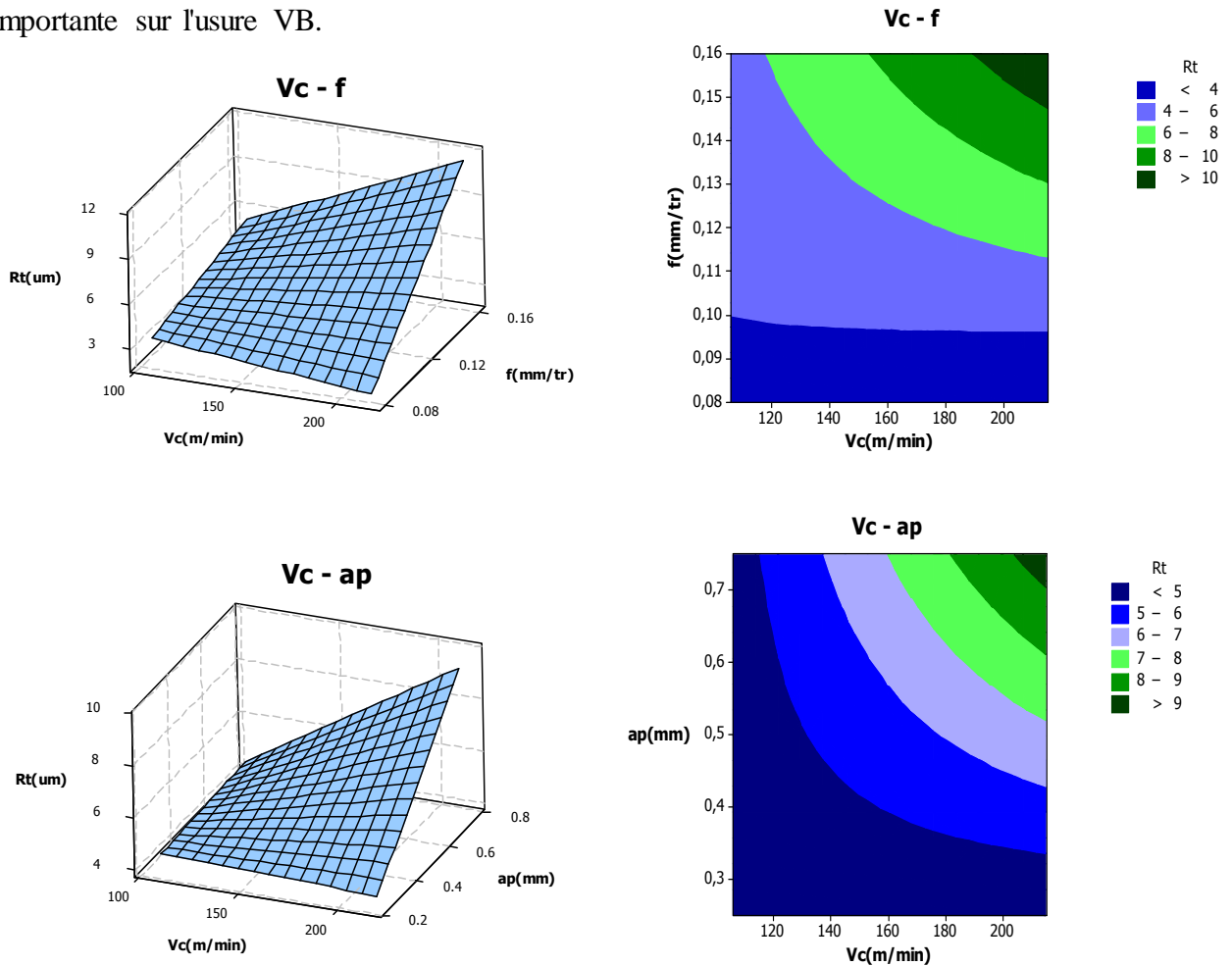


Figure IV.12: Graphe des interactions pour R_t

IV.6- 5 Evolution de la rugosité R_t en fonction des paramètres du régime de coupe

La figure IV.13 illustre la surface de réponse du critère de rugosité (R_t) en fonction de (V_c , f , a_p) et les graphes de contour. La présentation en 3D montre que la pente de l'avance est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'usure VB.



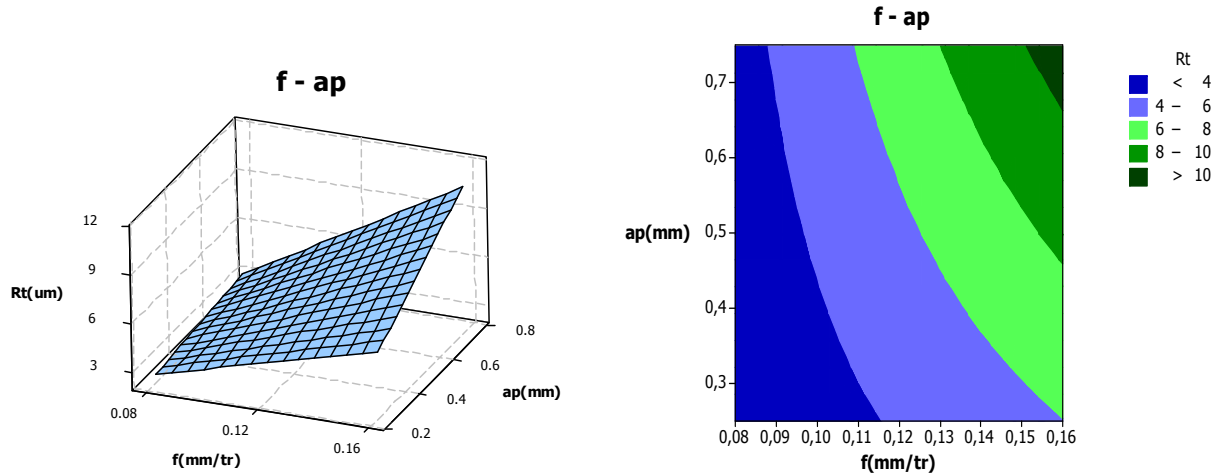


Figure IV.13: La surface de réponse de la rugosité de la surface (R_t) en fonction de V_c , f , a_p et les graphes de contour

IV.7 Modèles de l'effort axial F_x en fonction des paramètres de coupe

IV.7- 1 Analyse de la variance (ANOVA) pour F_x

Le tableau IV.6 présente l'analyse de variance ANOVA pour la composante de l'effort axial F_x . On remarque que la profondeur de passe a un effet significatif puisque P est inférieur à 0,05. Sa contribution est de 27,75%, l'interaction $V_c \cdot f$ a aussi un effet significatif avec une contribution de 31,21%. Par contre la vitesse de coupe et l'avance et les autres interactions n'ont pas un effet significatif sur l'effort axial puisque la valeur de P est supérieure à 0,05.

Coefficients de régression estimés pour F_x		Analyse des variances pour F_x						
Terme	Coeff	Source	D.I.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
V_c (m/min)	2,09111	V_c (m/min)	2	13895	6947	2,22	0,171	07,60
f (mm/tr)	26,6789	f (mm/tr)	2	4581	2291	0,73	0,510	02,51
a_p (mm)	-18,3678	a_p (mm)	2	50717	25358	8,11	0,012	27,75
$V_c \cdot f$	7,96556	$V_c \cdot f$	4	57031	14258	4,56	0,033	31,21
$V_c \cdot a_p$	-43,2511	$V_c \cdot a_p$	4	20025	5006	1,60	0,264	10,96
$f \cdot a_p$	-15,9856	$f \cdot a_p$	4	11486	2872	0,92	0,498	06,28
Constante	183,647	Erreur	8	25006	3126			
Coefficient de détermination $R^2 = 86,32\%$		Total	26	182740				

$$S = 55,9079 \quad R-Sq = 86,32\% \quad R-Sq(adj) = 55,53\%$$

Tableau IV-6 Résultats de l'analyse de la variance pour F_x

IV.7- 2 Analyse de régression

L'équation (IV.5) de régression qui suit, exprime le modèle de l'effort axial F_x avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$F_x = 183,647 + 2,09111 V_c + 26,67896 f - 18,3678 a_p + 7,96556 V_c * f - 43,2511 V_c * a_p - 15,9856 a_p * f \dots\dots\dots (IV.5)$$

Où $R^2 = 86,32\%$

IV.7- 3 Graphique des effets principaux pour F_x

La figure (IV.14) illustre les effets principaux des paramètres de coupe sur l'effort axial. On remarque que F_x s'élève légèrement avec l'augmentation de l'avance. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande. L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une diminution de l'effort F_x , cette augmentation conduit à une augmentation de la température générée dans la zone de coupe ce qui réduit considérablement la dureté de la pièce et facilite ainsi l'opération d'enlèvement de matière.

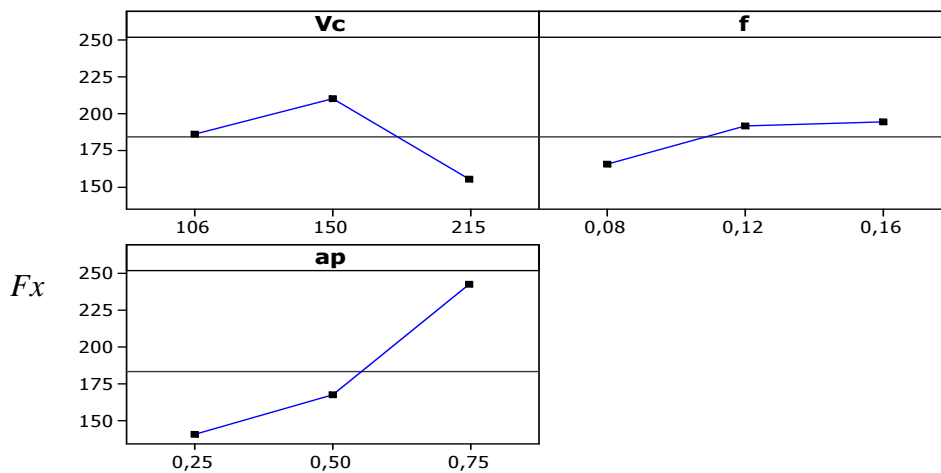


Figure IV-14 : Graphique des effets principaux pour F_x

IV.7- 4 Diagramme des interactions pour F_x

La figure IV.15 présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $V_c * f$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 31,21% suivant le tableau IV.6.

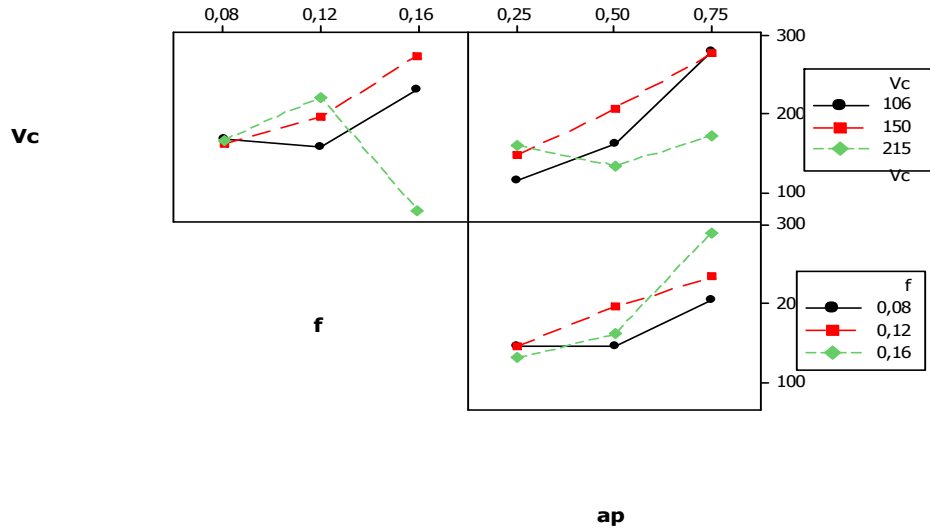
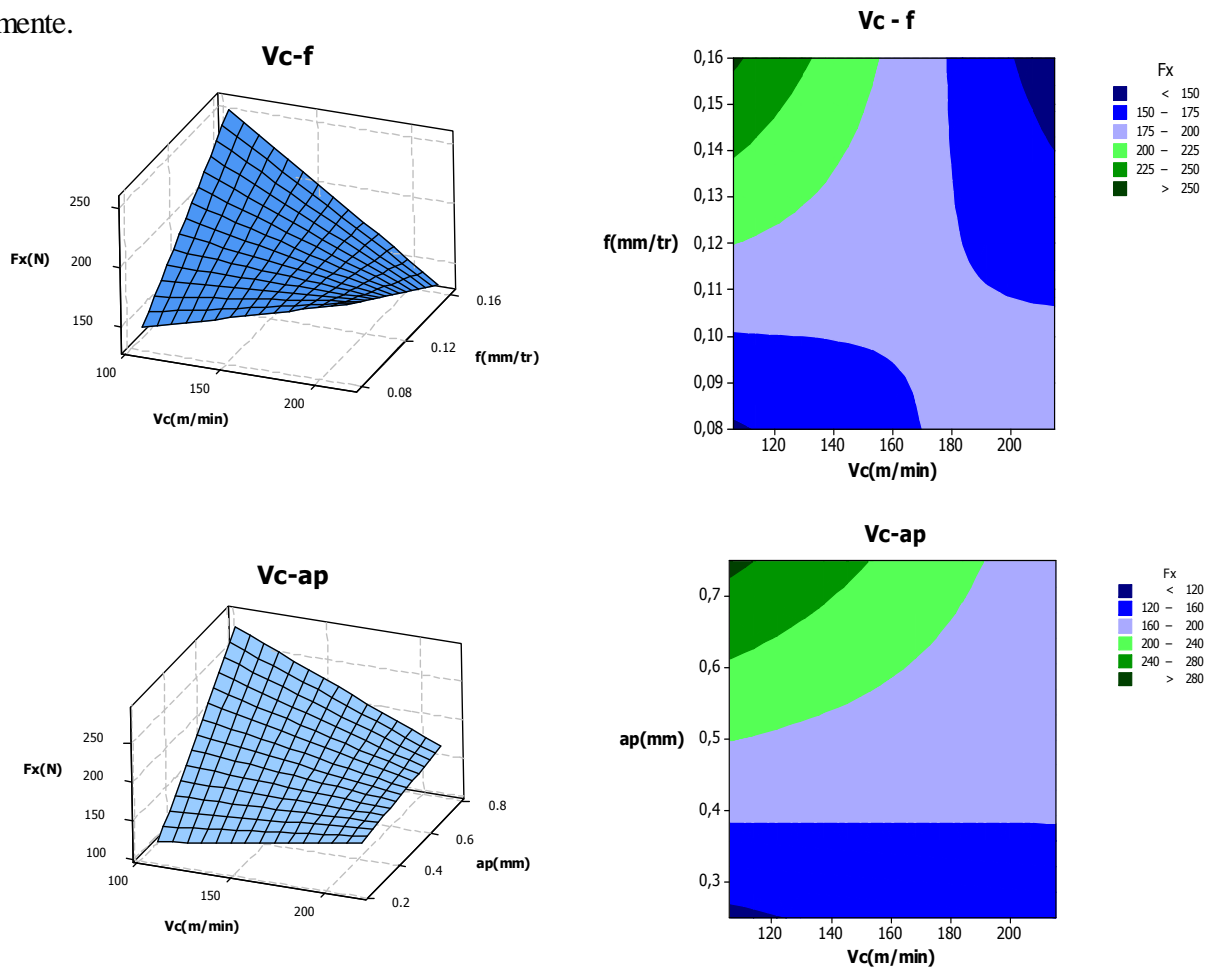


Figure IV.15: Graphe des interactions pour F_x

IV.7- 5 Evolution de l'effort F_x en fonction des paramètres du régime de coupe

La figure (IV.16) montre l'effet de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur l'effort axial F_x . Elle illustre l'effet significatif des paramètres de coupe. On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance et la profondeur de passe l'effort axial augmente.



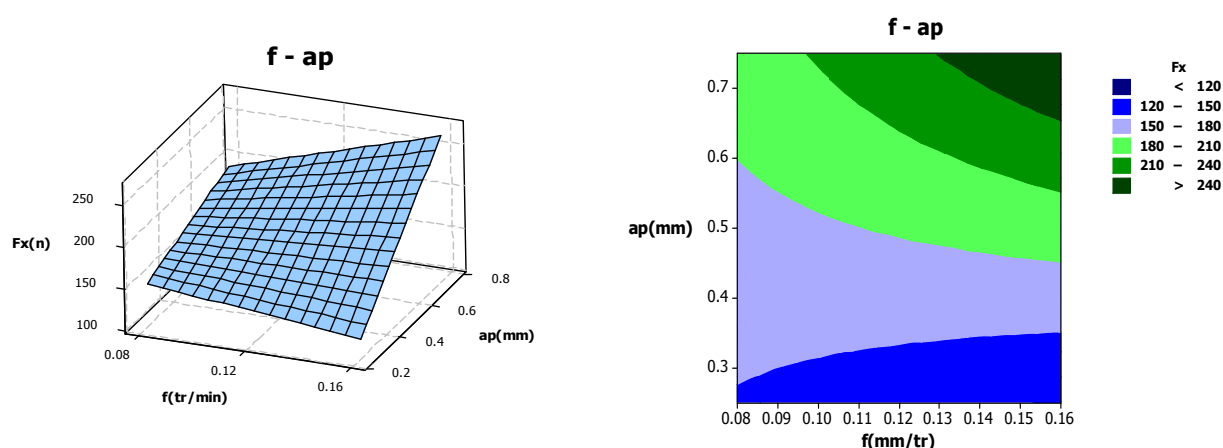


Figure IV.16: Surface de réponse de l'effort de coupe (F_x) en fonction de V_c , f , ap et graphe de contour.

IV.8 Modèles de l'effort de coupe F_y en fonction des paramètres de coupe

IV.8- 1 Analyse de la variance (ANOVA) pour F_y

Le tableau IV.7 présente l'analyse de la variance ANOVA pour la composante radiale F_y . On remarque que l'avance a un impact significatif puisque la valeur de la probabilité P est inférieure à 0.05 avec une contribution de 30,38%, les autres paramètres et leurs interactions ne présentent pas une influence significative sur l'effort F_y car P -value $> 0,05$.

Coefficients de régression estimés pour F_y		Analyse des variances pour F_y						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
V_c (m/min)	-5,119	V_c (m/min)	2	23126	11563	0,52	0,613	03,15
f (mm/tr)	102,256	f (mm/tr)	2	222620	111310	5,01	0,039	30,38
ap (mm)	62,676	ap (mm)	2	75137	37569	1,69	0,244	10,25
V_c*f	-31,664	V_c*f	4	69934	17484	0,79	0,565	09,54
V_c*ap	-28,962	V_c*ap	4	32384	8096	0,36	0,828	04,42
$f*ap$	70,267	$f*ap$	4	131555	32889	1,48	0,295	17,95
Constante	373,892	Erreur	8	177896	22237			
Coefficient de détermination $R^2 = 75,72\%$		Total	26	732653				

$S = 149,121$ $R-Sq = 75,72\%$ $R-Sq(adj) = 35,74\%$
Tableau IV.7 : Résultats de l'analyse de la variance pour F_y

IV.8-2 Analyse de régression

Le modèle qui décrit la variation de l'effort radial en fonction de tous les facteurs peut être écrit de la façon suivante :

$$F_y = 373,892 - 5,119V_c + 102,256f + 62,676ap - 31,664V_c*f - 28,962V_c*ap + 70,267f*ap \quad (IV.6)$$

Où $R^2 = 75,72\%$

IV.9 -3 Graphique des effets principaux pour F_y

La figure IV.17 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort radial F_y . On remarque que F_y s'élève avec l'augmentation de l'avance. Alors l'effet de l'avance est prépondérant car sa pente est plus grande à celle de la profondeur de passe et de la vitesse de coupe.

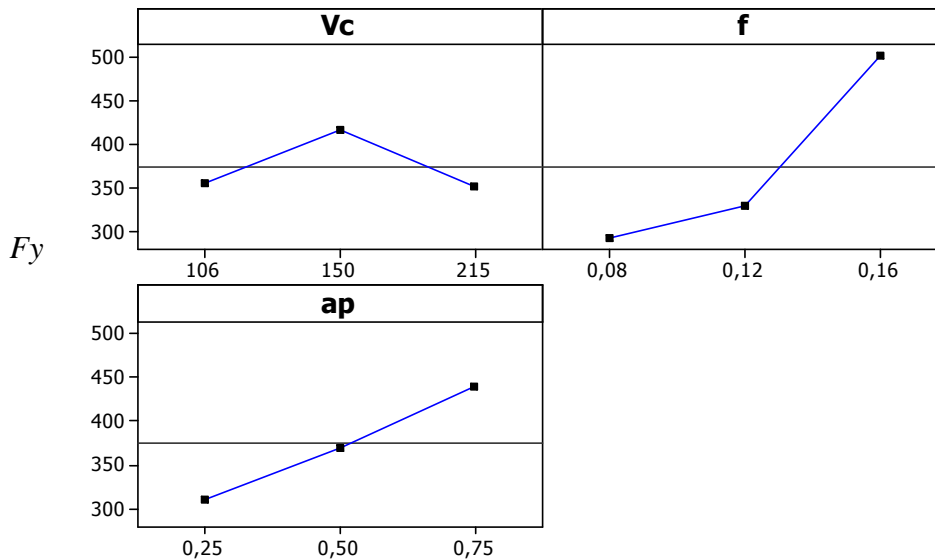


Figure IV.17 : Graphique des effets principaux pour F_y

IV.8- 4 Diagramme des interactions pour F_y

La figure IV.18 présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $f*ap$ est supérieure que les deux autres interactions avec une contribution de 17,95% suivant le tableau IV.7.

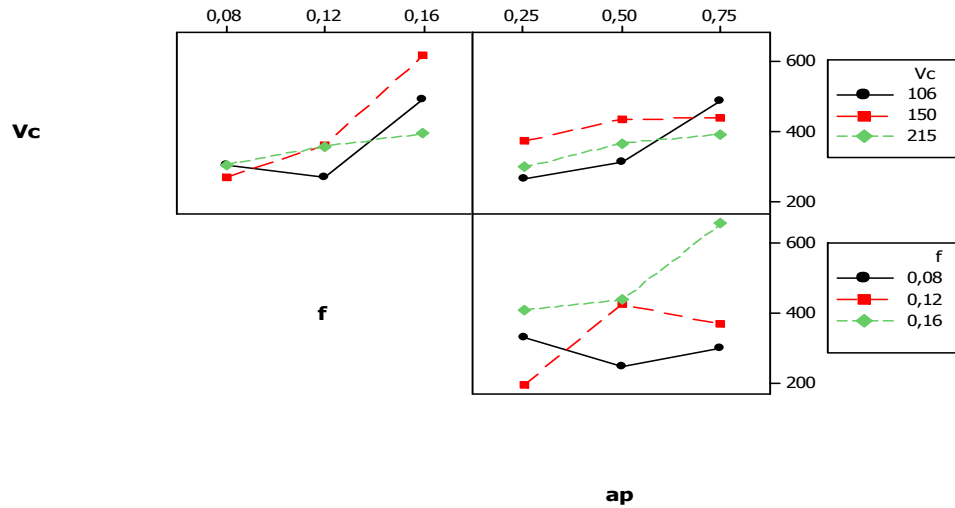
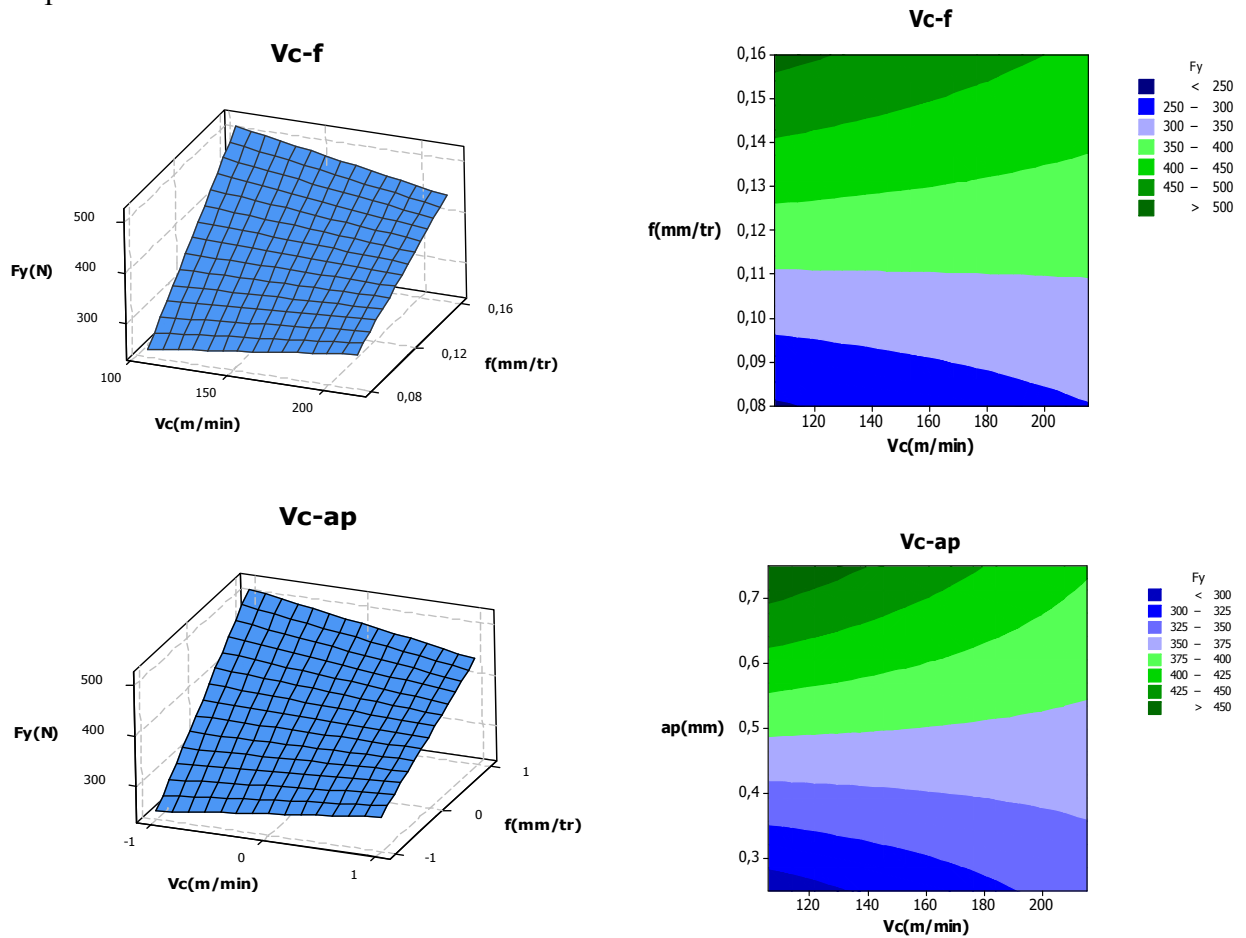


Figure IV.18: Graphe des interactions pour F_y

IV.8- 5 Evolution de l'effort F_y en fonction des paramètres du régime de coupe

La figure IV.19 illustre la surface de réponse du critère (F_y) en fonction de (V_c , f , a_p) et les graphes de contour. Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (F_y) et les conditions d'exploitation souhaitables.



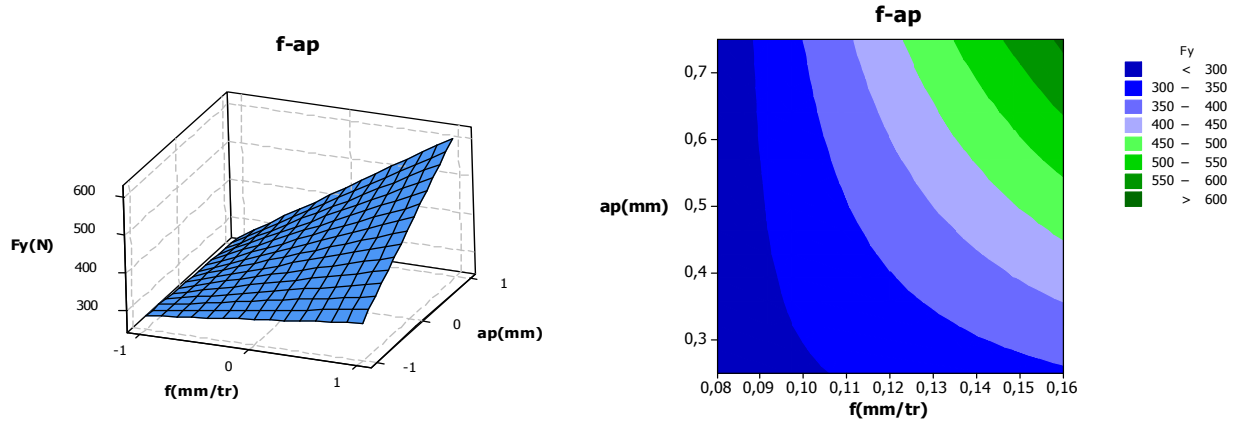


Figure IV-19: Surface de réponse de l'effort de coupe (F_y) en fonction de V_c , f , a_p et les graphes de contour.

IV.9 Modèles de l'effort de coupe F_z en fonction des paramètres de coupe

IV.9- 1 Analyse de la variance (ANOVA) pour F_z

L'analyse de variance ANOVA présentée au tableau IV.8 pour la composante de l'effort tangentiel F_z montre que la profondeur de passe a un grand effet significatif, sa contribution est de 43,91% sur la variation de cette composante, suivie par l'avance avec une contribution de 10,36%. Par contre la vitesse de coupe n'a pas un effet significatif sur l'effort tangentiel puisque la valeur de P est supérieure à 0,05. L'interaction $V_c * f$ influe aussi sur l'effort tangentiel avec une contribution de 21,66%, suivie par l'interaction $V_c * a_p$ avec une contribution de 12,37 %.

Coefficients de régression estimés pour F_z		Analyse des variances pour F_z						
Terme	Coeff	Source	D.L.	SC	CM	F-value	P-value	PC%
V_c (m/min)	9,96963	V_c (m/min)	2	5477	2738	1,03	0,399	01,92
f (mm/tr)	10,1719	f (mm/tr)	2	29669	14835	5,60	0,030	10,36
a_p (mm)	-42,0370	a_p (mm)	2	125748	62874	23,73	0,000	43,91
$V_c * f$	38,9896	$V_c * f$	4	62020	15505	5,85	0,017	21,66
$V_c * a_p$	-64,9148	$V_c * a_p$	4	35439	8860	3,34	0,069	12,37
$f * a_p$	-29,3937	$f * a_p$	4	6815	1704	0,64	0,647	02,38
Constante	234,624	Erreur	8	21196	2650			
Coefficient de détermination $R^2 = 92,60\%$		Total	26	286365				

$$S = 51,4737 \quad R-Sq = 92,60\% \quad R-Sq(adj) = 75,94\%$$

Tableau IV.8 : Résultats de l'analyse de la variance pour F_z

IV.9- 2 Analyse de régression

Le modèle qui décrit la variation de l'effort tangentiel en fonction de tous les facteurs significatifs peut être écrit de la façon suivante :

Modèle complet :

$$Fz = 234,624 + 9,96963Vc + 10,1719f - 42,0370ap + 38,9896Vc*f - 64,9148Vc*ap - 29,3937f*ap \dots\dots\dots (IV-7)$$

Où $R^2=92,60\%$

IV.9- 3 Graphique des effets principaux pour Fz

La figure IV-20 montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort tangentiel Fz. On remarque que Fz s'élève avec l'augmentation de la profondeur de passe. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande. On remarque aussi que l'effort Fz diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

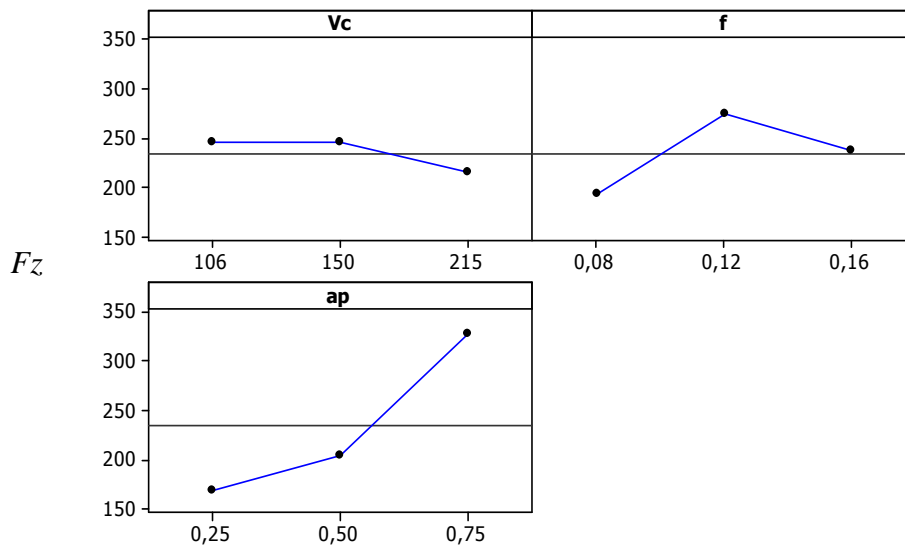


Figure IV-20 : Graphique des effets principaux pour Fz

L'analyse détaillée de surface de réponse de l'effort tangentiel (Fz) trouvé (figure IV-20), confirme que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à la diminution de l'effort tangentiel. La variation de la profondeur de passe conduit à une croissance de l'effort tangentiel. On constate alors que l'effort augmente avec l'augmentation la profondeur de passe, donc la zone de l'interface outil/copeau augmente ce qui ramène à l'augmentation de la composante de l'effort de coupe tangentiel (Fz).

IV.9- 4 Diagramme des interactions pour Fz

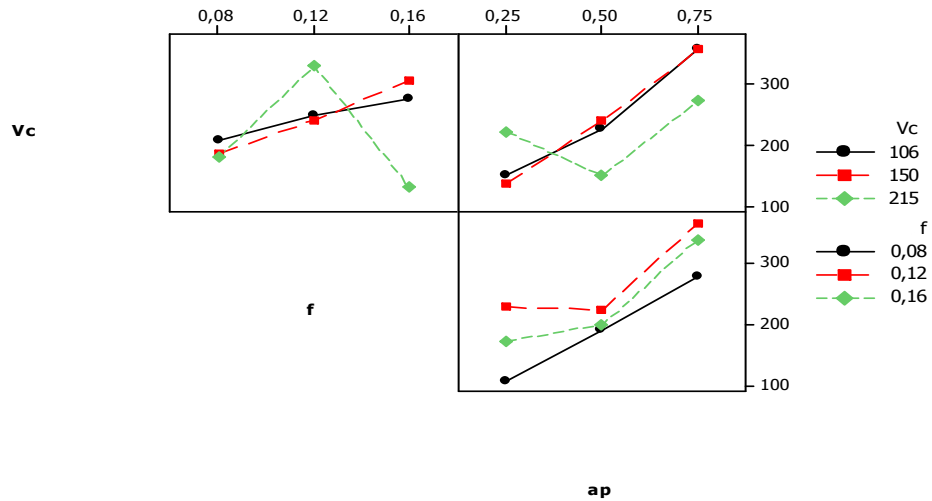
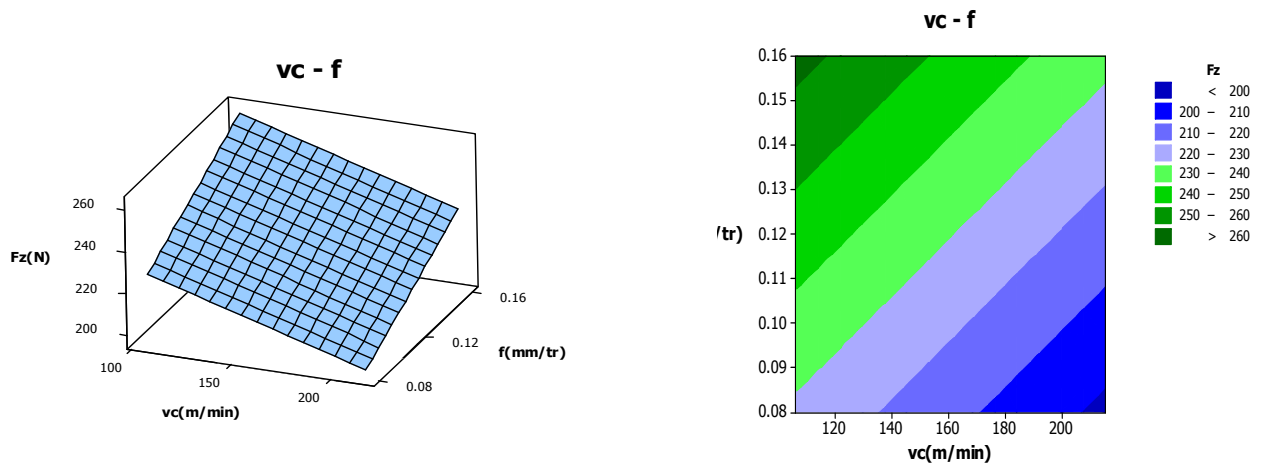


Figure IV.21: Graphe des interactions pour Fz

Le diagramme des interactions nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. Le diagramme (figure IV.21) montre l'impact exercé par la variation des valeurs d'un facteur sur un autre facteur. L'analyse des résultats montre que l'interaction Vc*f est supérieure que les deux autres interactions avec une contribution de 21,66% suivie par l'interaction Vc*ap avec une contribution de 12,37% d'après le tableau IV.8.

IV.9- 5 Evolution de l'effort Fz en fonction des paramètres du régime de coupe

Le graphe de contour montre la relation entre une variable de réponse (Fz) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation (figure IV.22).



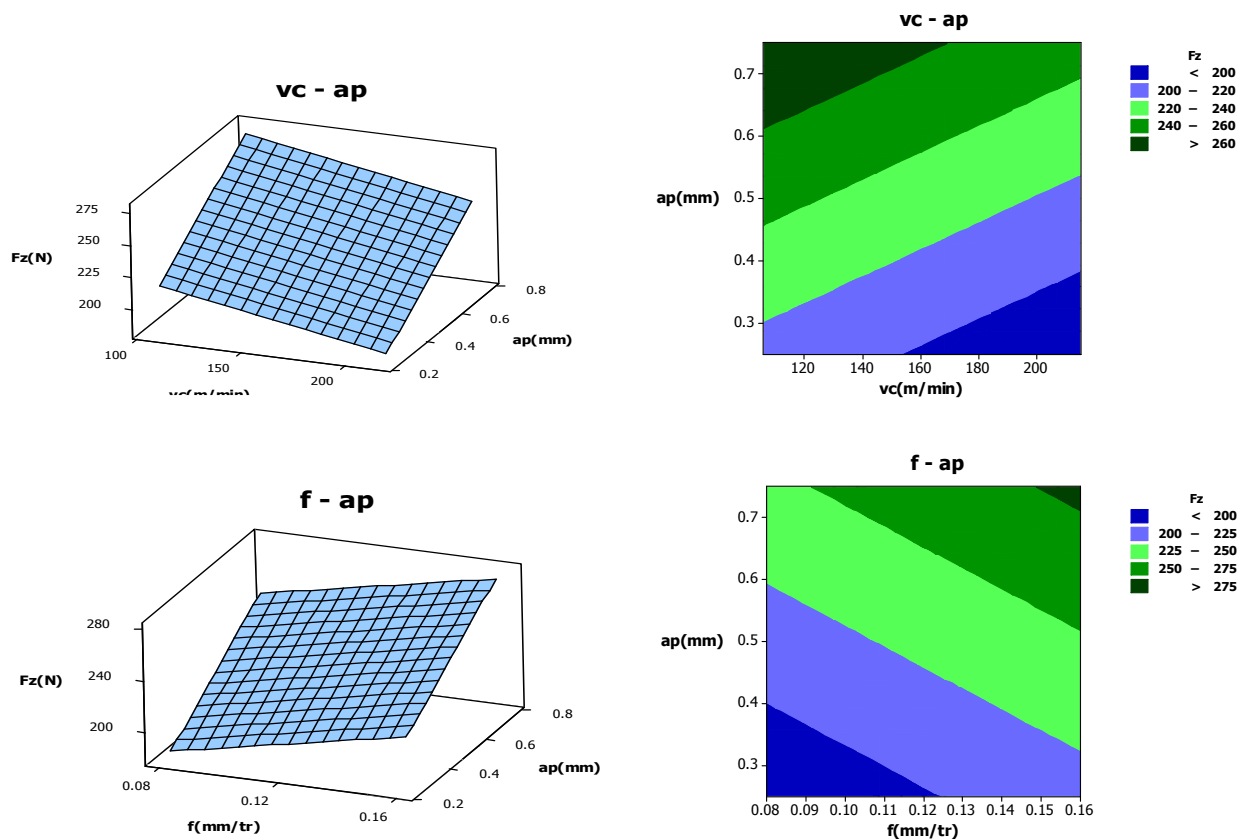


Figure IV.22: Surface de réponse de l'effort de coupe (F_z) en fonction de V_c , f , ap et les graphes de contour.

IV.10 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de modéliser les phénomènes de la coupe tels que (usure, rugosité et efforts de coupe) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) lors de l'usinage de l'acier X210Cr12. Les résultats de ce chapitre ont conduit aux conclusions suivantes :

- L'avance est le paramètre le plus influent sur l'usure en dépouille VB avec une contribution de 36,88% suivie par la vitesse de coupe avec 13,41%.
- L'avance est le paramètre le plus influent sur les différents critères de la rugosité (R_a , R_t , R_z) avec une contribution de (45,45 ; 35,29 ; 46,28)% respectivement.
- Il est à signaler que parmi ces facteurs (V_c , f et ap), la profondeur de passe est le facteur plus influent sur les efforts de coupe (F_x ; F_y ; F_z) avec une contribution de (27,75 ; 30,38 ; 43,91)% respectivement.
- Les modèles mathématiques relatifs aux efforts de coupe, aux rugosités et à l'usure de l'outil ont défini le degré d'influence de chaque élément de régime de coupe sur les paramètres technologiques étudiés.

Conclusion générale

L'étude expérimentale sur le comportement de la céramique mixte revêtue CC6050 lors du tournage dur de l'acier fortement allié X210Cr12 traité à 54HRC nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La qualité des surfaces obtenues lors de l'usinage avec l'outil en céramique mixte CC6050 est comparable à celle obtenue en rectification. Cet avantage présente un atout économique, puisqu'il nous permet de réduire les phases de fabrication des pièces (ébauche, demi - finition et finition sur une même machine outil). Il est clair que le tournage dur est un procédé d'usinage qui réduit considérablement le prix de revient en ayant une bonne précision d'usinage.
- Il est à noter aussi d'après l'étude de l'influence des conditions de coupe sur la rugosité que le facteur qui affecte plus l'état de surface est l'avance suivie par la vitesse de coupe et en dernier lieu la profondeur de passe.
- L'usure est l'un des facteurs à considérer, puisque son évolution endommage et dégrade la surface des pièces. Les résultats trouvés montrent que l'augmentation de l'usure VB entraîne une élévation de la rugosité.
- L'augmentation de la vitesse de coupe (V_c) et de l'avance (f) entraîne une augmentation de l'usure VB, par conséquent l'usure la plus faible est observée pour les faibles conditions de coupe (80m/min, 0,08mm/tr). Par contre l'usure la plus forte est observée pour les grandes conditions de coupe (140m/min, 0,14mm/tr).
- Les résultats de l'usure VB montre que l'avance (f) influe sur VB avec une contribution de 37% suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec une contribution de 14%.
- Cette étude montre qu'en tournage dur à sec de l'acier X210Cr12 par un outil en céramique mixte CC6050 et pour toutes les conditions de coupe utilisés, l'effort principal est l'effort radial.
- Les différents modèles de la rugosité indiquent que l'avance est le facteur qui influe plus sur les différents critères de rugosité (R_a , R_t , R_z), sa contribution dépasse 45% pour R_a , 46% pour R_z et 35% pour R_t .
- Les différents modèles des efforts de coupe indiquent que la profondeur de passe reste le facteur qui influe énormément sur les différentes composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z), sa contribution dépasse 43% pour F_y , 30% pour F_z et 27% pour F_x .
- Les modèles de l'usure, les efforts et les rugosités, nous permettent de déduire le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe. Ces modèles représentent un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent de faire des prédictions.

Les perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail de recherche ouvrent d'importantes perspectives.

- ✓ Etude de l'impact des paramètres de coupe sur l'usure de l'outil de coupe, la rugosité du surface et les efforts de coupe en utilisant d'autres matériaux de coupe modernes.
- ✓ Elaborations des modèles mathématiques de l'usure, la rugosité du surface et les efforts de coupe en tenant compte d'un plus grand nombre de facteurs variables.
- ✓ Etudier l'influence de l'usure sur la précision dimensionnelle de la pièce.
- ✓ L'application d'autres techniques statistiques pour prédire les phénomènes de la coupe à titre d'exemples les réseaux de Neurone (A-NN).
- ✓ Approfondir l'étude de l'usure des outils de coupe en appliquant les techniques modernes de caractérisation (MEB et Rx) afin de bien définir les mécanismes d'usure.
- ✓ Approfondir l'étude de la rugosité des surfaces usinées en utilisant un rugosimètre 3D afin de caractériser la topographie des surfaces (3D).

Nomenclature

a_p	Profondeur de passe [mm]
f	Avance [mm/tr]
F_x	Effort axial [N]
F_y	Effort radial [N]
F_z	Effort tangentiel [N]
F	Effort résultant [N]
HRC	Dureté Rockwell
K_s	Pression axiale de coupe [N/mm ²]
KT	Usure en cratère [mm]
Q	Volume de copeau [cm ³]
r_ϵ	Rayon de bec de l'outil [mm]
R^2	Coefficient de détermination
R_a	Rugosité moyenne théorique [μ m]
R_t	Rugosité totale [μ m]
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité [mm]
RMS	Méthode de surface de réponse
t°	Température (C°)
T	Durée de vie [min]
TH	Dureté [HRC]
[VB]	Usure en dépouille admissible [mm]
VB	Usure en dépouille [mm]
VN	Usure en entaille
VC	Usure entre l'arête initiale et la zone usinée [mm]
V_c	Vitesse de coupe
α	Angle de dépouille principale [degré]
γ	Angle d'attaque [degré]
γ_c	Angle de cratérisation
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [degré]
χ_r	Angle de direction principale [degré]

Références Bibliographiques

- [1] **A.A.Czaplicki**, L'usinabilité et la coupe des métaux. Revue de la société royale belge des ingénieurs et industries, N° 12, pp. 7087, (1962).
- [2] **P. Mathon**, Usinabilité et lois générales d'usinage des aciers et des fontes. Mec, Mat, Elec. N° 246-247, pp. 23-43.
- [3] **M. Robert, G. Godin**, Etude comparée de deux testes rapides d'usinabilité, corrélation avec des résultats d'essais de longue durée. Revue de Mat. N° pp. 1021-1032.
- [4] **P. Cunat**, Aciers inoxydables "Mise en œuvre", Techniques de l'ingénieur M4542.
- [5] **G. Brandt**, Développement des outils de coupe en céramique. Colloque international du cercle d'études des métaux, pp. 8-21, du 13 et 14 Novembre (1996).
- [6] **M. Remdana**, Le comportement de système usinant en tournage dur, Application du cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitre De Bord Cubique). thèse de doctorat en Mécanique. ISAL. N° d'ordre : 0022, (2001).
- [7] **C. Pages**, Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition. N° d'ordre : 37, (2003).
- [8] **M.A. Yallese**, Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur. Thèse de doctorat, (2005).
- [9] **G. Poulachon**, Usinabilité des matériaux difficiles : application aux aciers durcis. Techniques de l'ingénieur, BM7048, (2004).
- [10] **G. Chryssolouris**, Turning of hardened steels using CBN Tools. Journal I.Applied Metal Working, vol 2, (1982).
- [11] **G. Poulachon**, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Application : usinabilité de l'acier 100Cr6. thèse de doctorat en mécanique et matériaux. ENSAM. N° d'ordre: 14, (1999).
- [12] **A. Passeron**, Tournage, technique de l'ingénieur BM 7 086-22.
- [13] **G. Brandt**, Développement des outils de coupe en céramique. Matériaux et Technologique, vol. 9-10, pp. 3-12, (1997).
- [14] **F. Leroy, T. Blanchard, S. Alexandre et Denardi**, Usinage à très grande vitesse des aciers de construction mécanique, Colloque international du cercle d'Etudes des Métaux (1993).
- [15] **H. Pastor**, L'évolution des matériaux pour outils de coupe. Colloque International du Cercle d'Etudes des Métaux, pp. 7-11, du 13 et 14 Novembre (1996).
- [16] **M.A Yallese, L. Boulanouar, N. Ouelaa, S. Belhadi**, Influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100 Cr 6 (60 HRC) avec le CBN. Premier Congrès International, Conception et Modélisation des systèmes Mécaniques. Colloque international Tunisie 23 et 25 mars (2005).
- [17] **C. Bedrin, B. Roumesy**, Usinage par outil coupant Fascicule 1-2, INSA Lyon (1989)

- [18] **B. Roumesy**, Détermination des lois d'usure des outils, *Machines-Outils*, vol. 322, pp. 319-323, (1975).
- [19] **F. Leroy**, Usinage et usinabilité, *Technique de l'ingénieur*, MC2 M725, pp. 3-7, (1984).
- [20] Outils de tournage. Sandvik Cormant, pp. A248-249, (2000).
- [21] **E. Aslan, N. Camuşcu a, B. Birgören**, Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃ + TiCN mixed ceramic tool. *Journal of materials design*, vol.28, pp. 1618–1622, (2007).
- [22] **A. G. Mamalis¹, J. Kundra², M. Horva**, The Wear and Tool Life of CBN Cutting Tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 20, pp. 475–479, (2002).
- [23] **Y.Sahin**, Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels. *Journal of Materials Processing Technology*, vol.209, pp.3478–3489 (2009).
- [24] **W. Grzesik , Z. Zalisz**, Wear phenomenon in the hard steel machining using ceramic tools. *Journal of Tribology International*, vol. 41, pp. 802–812, (2008).
- [25] **D.Y. Jang , Y.T. Hsiao**, Use of ceramic tools in hard turning of hardened AISI M2 steel. *Journal of Tribologie*, vol. 43, pp. 641–646, (2000).
- [26] **GE. D'Errico, R. Calzavarini, R. Chiara, R. Morrell, L. Lay**, Performance of ceramic cutting tools in turning operations, *Ceramics charting the future*. *Journal Techna*, vol. 1, pp. 2327–34, (1995).
- [27] **C. Xu, C. Huang, X. Ai**, Mechanical property and cutting performance of yttrium-reinforced Al₂O₃/Ti(C,N) composite ceramic tool material. *Journal of Engineering Manufacture*, *Proceedings of the Imech*, vol. 10, pp.102–107, (2001).
- [28] **S.Y. Luo, Y.S. Liao, Y.Y. Tsai**, Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 88, pp. 114-121, (1999).
- [29] **H. Bouchelaghem, M. A. Yallese, A. Amirat, S. Belhadi**, Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel. *Journal Mechanika*, vol. 3 (65), pp.1207-1392, (2007).
- [30] **J.P. Davim, L. Figueira**, Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Journal of materials design*, vol. 28, pp. 1186–1191, (2007).
- [29] **G. C. Benga, A. M. Abrao**, Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools. *Journal of materials processing technology*, vol. 143–144, pp. 237–241 (2003).
- [31] **J. Paulo , L. Figueira**, Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. *Journal of materials design*, vol. 28, pp.1187-1191, (2006).

- [32] **A. Kumar, A. Durai, T. Sornakumar**, The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel. *Journal of material processing technology*, vol. 173, pp. 151-156, (2006).
- [33] **E. Aslan**, Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC). *Journal of materials design*, vol. 26, pp. 21-27, (2005).
- [34] **J.S. Dureja, V.K. Gupta, V.S. Sharma², M. Dogra**, Wear mechanisms of coated mixed-ceramic tool during finish hard turning of hot tool die steel. *Journal Mechanical Engineering Science, Proc. IMechE Part C*, Vol. 223, pp. 1-11, (2009).
- [35] **M.A. Yallese., J.F. Rigal, K. Chaoui, L. Boulanouar**, The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 Steel (60HRC). *Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Imech part B*, vol. 219, pp.35-55, (2005).
- [36] **G. Taguchi, S. Konishi**, Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graph, tools for quality engineering. American supplier institute, pp. 35-38, (1987).
- [37] **J. Kopac**, Hardening phenomena of Mn-austenite steels in the cutting process. *Journal of material processing technology*, vol. 109, pp.96-104, (2001).