

Université 8 mai 1945 – Guelma -

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Thèse

**Présentée en vue de l'obtention du diplôme de :
DOCTORAT**

*ETUDE DU COMPORTEMENT DES OUTILS CBN LORS DE
L'USINAGE DE L'ACIER FORTEMENT ALLIE AISI D3*

**Spécialité: Génie Mécanique
Option: productique mécanique
Par**

BOUCHELAGHEM HADJIRA

DIRECTEUR DE THESE: Pr. Yallesc Med Athmane

DEVANT LE JURY

**PRESIDENT :
EXAMINATEUR
EXAMINATEUR
RAPPORTEUR
INVITÉ**

**Pr Amirat. Abdelaziz
Pr Zeghib. N/eddine
Pr Bezazi. a/rezak
Pr Yallesc .Med Athmane
Dr Belhadi. salim**

**Université de Annaba
Université de Annaba
Université de Guelma
Université de Guelma
Université de Guelma**

AVRIL 2011

A la mémoire de mon père, A mes mères

A mon époux

A mes enfants (Kheir Eddine, Zahra et les jumelles Rahma et Hadia)

A mes frères, mes sœurs et mes nièces

A toute ma famille

Remerciement

*Ce travail a été réalisé au laboratoire de mécanique et structures (LMS) de l'université de Guelma sous la direction de Monsieur le professeur **Mohamed Athmane yallese**. Je le remercie intensément pour m'avoir guidé efficacement pendant ces cinq années en me faisant ainsi profiter de ses compétences, de ces conseils fructueux et de m'avoir permis de mener à terme cette thèse scientifique.*

*Je remercie également Monsieur le Professeur **Amirat Abdelaziz** professeur au département de mécanique de l'université d'Annaba qui m'a fait le plaisir et l'honneur de présider le jury de cette thèse.*

*J'exprime toute ma gratitude à Messieurs: **Zeghib N/eddine**, professeur au département de mécanique de l'université d'Annaba et **Bezazi A/rezak** professeur au département de mécanique de l'université de Guelma qui m'ont fait l'honneur d'être des examinateurs de ma thèse et qui ont consacré de leur précieux temps à son évaluation. Je remercie aussi Monsieur **belhadi salim** docteur au département de Génie mécanique de l'université de Guelma pour sa participation au jury.*

Je remercie chaleureusement toute ma famille et particulièrement mes parents pour leur soutien et leurs encouragements.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé à différents stades de ce travail.

Sommaire

Introduction.....	11
-------------------	----

CHAPITRE I : CONNAISSANCES DES PHENOMENES REGISSANT LE PROCESSUS DE COUPE

I.1 Usinabilité des matériaux	13
I.1.1 Introduction	13
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.....	16
I.1.4 Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils.....	16
a) Essai d'usure de longue durée à vitesse constante.....	16
b) Essai d'usure à vitesse croissante.....	16
I.2 La méthodologie du Couple Outil Matière (COM)	16
I.2.1 Le concept de COM.....	16
I.2.2 Le COM et liaison avec le système POM.....	17
I.3 Matériaux de coupe et revêtement des outils	18
I.3.1 Méthodologie de choix d'un outil de coupe.....	18
I.3.2 Evolution des matériaux à outil	19
I.3.3 Matériaux pour plaquette de coupe.....	19
I.3.4 Les revêtements.....	21
I.4 Duré de vie et endommagement des outils de coupe	23
I.4.1 Usure des matériaux difficiles à usiner.....	23
I.4.2 Mécanismes et formes d'usure.....	23
I.4.3 Modèles de la tenue des outils de coupe.....	24
I.4.4 Facteurs influençant l'usure.....	26
I.5 Rugosité des surfaces usinées	26
I.5.1 Principaux défauts de surface.....	26
I.5.2 Principaux critères de rugosité.....	27
I.5.3 Paramètres influençant la qualité de surface.....	28
I.6 Efforts de coupe	29
I.7 Aspect thermique de la coupe	30
I.7.1 Sources de chaleur.....	30
I.7.2 Influence de la température.....	31
I.7.3 Mesure de la température.....	32
I.8 Aspects dynamiques de la coupe	33
I.8.1 Effets des vibrations sur le processus de coupe.....	33
I.8.2 Types de vibration.....	33
a) Les vibrations forcées.....	33
b) Les vibrations auto-excitées.....	33
I.8.3 Comment limiter le broutement.....	34
a) Action sur l'outil.....	34
b) Action sur le porte outil.....	34
c) Action sur la pièce et le porte pièce.....	34
d) Action sur la machine.....	34

I.9 Morphologie du copeau	35
I.9.1 Types de copeaux.....	35
I.9.2 Paramètres qui influent sur le cisaillement du copeau.....	35
I.9.3 Formation du copeau en usinage dur.....	36
I.10 Usinage des matériaux difficiles	37
I.10.1 Nouvelles stratégies de fabrication.....	37
I.10.2 Comparaison entre le tournage dur et la rectification.....	38
I.10.3 Rentabilité du tournage dur.....	39
I.10.4 Les matériaux usinés en tournage dur.....	40
I.10.5 Conclusion.....	42
I.11 Etat de l'art sur l'usinage des pièces dures	42
I. 12 Conclusion	59

CHAPITRE II : PROCEDURE EXPERIMENTALE

II.1 Introduction	62
II.2 Banc d'essais et équipement de mesure	62
II.2.1 Machine outil.....	62
II.2.2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage.....	63
II.2.3 Outils de coupes utilisées.....	66
II.2.4 Appareillage de mesures utilisées	68
II.2.4.1 Mesure de l'usure.....	68
II.2.4.2 Mesure de la rugosité.....	69
II.2.4.4 Mesure de la température de coupe.....	70
II.2.4.5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	70
II.3 Planification des expériences	73
II.3.1 Introduction.....	73
II.3.2 Méthode uni factorielle.....	74
II.3.3 Méthode multifactorielle.....	74
II.3.4 Méthode de calcul des constantes des modèles mathématiques.....	77
II.4 Conditions de coupe	80

CHAPITRE III : COMPORTEMENT A L'USURE DES MATERIAUX DE COUPE FACE A L'ACIER AISI D3

III.1 Introduction	83
III.2 Performances des matériaux de coupe	83
III.2.1 Performances des matériaux de coupe pour $V_c=110\text{m/min}$	83
a) Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure.....	87
b) Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure.....	88
III.2.2 Performances des matériaux de coupe pour $V_c=200\text{m/min}$	90
a) Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure.....	91
b) Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure.....	92
III.3 Conclusion	94
III.4 Évolution de l'usure du CBN en fonction des conditions de coupe	94
III.4.1 Observations microscopiques de la morphologie de l'usure.....	96
III.4.2 Mécanismes d'usure.....	97
III.5 Exploitation des résultats de l'usure	103

III.5.1 Impact de l'usure sur la tenue d'outil.....	103
a) Tenues en fonction de la vitesse de coupe.....	104
b) Tenue en fonction de l'avance.....	105
III.5.2 Impact des conditions de coupe sur la productivité.....	105
a) Productivité en fonction de la vitesse de coupe.....	106
b) Productivité en fonction de l'avance.....	106
III.6 Modèles mathématiques déterminées.....	107
III.6.1 Détermination des modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe (Modèles de Taylor).....	107
III.6.2 Modèle de Gilbert.....	109

CHAPITRE IV : INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR LES EFFORTS DE COUPE, RUGOSITE DE SURFACE ET TEMPERATURE DE COUPE

IV.1 Introduction.....	112
IV. 2 Evolution des efforts de coupe, des efforts spécifiques de coupe et les efforts résultants en fonction des paramètres du régime de coupe.....	112
IV.2.1 Evolution des efforts de coupe.....	112
➤ Effet de la vitesse de coupe.....	112
➤ Effet de l'avance.....	114
➤ Effet de la profondeur de passe.....	116
IV.2.2 Evolution des efforts spécifiques de coupe et les efforts résultants en fonction du régime de coupe.....	118
➤ Effet de la vitesse de coupe.....	118
➤ Effet de l'avance.....	119
➤ Effet de la profondeur de passe.....	120
IV.3 Evolution de la puissance de coupe en fonction des conditions de coupe.....	122
IV.4 Evolution de la rugosité en fonction des conditions de coupe.....	124
➤ Effet de la vitesse de coupe.....	124
➤ Effet de l'avance.....	126
➤ Effet de la profondeur de passe.....	128
IV.5 Influence de la dureté sur l'effort de coupe, effort spécifique, effort résultant et la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe	129
IV.5.1 Influence de la dureté sur les efforts de coupe	129
➤ Effet de la vitesse de coupe.....	129
➤ Effet de l'avance.....	131
➤ Effet de la profondeur de passe.....	132
IV.5.2 Influence de la dureté sur l'effort spécifique et l'effort résultant.....	133
➤ Effet de la vitesse de coupe.....	133
➤ Effet de l'avance.....	135
➤ Effet de la profondeur de passe.....	136
IV.5.3 Influence de la dureté sur la puissance	137
IV.6 Influence de la dureté de la pièce sur la rugosité	138
➤ Effet de la vitesse de coupe.....	138
➤ Effet de l'avance.....	139
➤ Effet de la profondeur de passe.....	141
IV.7 Modélisation des paramètres technologiques de la coupe.....	142
IV.7.1 Modélisation des efforts de coupe	142
IV.7.2 Modélisation de la rugosité.....	145
IV.8 Température de coupe.....	146

**CHAPITRE V : APPLICATION DE LA METHODOLOGIE DE SURFACE DE REPONSE
POUR LA PREDICTION DES MODELES MATHEMATIQUES**

V Modélisation de la surface, effort de coupe et température de coupe en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RMS)	151
V.1 Introduction	151
V.2 Résultats avec l’outil CBN	151
V.2.1 Modèles mathématiques de la rugosité.....	152
V.2.2 Modèles mathématiques de l’effort de coupe.....	158
V.2.3 Modèles mathématiques de la température de coupe.....	163
V.3 Résultats avec l’outil céramique CC6050	165
V.3. Analyse du critère de la rugosité Ra.....	166
V.3.2 Analyse de la composante de l’effort de coupe F_y	169
Conclusion générale	172
Perspectives	175
Liste des publications et communications	176
Référence	178
Annexe I	185

Liste Des Abréviations

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_R	Effort résultant [N]
HB	Dureté Brinell
HRC	Dureté Rockwell
K_c	Effort spécifique de coupe [N/mm^2]
K_{ca}	Effort spécifique de coupe axial [N/mm^2]
K_{cr}	Effort spécifique de coupe radial [N/mm^2]
K_{cv}	Spécifique de coupe tangentielle [N/mm^2]
[KT]	Usure en cratère admissible [mm]
KT	Usure en cratère [mm]
r_ϵ	Rayon de bec de l'outil [mm]
R^2	Coefficient de détermination
R_a	Rugosité moyenne théorique [μm]
R_t	Rugosité totale [μm]
$R_{t_{th}}$	Rugosité totale théorique [μm]
$R_{a_{th}}$	Rugosité moyenne théorique [μm]
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité [mm]
RMS	Méthode de surface de réponse
S	Section du copeau [mm^2]
TD	Tournage dur
TTh	Traitement thermique
t°	Température de coupe (C°)
[VB]	Usure en dépouille admissible [mm]
VB	Usure en dépouille [mm]
VN	Usure en entaille
V_c	Vitesse de coupe
α	Angle de dépouille principale [degré]
χ_r	Angle de direction principale [degré]
χ_{r_1}	Angle de direction auxiliaire [degré]
γ	Angle d'attaque [degré]
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [degré]

Résumé

Le tournage des métaux durs est un procédé assez récent dans son utilisation. Le but de celui-ci, est de supprimer la phase de rectification, souvent longue et coûteuse. Aussi, le tournage des métaux durs est prometteur et intéresse de nombreux industriels de part les gains de productivité qu'il doit permettre de réaliser sur l'usinage des pièces dures. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude. Elle concerne une investigation sur le comportement de l'outil CBN 7020, face à un acier fortement allié AISI D3 traité à (60HRC). Nous commençons notre recherche par l'étude des performances en terme d'usure des différents types de matériaux de coupe, tels que (le CBN, les céramiques CC6050, CC650, CC670 et le carbure GC4005) lors de l'usinage de l'acier AISI D3 à deux différentes vitesses de coupe (*vitesse basse 110m/min et vitesse élevée 200m/min*). Nous exposons également les résultats de l'évolution des efforts de coupe et la dégradation de la qualité de la surface de la pièce, sous l'effet de l'usure de ces cinq matériaux à outil. Ensuite l'étude sera focalisée sur l'usure de l'outil CBN. A cet effet, nous présentons les différentes formes d'usure (VB et KT) de l'outil CBN en fonction du temps d'usinage et cela pour différentes conditions de coupe. Après, nous présentons une exploitation des résultats de l'usure en terme de durée de vie et de productivité. Le traitement statistique des résultats débouche sur une proposition des modèles mathématiques de la tenue. La dernière partie du travail est réservée à la modélisation de la rugosité, effort et température de coupe en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RMS).

Mots clé : Tournage dur, Matériaux de coupe, Comportement, Usure, Tenue, Rugosité, Efforts de coupe, RMS, ANOVA

Summary

The turning of hard metals, in its use, is rather a recent process, whose goal is to remove the grinding phase, often long and expensive. Moreover, this process proves to be promising and tends to interests a great number of industrialists through the productivity profits which might be earned on the machining of the hard workpieces. It is within this context that this study is based on. It pertains to an investigated conducted on the tool behaviour CBN 7020, vis-à-vis to highly alloyed steel AISI D3 treated with (60HRC). We begin our research with the study of the performances in terms of wear of the various types of materials of cut, such as (CBN, CC6050, CC650, CC670 and GC4005) by machining steel AISI D3 at two various cutting speeds (*low speed 110 m/min and high speed 200m/min*). We also expose the results of cutting forces evolution and the degradation of the workpiece surface quality, under the wear effect of these five tool materials. Then the study will be focused on the CBN tool wear. For that purpose, we present the various forms of wear (VB and KT) of the CBN according to the time of machining and that for various cutting conditions. Afterwards, we present wear results analysis in term of productivity and tool life. The statistical processing of the results leads to a proposal of the mathematical models behaviour. The last part of work is reserved to the modeling of roughness, effort and cutting temperature by using the response surface methodology (RMS).

Key words: Hard turning, Cutting materials, Wear, Behaviour, Roughness, Cutting forces, RMS, ANOVA

ملخص

إن خراطة المعادن الصلبة تعتبر من الأساليب حديثة الاستعمال والتي على المدى الطويل تؤدي إلى إلغاء مرحلة التخليخ أثناء تشغيل القطع ذات دقة عالية، وتعتبر هذه الأخيرة مكلفة في الوقت و الثمن. كما تعتبر خراطة المعادن الصلبة طريقة واعدة و تلقى اهتمام كبير من طرف الصناعيين لإنتاجيتها المرتفعة. و هذه الدراسة تندرج في هذا الإطار حيث نتناول بحث في سلوك الأداة (CBN) أثناء خراطة الفولاذ ذو خليط مرتفع و مقسى إلى HRC 60. في البداية قمنا بدراسة مدى فعالية مختلف أنواع أدوات القطع مثلا: (CBN, GC4005, CC670, CC650, CC6050) وذلك من حيث التآكل أثناء التشغيل الفولاذ AISI D3 بسرعتي قطع مختلفتين (سرعة منخفضة 110م/ثا و سرعة عالية 200م/ثا). كما قمنا كذلك بدراسة تطور قوى القطع و تدهور حالة السطح القطعة المشغلة، تحت تأثير التآكل لخمس أدوات القطع المذكورة سافا. بعد ذلك قمنا بدراسة معمقة على أداة القطع CBN. و في هذا المنوال درسنا تطور مختلف التآكل (VB) و (KT) لقلم القطع التبريد البوري المكعب بدلالة الزمن. كما قمنا باستغلال نتائج التآكل من ناحية مدة الحياة و الإنتاجية والتي تستخلص منها نماذج رياضية لحساب مدة الحياة و التآكل.

الجزء الثاني مخصص لدراسة تأثير شروط القطع والتآكل على العوامل التكنولوجية الآتية (قوى القطع، محصلة القوى، الضغوطات الخاصة، الخشونة و درجة حرارة القطع).

الجزء الأخير مخصص لنماذجية الخشونة، قوى القطع و درجة حرارة في منطقة القطع باستعمال طريقة السطح المرجعي (RMS).

الكلمات المفتاحية : الخراطة الصلبة، التبريد البوري المكعب، مواد القطع، تآكل، مدة الحياة، قوى القطع، الخشونة، ANOVA, RMS.

INTRODUCTION

Les progrès techniques dans le domaine de l'automobile, de l'espace et du nucléaire ont développé l'emploi des matériaux très durs, d'usinabilité très difficile qui demandent des matériaux à outils très résistants. Bien que la tenue des outils de coupe conventionnels soit limitée à des conditions particulières, les outils en aciers rapides, carbures et cermets restent largement utilisés en tournage pour la plupart des matériaux usinés. A mesure que la vitesse d'usinage devient importante ou que la dureté augmente comme dans le cas des aciers et des fontes trempés ainsi que des alliages réfractaires à base de nickel et des matériaux composites à matrices métalliques, il devient nécessaire de faire appel à des outils de coupe qui répondent à ces nouvelles exigences.

Le choix rationnel des matériaux de coupe ne peut se faire qu'avec des expérimentations spécifiques à chaque nuance et leur mise en œuvre nécessitent une maîtrise suffisante du déroulement du processus de coupe, en particulier l'évolution de l'usure. En effet l'usure des outils de coupe est un processus de destruction de couches superficielles, qui conduit à la modification progressive de la forme et l'état de surface des pièces usinées, elle affecte également la géométrie de l'outil, la température, les efforts de coupe, la précision d'usinage et la rugosité de la surface usinée. Elle se traduit avant tout par un arrachement de petites particules de métal des surfaces d'attaque et de dépouille principale et auxiliaire.

L'usinage des aciers trempés dans leurs états durcis est un nouveau procédé qui fait appel à des outils de coupe performants et aux géométries de coupe particulières. Ce procédé a été développé pour remplacer des opérations très coûteuses, telles que la finition par abrasion, et pour protéger l'environnement en supprimant la lubrification (recours à l'usinage à sec). Malgré les avancées dont a bénéficié ce procédé, notamment la mise en œuvre des matériaux à outils super durs comme les nitrures de bore cubique à structure polycristalline (Pc-BN) et les céramiques, il ne s'est encore pas répandu dans l'industrie. Le coût des plaquettes et le domaine de fonctionnement mal défini pour un couple outil-matière à usiner rendent ce procédé difficilement exploitable.

Ces constatations nous ont conduits à développer des travaux de recherche qui rentrent dans ce cadre et qui ont pour objectif d'étudier le comportement des différents matériaux à outil et en particulier le nitrure de bore cubique (CBN) lors de l'usinage d'un l'acier fortement allié de nuance AISI D3 traité à 60HRC.

Notre thèse est structurée comme suit :

Le premier chapitre est réservé à l'étude bibliographique qui concerne le tournage dur. Ce dernier représente une nouvelle technique d'usinage. Nous montrons l'intérêt économique qu'il peut apporter et les limites actuelles pour son développement à l'échelle industrielle, ces avantages par rapport à la rectification. Ensuite nous examinons les phénomènes régissant le processus de coupe en particulier, l'usure des outils, les lois d'usure, les efforts de coupe, la température de coupe, la rugosité de surface, les vibrations et la morphologie du copeau. Une autre partie très importante est réalisée dans ce chapitre, ayant pour but de présenter une synthèse des 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 l'étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

Dans le chapitre III, nous présentons en premier temps une comparaison entre les performances en termes d'usure des différents types de matériaux de coupe (CBN, CC6050, CC650, CC670 et GC4005) en usinant l'acier AISI D3 à deux vitesses de coupe $V_c=110\text{m/min}$ et $V_c=200\text{m/min}$. Nous exposons également les résultats de l'évolution des efforts de coupe et la dégradation de la qualité de la surface de la pièce sous l'effet de l'usure de ces cinq matériaux à outil. En deuxième temps, nous exposons une comparaison entre les performances en termes d'usure des cinq matériaux testés, ainsi que les résultats de l'évolution des efforts de coupe et de la rugosité de surface en fonction du temps et de l'usure. Pour les matériaux étudiés, on a focalisé notre étude sur l'outil CBN. Nous présentons aussi les différentes formes d'usure (VB, KT) en fonction du temps d'usinage et cela pour différentes conditions de coupe. Une série de micrographies et des photos MEB avec les analyses par rayon X sont réalisées afin de caractériser l'usure sur les surfaces en dépouille et en cratère. En dernier lieu, nous présentons une exploitation des résultats de l'usure en termes de durée de vie et de productivité. Le traitement statistique des résultats nous a permis de proposer des modèles mathématiques de la tenue.

Dans le chapitre IV, nous présentons les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe, effort spécifique, effort résultant, puissance de coupe et rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier AISI D3 par cinq matériaux de coupe (CBN, CC6050, CC670, CC650 et GC4005). Nous présentons également les résultats de l'impact de la dureté de la pièce sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe, rugosité et la puissance de coupe lors de l'usinage avec l'outil CBN. En fin, nous présentons à la fin de ce chapitre les résultats de la température de coupe.

Dans le chapitre V, nous présentons une étude statistique des résultats 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, profondeur de passe et rayon du bec de l'outil) et les paramètres étudiés (effort de coupe, rugosité et température de coupe) lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D3 avec un outil en CBN 7020 et la céramique 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 utilisons 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.

Chapitre I

***Connaissances des phénomènes
régissant le processus de coupe***

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 (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.

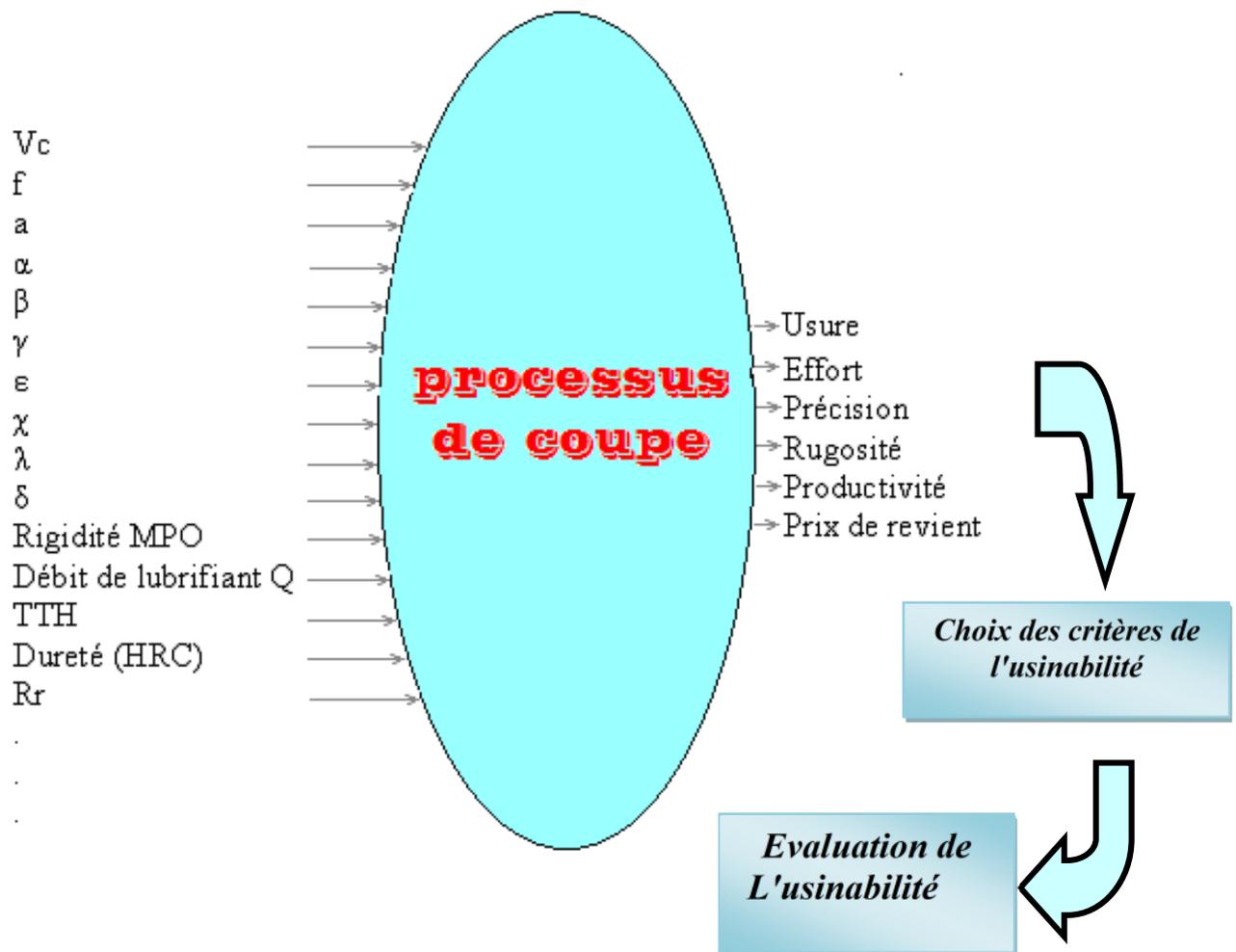


Figure I.1 : Processus de coupe et critères d'usinabilité

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 [CZA 62]. 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 [CZA 62].

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 [MAT 70], les principaux critères sont classés selon l'ordre suivant :

- la rugosité de la surface usinée, coupe 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 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 [ROB 73] et les classe de la manière suivante :

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

Aussi, d'après [ROB 73], 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 % [MAT 70], 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.

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

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.

Finallyment 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 ,...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 élevés 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 [CUN 92].

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.

Matériau	Conductivité thermique, W/(m.°K)
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.

d) 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.1.4 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 [BED 89].

b) Essai d'usure à vitesse croissante

Afin d'abrèger 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.2 La méthodologie du Couple Outil Matière (COM)

I.2.1 Le concept de COM

Dans le milieu industriel, pour les processus d'usinage par outil coupant, la préoccupation principale est de déterminer les paramètres de coupe optimaux. Du fait des limitations des méthodes de calculs, les ingénieurs ont tenté de développer des méthodologies robustes et de les mettre en oeuvre avec un minimum d'expériences. Le but de ces méthodologies est de

déterminer les paramètres de coupe en utilisant l'information accessible obtenue à partir d'outils de mesure conventionnels, ou d'observations visuelles. Une de ces méthodologies est construite avec le concept du Couple Outil / Matière (COM). Ce concept rassemble une suite de modèles physiques dans une méthodologie propre unifiée pour déterminer une plage de travail d'un outil donné dans une pièce définie. Etablir un COM consiste à définir des limites pour la vitesse de coupe, la pénétration et l'avance par tour. Cette zone est déterminée en utilisant un minimum d'expériences. Chaque procédé d'usinage (tournage, fraisage, perçage ...) possède son propre ensemble de modèles et de procédures méthodologiques. Ce concept du COM est appliqué dans l'environnement industriel [DES 03].

La Norme Française [NF-E-66-520 97] propose les différentes activités pour obtenir la zone de fonctionnement. Cette norme concerne essentiellement la caractérisation d'un outil travaillant un matériau. La géométrie de la pièce usinée et la dynamique du système usinant ne sont considérées que comme des éléments de restriction du COM. Elles sont peu prises en compte dans les procédures expérimentales. Cette norme est établie pour le tournage, le fraisage et le perçage. D'autres méthodologies, comme expliquées par quelques auteurs [SCH 01] [SCH 00] [END 02], simulent le comportement de la coupe et permettent une certaine prévision des paramètres de coupe les mieux adaptés. D'autres travaux comme ceux présentés dans [HAM 96] ont exploité le concept de matériau usinant/usiné pour étudier l'usinabilité de différents aciers. Jusqu'à présent, la méthodologie COM et son extension POM (Pièce Outil Machine) ne sont appliquées dans l'industrie qu'en considérant une seule composante de la force de coupe, l'effort de coupe tangentiel F_c . La méthodologie COM a été développée en considérant l'usinage traditionnel et assez peu l'Usinage à Grande Vitesse (UGV) ou le Tournage dur (TD).

I.2.2 Le COM et liaison avec le système POM

La boucle cinématique du système usinant comprend de nombreux composants. Elle peut être illustrée simplement comme sur la figure I.2 dans le cas du tournage. Sur cette figure la flèche circulaire lie les éléments du système POM. Seule l'interface Pièce – Outil ne présente pas de liaisons mécaniques. Ils sont connectés par le COM qui est l'élément excitateur. Les paramètres d'usinage sont choisis dans le COM associé, et il est nécessaire de considérer l'ensemble du système usinant dans la boucle.

Les éléments du système POM restreignent la zone de validité du COM. Par exemple, les gammes de fréquences de la broche qui font vibrer l'ensemble du système POM seront à exclure du COM. La démarche consiste donc à restreindre les limites du COM en considérant les éléments du POM. Sur la figure I.2, nous pouvons donc distinguer clairement le niveau du COM et celui du POM. Le POM est constitué de l'ensemble des éléments excités par le COM.

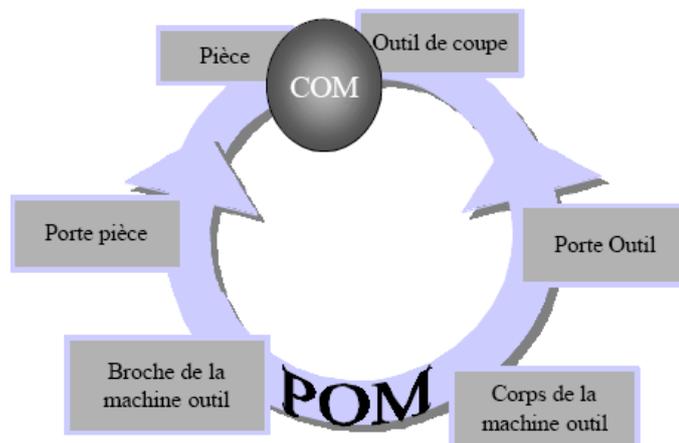


Figure I.2 : Composants de la chaîne cinématique associés au COM et au POM [DES 03].

I.3 Matériaux de coupe et revêtement des outils

I.3.1 Méthodologie de choix d'un outil de coupe

La figure I.3 montre, selon Komanduri [KOM 85], la méthodologie du choix d'un outil de coupe en vue de l'usinage d'une pièce donnée.

L'accent peut être mis sur :

- La dureté (particulièrement la dureté à chaud).
- La ténacité (c'est à dire sa résistance mécanique).
- La stabilité chimique (vis à vis de la pièce à usiner).
- La régularité.
- La disponibilité et le coût du matériau constituant l'outil.

Quant à savoir laquelle de ces propriétés est la plus importante, cela dépend :

- Du matériau usiné (dur, tendre, abrasif,...) ;
- De type de coupe (dégrossissage ou finition) ;
- Des conditions de coupe (à grande vitesse ou faible vitesse) ;
- Des exigences en précision, fini et intégrité de surface de la pièce à usiner ;
- De l'économie liée à la vie de l'outil.

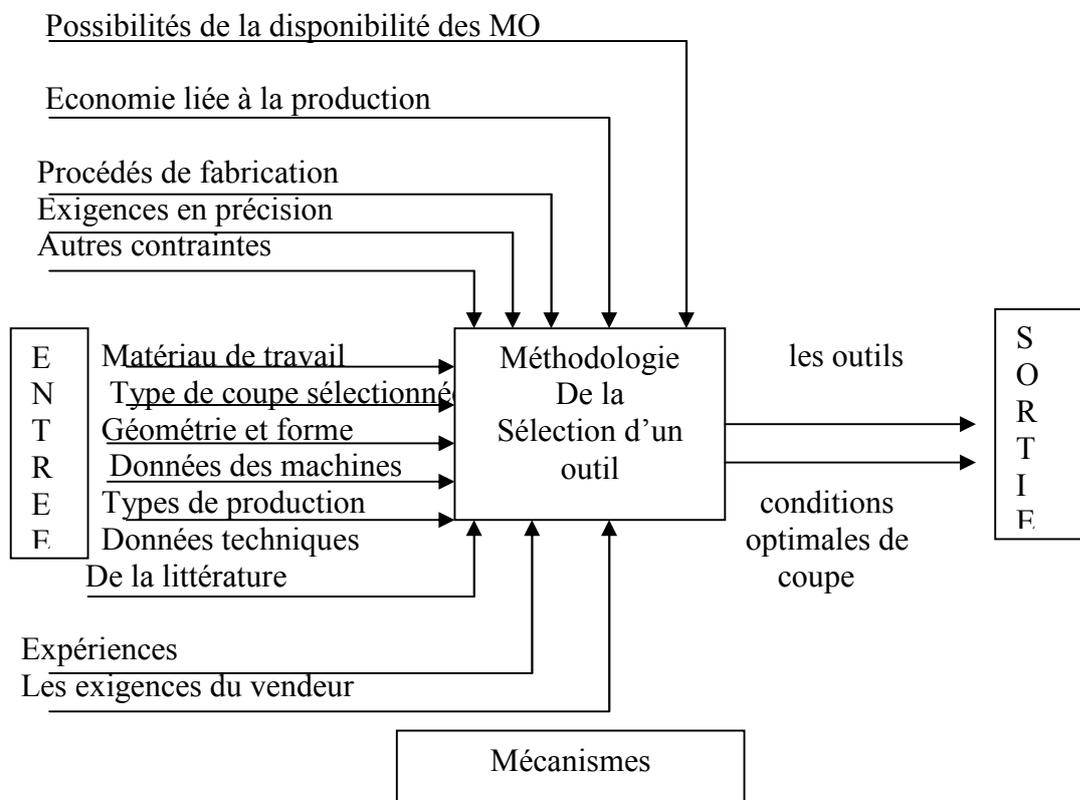


Figure I.3 : Méthodologie du choix d'un outil de coupe [KOM 85]

On remarque donc l'importance que revêtent les propriétés du matériau dans le choix d'un outil de coupe. Les matériaux possibles sont nombreux et il nous paraît intéressant d'en donner un aperçu sur leur évolution.

1.3.2 Evolution des matériaux à outil

Plusieurs matériaux ont été successivement introduits depuis 1890 permettant des machines outils plus rapides et plus puissantes [MAY 78], [PIE 88]. Historiquement, l'évolution est représentée sur le graphe ci-dessous (figure I.4).

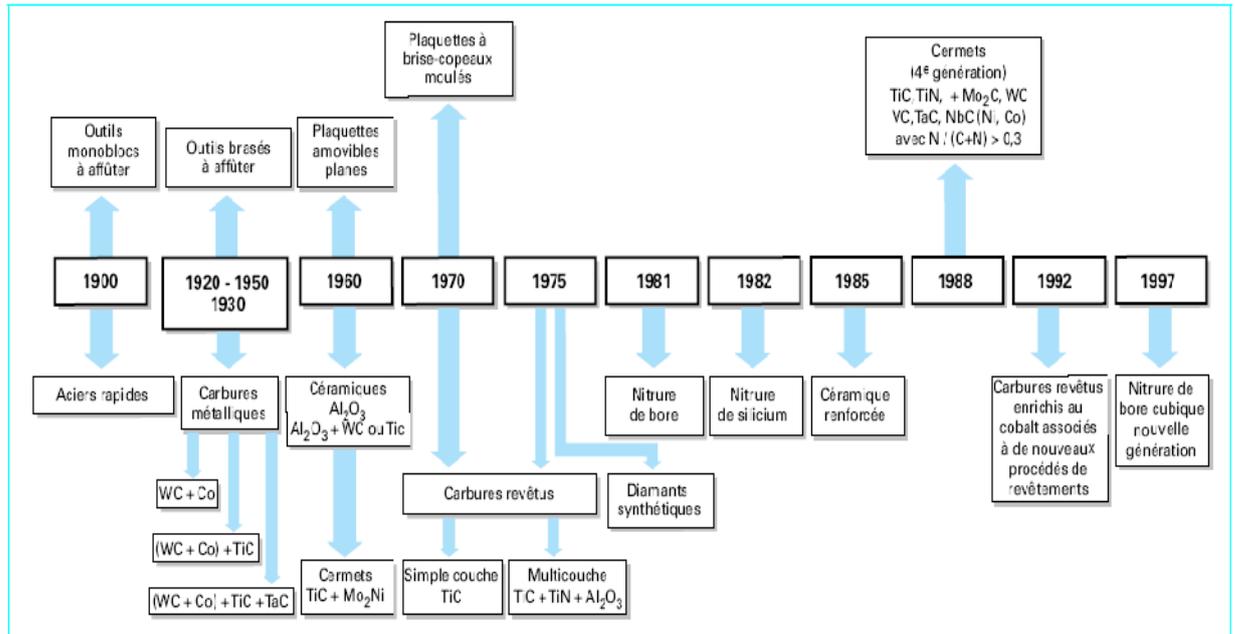


Figure 1.4 : Date d'apparition des matériaux à outil sur le marché Européen [BAG 90].

1.3.3 Matériaux pour plaquette de coupe

L'amélioration des performances des outils de coupe passe par l'étude des propriétés des Matériaux tels que :

- la dureté pour combattre l'usure,
- la résistance mécanique à chaud pour supporter les hautes températures atteintes durant les opérations de coupe,
- la ténacité pour résister aux chocs dus aux interruptions d'usinages ou aux vibrations,
- l'inertie chimique pour éviter les dégradations de l'outil par réaction avec la pièce usinée (diffusion chimique) et avec le milieu environnemental de l'usinage (oxydation).

Généralement ces propriétés sont interdépendantes, et l'amélioration de l'une d'entre elles peut se faire au détriment des autres. Sur la Figure I.5, l'outil de coupe idéal est symbolisé par un pentagone qui passe par les maxima des qualités nécessaires à un bon outil [SAF 07].

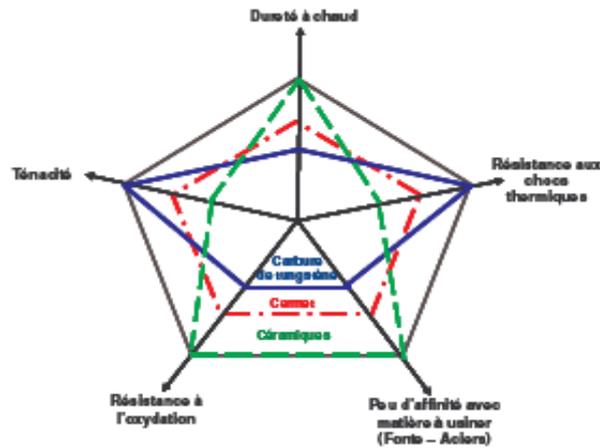


Figure 1.5 : Positionnement comparatif des propriétés de différents matériaux de coupe [SAF 07].

Ce schéma montre que la céramique est un bon complément du carbure de tungstène pour la tenue thermique, le cermet est en position médiane. Les outils carbures ont une ténacité élevée mais une dureté faible par rapport aux matériaux avancés tels que les outils CBN ou céramiques.

Le choix d'un matériau pour un outil est le résultat d'un certain nombre de compromis. La modification des conditions de coupe, du procédé d'usinage ou du matériau de la pièce suffit à bouleverser ce compromis. C'est pourquoi il existe une grande variété de matériau de coupe. Les différents matériaux pour outils de coupe peuvent être regroupés selon différentes catégories :

- les aciers rapides (HSS),
- les carbures,
- les céramiques,
- les matériaux ultra-durs (Nitrure de bore cubique CBN, diamant polycristallin PCD).

La figure 1.6 schématise la position des classes de matériaux utilisés dans un diagramme (dureté-température, dureté-ténacité) et permet d'entrevoir que les domaines d'applications de chaque classe doivent être spécifiques.

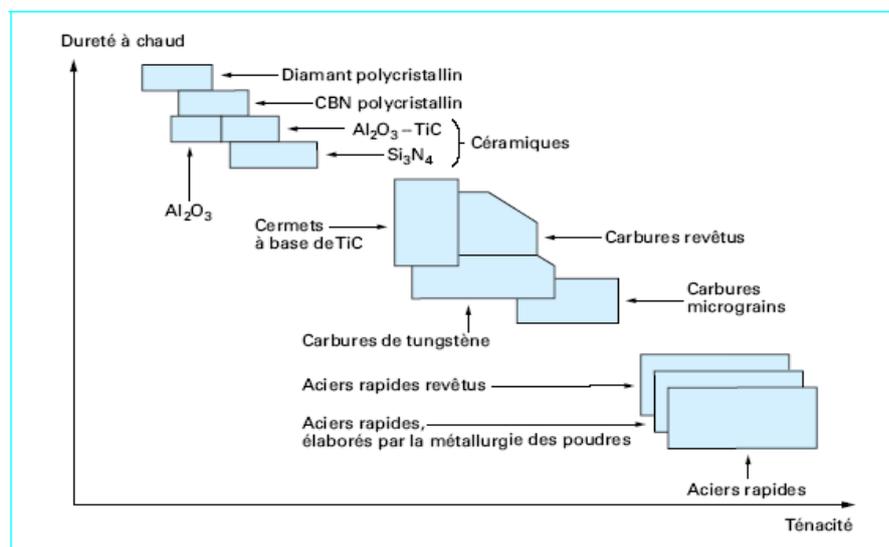


Figure 1.6 : Comparaison de matériaux de coupe [BAG 90].

L'acier rapide (AR) est utilisé depuis le début du siècle et il constitue encore aujourd'hui un matériau très utilisé. Il possède la ténacité la plus élevée et demeure donc un choix privilégié pour les opérations instables et à coupe interrompue. De plus, il permet des arêtes très tranchantes, qui permettent la réalisation d'usinage sans bavures, à cet égard il est particulièrement intéressant pour l'usinage des polymères.

Le carbure de tungstène cémenté est devenu le matériau le plus utilisé. Ce substrat cémenté est obtenu par frittage de poudres métalliques constituées d'une « matière » dure (à base de carbure de tungstène WC) et d'un liant fusible lors du frittage (cobalt). Il présente un bon compromis dureté-ténacité et peut être utilisée à des températures supérieures à celles de l'acier rapide. En plus du carbure de tungstène (WC) et du Co, le carbure peut obtenir dans des proportions variables des carbures additifs : souvent du carbure de titane (TiC), du carbure de tantale (TaC), du carbure de Niobium (NbC) pour les plus utilisés. Ces carbures additionnels permettent de diminuer l'usure en cratère qui survient lors de l'usinage de l'acier. Le cobalt confère au substrat sa ténacité.

Le mot **cermet** provient de la contraction des mots **céramique** et **métal** Céramique / Métal.

Dans l'application qui nous intéresse ici, **cermets**, est le nom générique utilisé pour les carbures à base de titane, parmi lesquelles figurent le carbure de titane TiC, le carbonitride de titane TiCN et le nitrure de titane TiN. Comparé aux carbures cémentés, les cermets possèdent une meilleur thermiques mais au détriment de la ténacité [VAS 08].

Les outils en céramique sont chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevé. Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 ou de nitrure de silicium (Si_3N_4). Leur application est principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage [PAS 87].

Le CBN (nitrure de bore cubique) possède une dureté extrêmement élevée, devancée seulement par le diamant. A chaud, cette dureté demeure excellente et il peut être utilisé jusqu'à 2000°C. Moins fragile que la céramique, il possède une excellente résistance à l'usure par abrasion. Son coût élevé le limite principalement à la production en série. Les cristaux de CBN, similaires à ceux du diamant synthétique, sont maintenus par un liant céramique ou métallique. Un liant céramique offre une ténacité faible mais une meilleure stabilité chimique et une excellente résistance à l'usure. Le liant métallique offre les caractéristiques inverses (bonne ténacité et moins résistant à l'usure). On recommande le CBN pour l'usinage de pièces dont la dureté est supérieure à 48HRC.

Le PCD (Diamant polycristallin) est un diamant synthétique qui possède une dureté proche de celle du diamant naturel (dureté 10 dans l'échelle de Mohs). Ce matériau est très onéreux et ces applications sont limitées à l'usinage des matériaux non-ferreux. La haute résistance à l'usure par abrasion les rend économiquement viables pour l'usinage des matériaux hautement abrasifs tels que les composites et le graphite [BOU 05], [MAC 00], [VAS 08].

I.3.4 Les revêtements

La métallurgie des plaquettes reposent sur deux composantes : le substrat et le revêtement Figure I.7. Le substrat supporte les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage. Le revêtement améliore la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur la plaquette. Les revêtements sont depuis 1960 un domaine important de recherche. Améliorant les conditions de coupe et la productivité, l'emploi des revêtements s'est généralisé. Aujourd'hui la plupart des nuances de carbure sont revêtues.

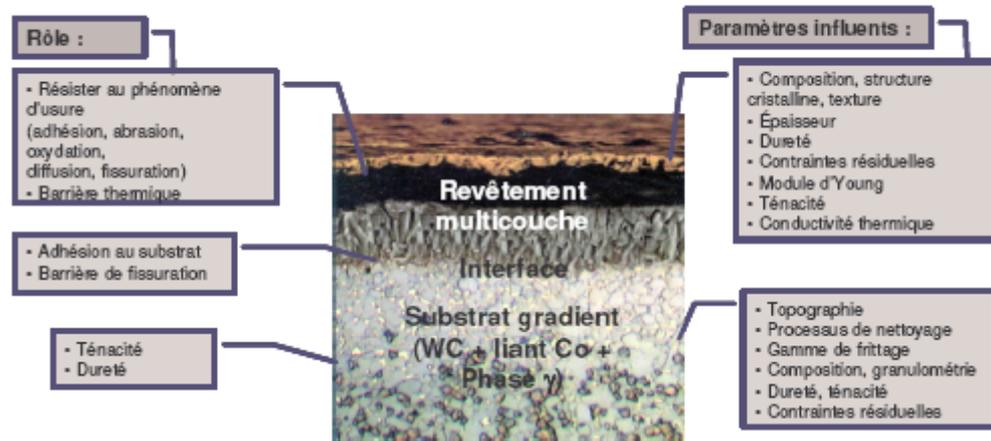


Figure I.7 : Rôle des revêtements [VAS 08].

Le principe consiste à recouvrir le substrat d'un film mince. L'épaisseur totale du revêtement est généralement comprise entre 3 et 15 μm . Les méthodes de dépôt sont de type CVD (dépôt chimique en phase vapeur à température médium, 800 – 1000°C) ou de type PVD (dépôt physique en phase vapeur, 400 – 600°C). La qualité d'adhérence au substrat est un critère essentiel pour le choix du revêtement. Les matériaux déposés sont également sélectionnés par leurs propriétés à haute température (dureté, ténacité, conductivité thermique). La Figure 1.7 illustre le rôle d'un revêtement. Pour l'essentiel il doit protéger le substrat de l'usure (adhérence, abrasion, oxydation, diffusion entre copeau et matière usinée), protéger thermiquement et résister à la fissuration [PAG 03]. Les matériaux les plus fréquents rencontrés sont :

- Carbure de titane TiC
- L'alumine Al_2O_3
- Et leurs associations TiCN (carbonitride de titane), AlTiN, ...

Différents travaux montrent que les outils carbures revêtues en TiCN ont les propriétés requises pour l'usinage des matières qui ont une dureté inférieure à 42 HRC, alors que les outils revêtues à base d'alumine s'utilisent pour des duretés supérieures à 42 HRC [ALT 98].

Les principales propriétés de ces revêtements sont présentées sous forme comparative dans le Tableau I.2.

Revêtements	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	Excellent	Petite	Petite	Bon
TiN	Bon	Bon	Bon	Excellent
Ti(C, N)	Moyen	Moyen	Moyen	Très bon
Al_2O_3	Très bon	Excellent	Excellent	Moyen

Tableau I.2 : Comparatif des propriétés de certains revêtements [SAF 07].

I.4 Duré de vie et endommagement des outils de coupe

I.4.1 Usure des matériaux difficiles à usiner

Durant le processus de coupe et suite à l'action intensive et mutuelle entre les surfaces de contact de la partie active de l'outil et celles de la pièce à usiner, surgissent de grands efforts de coupe, des frottements et de hautes températures, qui provoquent l'apparition de l'usure sur les facettes de l'outil. Celle-ci conduit à l'endommagement de la qualité de l'état de surface et affecte la précision de la pièce usinée. L'usure des outils de coupe est un processus très complexe, durant lequel, sur les surfaces de contact de l'outil avec le copeau et la pièce à usiner, apparaissent des phénomènes physico-chimiques. Autrement dit l'usure est un processus de destruction des couches superficielles de la partie active de l'outil, qui conduit avec le temps à la modification progressive de la forme et de l'état de surface des pièces usinées. Elle affecte également les paramètres géométriques (angles et rayon du bec) de l'outil, la température, les efforts de coupe, la durée de vie, la précision macro et micro-géométrique de la surface usinée. En fonction des conditions d'usinage, elle peut affecter une, deux ou l'ensemble des surfaces de la partie active de l'outil [POU 99], [DAW 02], [ROU 75], [WEI 71], [LUO 99], [REM 06].

Il est à noter que l'usure des outils de coupe, notamment lors de l'usinage des matériaux difficiles à usiner, se manifeste dans des conditions de travail beaucoup plus sévères que celles des pièces de machines. En effet la pression spécifique dans les surfaces de contact des pièces de machines ne dépasse pas quelques MPa et la température d'échauffement est inférieure à 100°C, alors que la pression spécifique dans les surfaces de contact de la partie active d'un outil de coupe est de l'ordre de 10^3 à 2×10^3 MPa. La température d'échauffement dans ce cas varie de 100°C à 1000°C et même plus [HUG 95], [POU 04], [YAL 04], [NOT 81], [KON 84], [ZIM 97].

I.4.2 Mécanismes et formes d'usure

La nature physique du mécanisme d'usure des outils travaillant dans des conditions différentes est élucidée par une série d'hypothèses [WEI 71], [LUO 99], [KIV 03], [LIU 03], [DOL 01] [DEU 01] [FAR 03]. Selon ces dernières le mécanisme d'usure s'explique par l'effritement, l'abrasion, l'adhésion, la diffusion, corrosion et la fatigue thermique (figure I. 8).

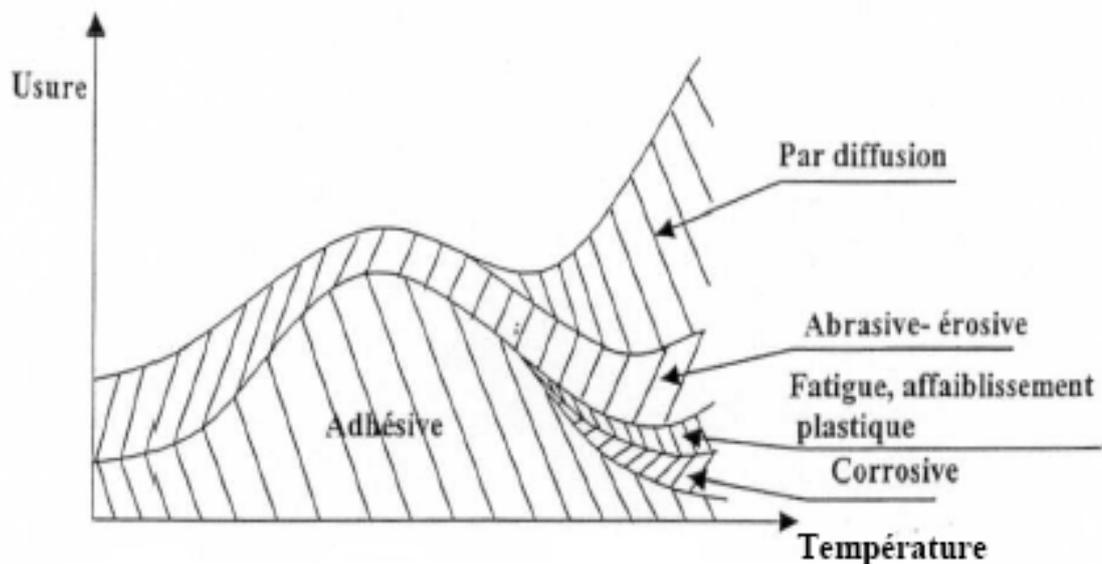


Figure I.8 : Mécanismes d'usure [DAW 02].

En fonction des conditions de travail (propriétés physico mécaniques de la matière à usiner et celles du matériau de l'outil, éléments du régime de coupe, liquide de lubrification et d'arrosage, rigidité du système usinant...etc.), l'usure des outils de coupe se manifeste d'une manière très variée. En règle générale, l'outil s'use suivant plusieurs surfaces et en particulier la surface d'attaque et ses surfaces de dépouille (figure I.9) suivant 6 modes d'usures (en dépouille, en cratère, en entaille, par déformation plastique, par écaillage et par rupture de la pointe de l'outil). Néanmoins les conditions de travail peuvent faire dominer tel ou tel type d'usure [ROU 75], [POU 99], [WEI 71], [YAL 04], [REM 06], [YAL 05], [WAN 03].

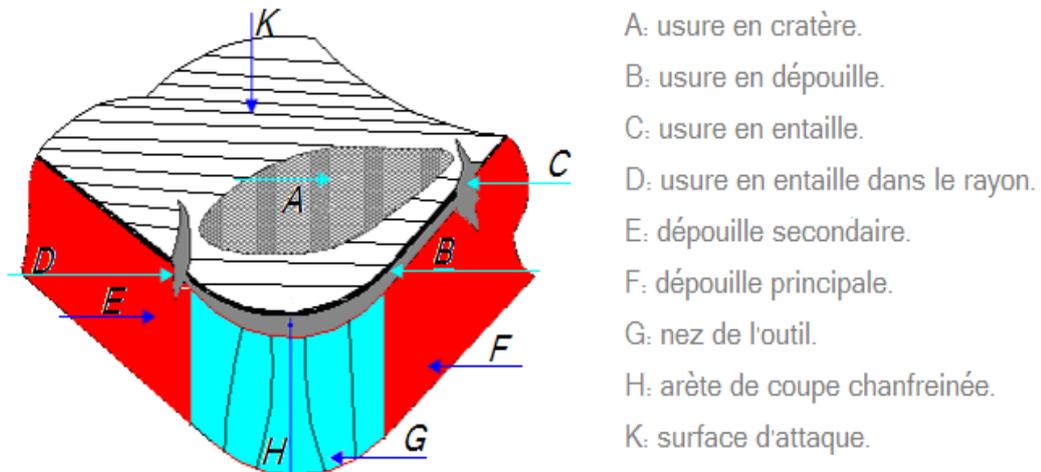


Figure I.9 : différents formes d'usure.

En se basant sur ce bref aperçu traitant la question de l'usure des outils de coupe, on constate que les principaux paramètres technologiques, tels que la précision d'usinage, la qualité de l'état de surface, le prix de revient, la productivité de travail,...etc., sont en relation directe avec l'usure. Par conséquent l'étude approfondie et continue de l'usure, notamment lors de l'usinage des aciers durcis avec des matériaux à outils de hautes performances (Céramiques et CBN) est une tâche d'une grande importance économique et technologique en productique mécanique.

I.4.3 Modèles de la tenue des outils de coupe

Taylor fut le premier à proposer en 1907, un modèle mathématique reliant la durée effective de coupe T d'un outil aux paramètres de coupe. Depuis les travaux de Taylor, divers expérimentateurs ont proposé plusieurs modèles mathématiques reliant la tenue T d'un outil aux paramètres de coupe. Parmi ces modèles on peut citer [BOU 06], [ROU 75] :

a) *Modèle de Taylor (1907)*

$$T = C_v \cdot V^n \quad \text{ou} \quad VT^{1/n} = C_T \dots\dots\dots (I.2)$$

Où

V_c : Vitesse de coupe ;

T : Durée de vie en minutes ;

C_v, C_T : Constantes dépendantes du couple outil/pièce ;

n : Exposant de Taylor prenant pour valeur ;

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

$$\log T = n \cdot \log V + \log C$$

b) *Modèle de Gilbert (1950)*

Ce modèle est la généralisation du modèle de Taylor, dans lequel la constante C_V est remplacée par une expression qui tient compte de la géométrie de copeau telle que :

$$T = C f^x a_p^y V^n \dots\dots\dots (I.3)$$

Où

C : Dépend de la nature de l'outil et du matériau usiné,

a_p : Profondeur de passe,

f : Avance,

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

c) Modèle de Colding (1960)

Ce modèle tient compte de la courbure négative de la courbe (voir figure I.10). Ce sont des polynômes de la forme :

$$K+ax +cy-z =0; \text{ avec } \dots\dots\dots (I.4)$$

$$x=\log f; y=\log v; z=\log T;$$

Ce polynôme se résout comme le modèle de Gilbert par contre le polynôme du 2^{ème} degré en x, y, z de la forme suivante :

$$K+ax+bx^2+cy+dy^2-z+ez^2+Fxy+gyz+hxz=0 \dots\dots\dots (I.5)$$

d) Modèle de Kronenberg (1968)

$$T=C (V+K)^m \text{ ou encore } T+K=CV^n \dots\dots\dots (I.6)$$

En prenant le logarithme des deux parties de (1.6), on aura :

$$\text{Log}(T+k)=n \log(V) +\log(C)$$

Posons : $x=\log(V)$; $y=\log(T+k)$ on obtient :

$$Y=nx+\log(C) \dots\dots\dots (I.7)$$

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

e) Modèle de König-Depiereux (1968)

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

$$T=\exp [-\alpha V^\nu + \beta] \dots\dots\dots (I.8)$$

$$\text{Avec : } \beta=-[\gamma a_p^\mu + \delta f^\lambda]=\text{constante}$$

$$\text{Alors } \ln T=-\alpha V^\nu + \beta$$

$$\text{Posons : } X=V^\nu; Y=\log(T)$$

On obtient : $Y=-\alpha X+ \beta$ (équation d'une droite)

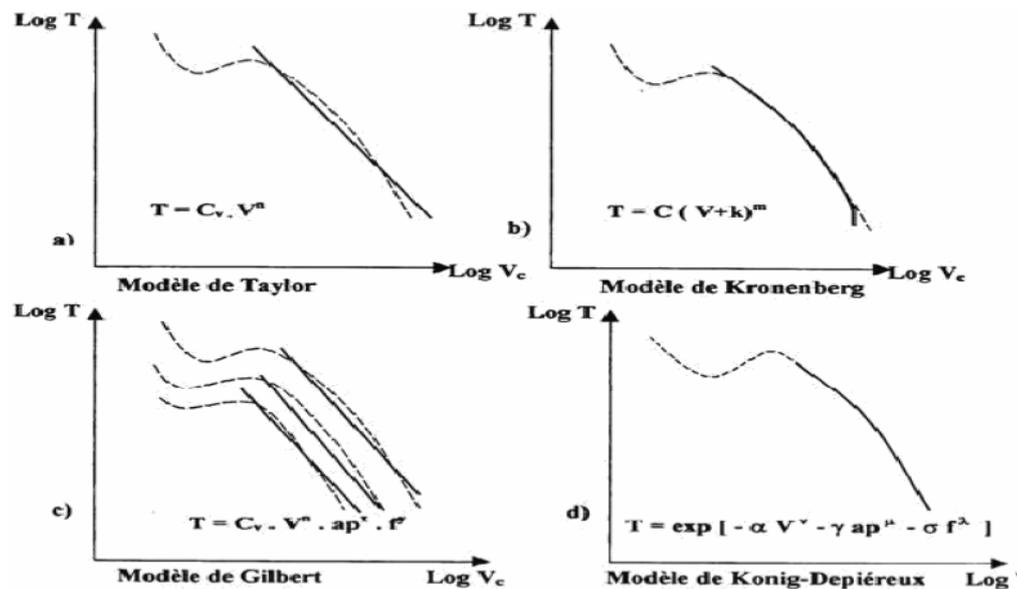


Figure I.10 : Représentation graphique des différents modèles d'usure.

Le choix de tel ou tel modèle sera le résultat d'un compromis entre, d'une part le souci de précision qui exige du modèle une représentation suffisamment exacte de l'essai expérimentale, et d'autre part, la nécessité pratique de conserver une formulation assez simple permettant une exploitation aisée de ces données sous des formes très diverses (abaque, graphique, etc....) [REM 01].

1.4.4 Facteurs influençant l'usure

Les principaux facteurs influençant l'usure des outils de coupe sont :

- Les propriétés physiques et mécaniques du métal en œuvre ;
- Nature du matériau constituant l'outil;
- La géométrie de la partie active de l'outil ;
- Les facteurs mécaniques d'usinage (V_c , f , a_p) ;
- L'état de l'arête tranchante et des surfaces qui la déterminent ;
- L'état de la machine-outil, la rigidité de l'ensemble porte-pièce/pièce ; porte-outil/outil.

Vitesse de coupe : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe. Ce paramètre a une très grande influence sur l'usure,

Avance : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe et diminuent la durée de vie de l'outil.

Profondeur de passe : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur de long de l'arête tranchante son influence reste modeste sur l'usure.

Matériau usiné : Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de ces certains éléments d'addition).

Lubrification : Son influence permet une amélioration de 25% sur la durée de vie.

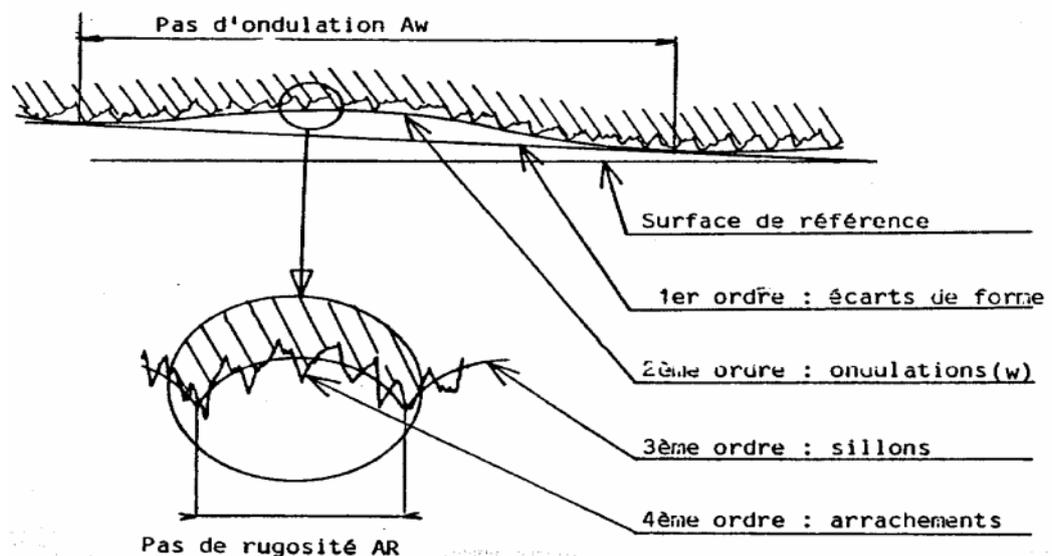
De nombreux essais ont été effectués pour démontrer l'effet des différents facteurs sur l'usure des outils. Il est bien établi que la vitesse de coupe est une variable importante influant sur l'usure des outils [MOS 75].

I.5 Rugosité des surfaces usinées

I.5.1 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.11) [BED 89].

- **Défauts du premier ordre** : Ce sont des défauts de forme (écart de rectitude, écarts de circularité), défaut apériodique.
- **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 apériodique.



Figures I.11 : Principaux défauts de surface.

I.5.2 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 :

$$\int_0^l y dx = 0 \quad (I.9)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne [CET 79].

- a) **Rugosité totale R_t** : R_t représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.
- b) **Rugosité R_z** : R_z représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.
- c) **Rugosité moyenne arithmétique R_a** : R_a représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX.
 R_a est calculée sur une longueur d'évaluation :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (I.10)$$

- 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.
- e) **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).

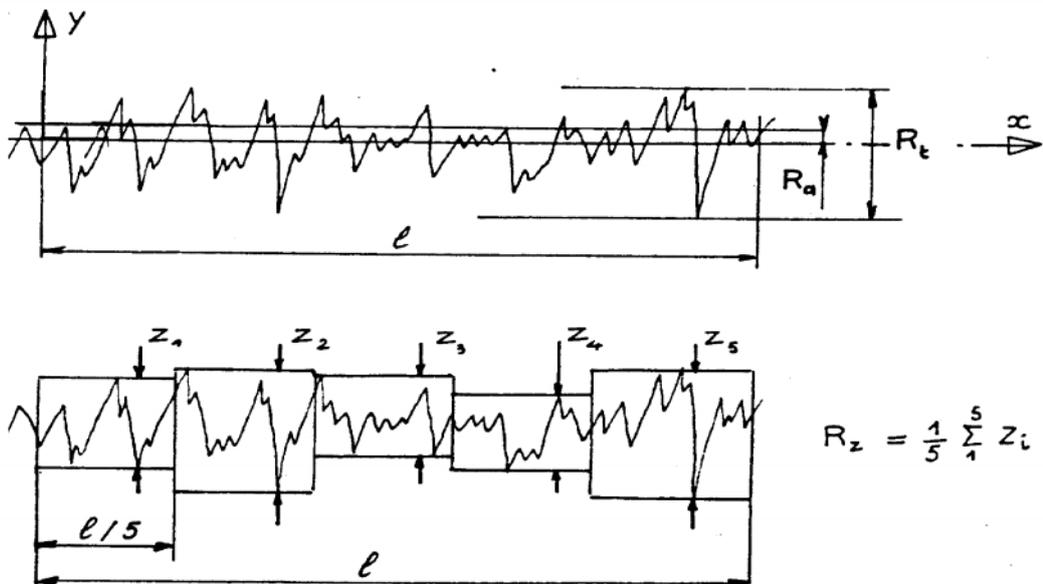


Figure I.12 : Principaux critères de rugosité.

I.5.3 Paramètres influençant la qualité de surface

La réalisation d'un usinage de qualité varie selon l'opération à effectuer. De nombreux paramètres influencent la qualité de surface de la pièce finale comme l'illustre le diagramme de la figure I.13. Ce dernier englobe tous les facteurs de coupe, humains et matériels, susceptibles d'agir sur l'intégrité de surface de la pièce usinée [GRU 03], [VAS 08].

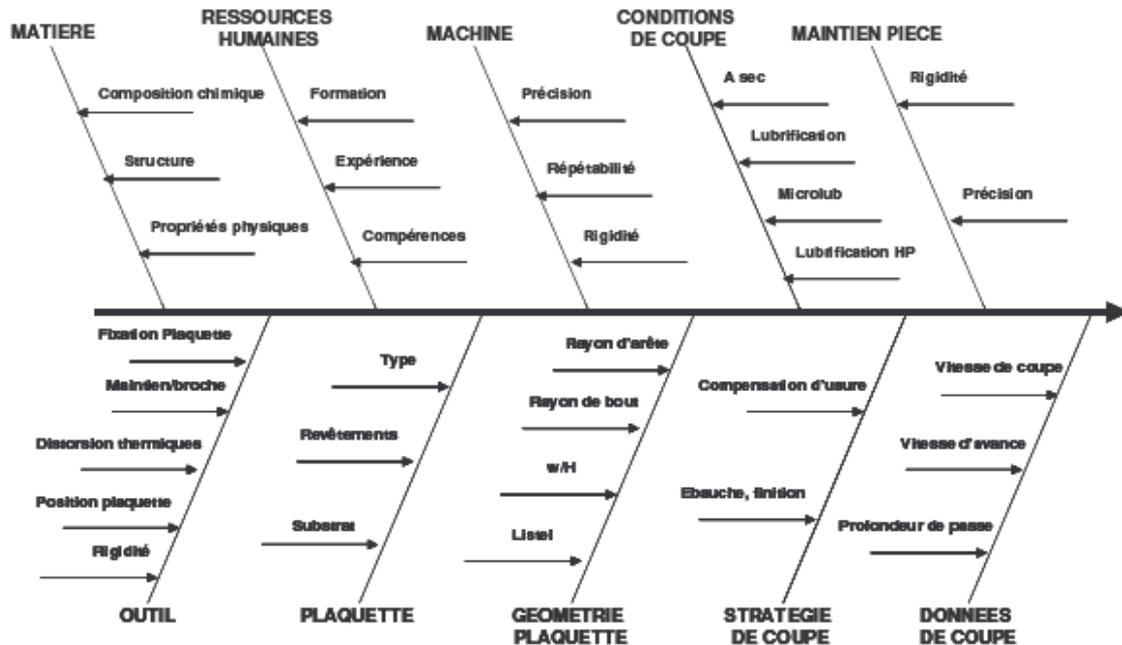


Figure I.13 : Paramètres de coupes qui influencent l'intégrité de surface en usinage, sous la forme d'un diagramme d'Ishikawa [VAS 08].

I.6 Efforts de coupe

En plus des informations concernant les phénomènes régissant le processus de coupe comme l'usure des outils et la rugosité de surface, les efforts de coupe sont également un bon indicateur de l'usinabilité. La connaissance des efforts nous renseigne sur les déformations plastiques et la puissance mécanique fournie nécessaire à l'enlèvement de matière. De plus, elle permet de délimiter la zone de coupe en choisissant des valeurs des efforts acceptables pour l'outil. La plage de fonctionnement autorisée est établie essentiellement en considérant l'évolution de la pression spécifique de coupe K_c (tournage) en fonction de la variation de la vitesse de coupe, pour des conditions d'avance et de profondeur de passe correspondant à celles du domaine de validité de l'outil coupant. Cette méthodologie s'inscrit dans la démarche appelée Couple-Outil-Matière (COM) (norme AFNOR XP E 66-520-5) [Norme 1994]. Elle permet de définir le domaine de fonctionnement de l'outil de coupe dans une matière donnée en fonction [HAB 06] :

- Des paramètres déterminant les limites d'utilisation de l'outil (déterminer les valeurs minimales et maximales de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe) indépendamment les uns des autres.
- Des paramètres d'interaction entre les paramètres limites (débit de copeaux, déformation et couple autorisés, exposants et constante du modèle de Taylor).
- Des paramètres auxiliaires qui tiennent compte des caractéristiques des moyens de production et permettant la transposition des conditions de coupe d'un procédé à un autre par simple calcul (de l'effort spécifique de coupe K_c).

La pression spécifique de coupe K_c (exprimé en N/mm^2) peut être calculée grâce par exemple à des mesures de puissance ou d'efforts de coupe en cours d'usinage en utilisant l'équation I.11

$$K_c = \frac{F_t}{f \cdot a_p} \dots\dots\dots(I.11)$$

Avec :

- F_t : Effort de coupe tangentiel [N]
- $A = a_p \cdot f$: Section du copeau non déformé [mm²]
- a_p : Profondeur de passe [mm]
- f : Avance [mm/tr]

La mesure des efforts de coupe se fait à l'aide d'une table dynamométrique de marque Kistler. Pour se faire, on mesure les déformations imposées par les efforts de coupe sur la table à l'aide de capteurs piézoélectriques précontraints dans les trois directions de l'espace. Les tables dynamométriques présentent des qualités appréciées en usinage à cause de leur sensibilité, leur précision et surtout leur grande rigidité qui leur permet de les utiliser sans perturber l'opération d'usinage [BIS 05].

Grâce à la platine Kistler, on peut obtenir les différentes composantes (F_a , F_r et F_t) de l'effort global de coupe ($F_{rés}$) :

- L'effort axial (F_a) ou effort d'avance : il correspond à la force appliquée sur l'outil parallèlement à l'axe de rotation de la pièce à usiner. Il est pratiquement nul dans la configuration de coupe orthogonale.
- L'effort radial (F_r) qui est défini comme étant l'effort parallèle au rayon de la pièce. Il est appelé aussi effort de pénétration.
- L'effort tangentiel (F_t) ou l'effort de coupe : c'est l'effort parallèle à la tangente à la surface de la pièce au niveau de la pointe de l'outil.

Les efforts de coupe résultants de l'interaction outil-pièce lors du tournage tridimensionnel sont présentés dans la Figure I.14.

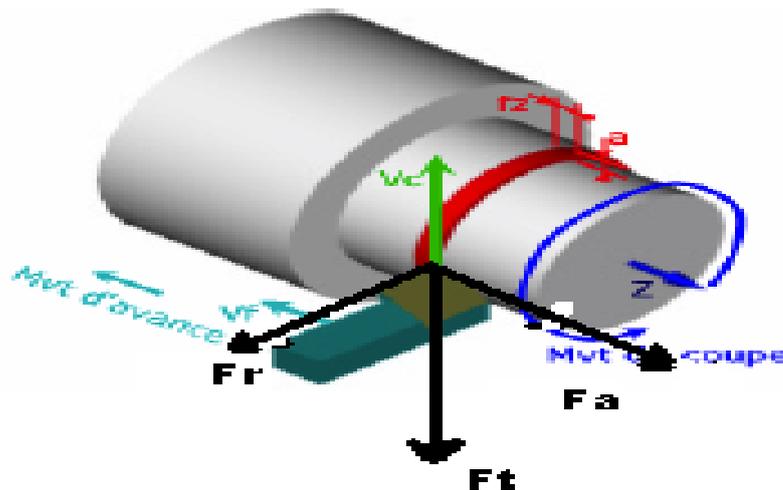


Figure I.14 : Schéma des différentes composantes de l'effort de coupe en tournage.

1.7 Aspect thermique de la coupe

1.7.1 Sources de chaleur

La formation du copeau dans des conditions d'UGV et l'usinage des pièces dures, met en jeu de très grandes vitesses de déformation et les matériaux sont fortement sollicités (figure I.15). Pour faire le lien avec l'usure des outils, les sollicitations thermiques doivent être étudiées. Depuis de nombreuses années, l'aspect thermique de la coupe a donc été largement étudié. Pourtant, à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu en usinage, il est très difficile de prédire l'intensité et la distribution des sources de chaleur. Les processus mécaniques et thermiques sont extrêmement couplés, en particulier parce que les propriétés des matériaux varient avec la température. On indique souvent que 90 à 100 % de l'énergie mécanique consommée est finalement convertie en énergie thermique [LIS 04]. Les principales sources de chaleur proviennent :

- Des déformations plastiques des zones de cisaillement primaire et secondaire,
- de la dissipation du frottement générée à l'interface outil-copeau et entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée de la pièce.

La chaleur ainsi créée va se répartir dans les différentes parties de l'outil, de la pièce et du copeau (figure I.16).

De fait, la répartition des flux ne se fait pas de manière équivalente et dépend bien sûr des conditions de coupe et des propriétés thermiques des matériaux. Seul un faible pourcentage de la chaleur générée est transmis à l'outil et la pièce, la majorité étant évacuée par le copeau, [Ay 97], [REC 04].



Figure I.15 : Température dans la zone de coupe en usinage dure [TRA 04].

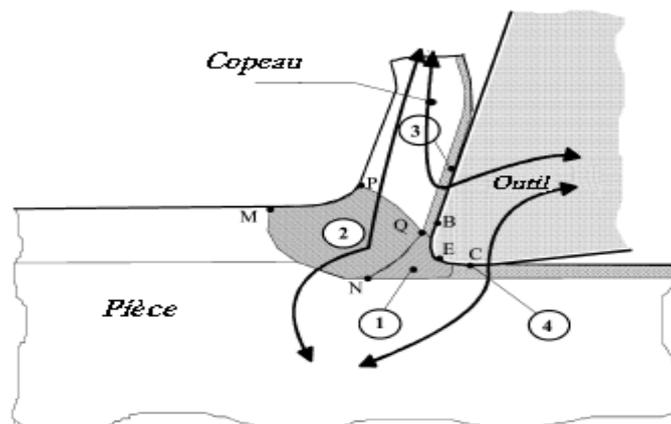


Figure 1.16 : Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur [BAT 02].

I.7.2 Influence de la température

La montée en température modifie les caractéristiques aussi bien du matériau usiné que du matériau de l'outil. La connaissance du champ thermique permet de remonter à l'énergie thermique dissipée lors de la coupe et de connaître les sollicitations imposées à l'outil ce qui peut avoir une grande importance lors de l'usinage (figure I.17) [BRO 82].

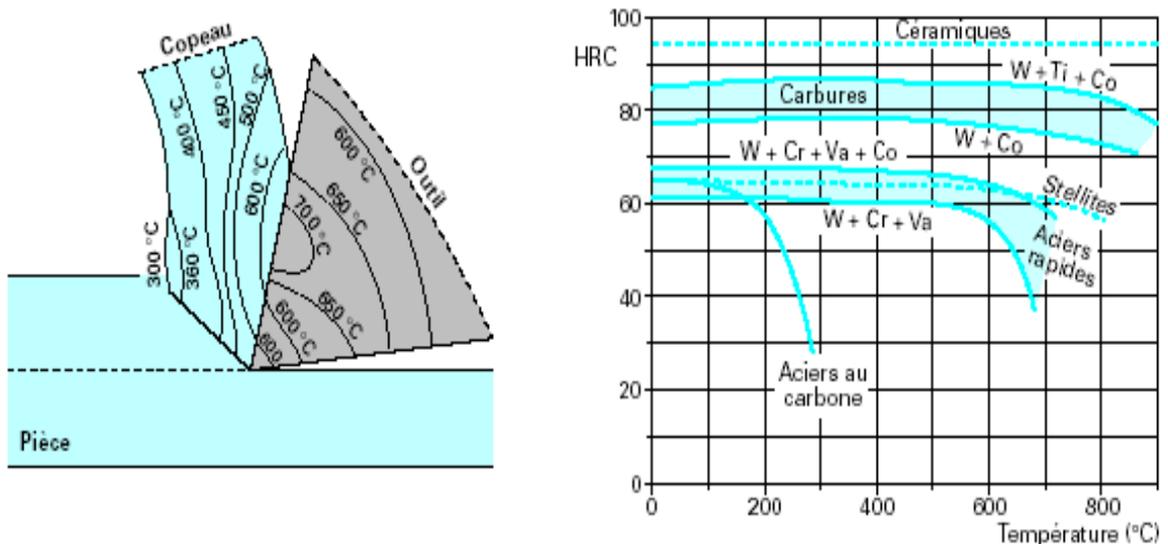


Figure I.17 : Distributions et influences de la température sur l'outil de coupe

I.7.3. Mesure de la température

Plusieurs méthodes sont envisageables pour la mesure des températures dans un processus de coupe selon la nature des informations souhaitées. Parmi celle-ci, on peut citer les principales méthodes suivantes [PAN 98] :

- Mesure par thermocouples implantés dans la plaquette de coupe. Pour ce type de mesure thermique la cartographie des températures est effectuée à partir de relevés ponctuels obtenus par des thermocouples implantés dans la plaquette de l'outil de coupe [BOU 93]. Cette réalisation présente des inconvénients majeurs liés à la mise en place de ces thermocouples (fragilisation de la plaquette, coût et fragilité élevés des thermocouples ...).
- Mesure directe de la température par thermocouples directs du couple outil- pièce. Dans le cas particulier où on ne désire qu'une valeur moyenne de la température, [STE 92], [STE 93] propose d'utiliser la jonction chaude au contact outil-pièce comme thermocouples.
- Mesure des températures par un pyromètre infrarouge solidaire de l'outil de coupe, focalisé sur l'arête de coupe [BIT 93]. Ce procédé de mesure a été retenu pour notre étude.
- Mesure par caméra thermique CCD [CAL 95] (figure I.18). L'avantage principal de ce type de mesure est lié à l'obtention directe de la cartographie des températures. Les caméras infrarouges sont de plus en plus employées pour mesurer la température et sa distribution, [VER 02], [SUT 03], [POT 04], [M'SA 04]. Néanmoins, ces techniques nécessitent un appareillage sophistiqué qui doit être rigoureusement calibré.

Parallèlement aux techniques expérimentales, Plusieurs auteurs ont développé des méthodes analytiques et numériques, [CHA 91], [OBI 96], [DAS 99], [BAT 02]. Parmi ces dernières, les méthodes des différences finies et des éléments finis sont les plus répandues.

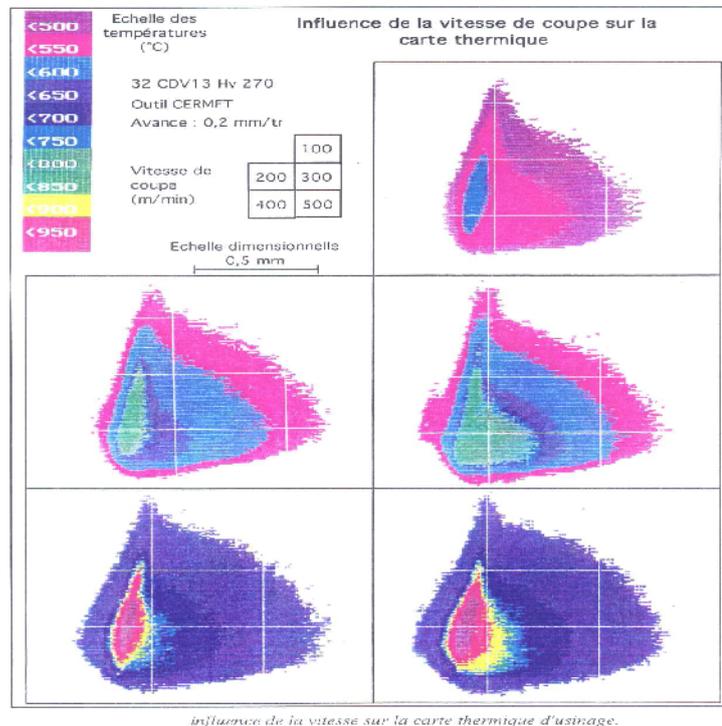


Figure I.18 : Exemple de résultats obtenus par Le Calvez [CAL 95].

1.8 Aspects dynamiques de la coupe

1.8.1 Effets des vibrations sur le processus de coupe

Les vibrations du système (machine, porte-pièce, pièce, outil et porte-outil), phénomène dit aussi de broutement, qui apparaissent lors des opérations d'usinage sont les sources de multiples difficultés surtout lors de l'usinage à grande vitesse et l'usinage des pièces dures.

- Ils dégradent la qualité de la surface usinée ;
- Ils affectent la durée de l'outil et accélèrent son usure ;
- Ils conduisent à une détérioration rapide de certains organes de la machine-outil (roulements- glissières...);
- Ils peuvent entraîner des dérèglages de certains organes de la machine outil;
- Les vibrations entre la pointe de l'outil et la surface usinée engendrent sur la pièce des défauts géométriques qui peuvent amener à rebuter la pièce (du point de vue des côtes);
- Les vibrations importantes diminuent la productivité et rendent même parfois impossible l'opération sur la machine-outil;
- Ils peuvent être aussi une source de fatigue et de gêne pour l'opérateur.

L'augmentation des performances des outils, l'apparition de nouveaux matériaux difficilement usinables rendent ces problèmes de plus en plus aigus, les machines étant alors souvent poussées au maximum de leurs possibilités.

I.8.2 Types de vibration

Dans les opérations de coupe, deux aspects de vibrations sont généralement considérés, un aspect de vibrations forcées et un aspect de vibrations auto-entretenues (ou auto-excitées).

a) Les vibrations forcées

Elles apparaissent sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par :

- La variation des forces qui s'exercent sur le système, variation due à la coupe interrompue ou une surépaisseur variable.
- Les effets dynamiques provoqués par un mauvais équilibrage des masses en mouvement.
- La précision insuffisante des guidages et organes de transmission.

b) Les vibrations auto-excitées

Les causes essentielles des vibrations auto-excitées, qui sont bien plus fréquentes que les vibrations forcées, sont à rechercher dans le phénomène de coupe proprement dit, ce sont :

- La variation de force de frottement du copeau sur l'outil, de l'outil sur l'ébauche ;
- L'écrouissage irrégulier de la couche enlevée suivant son épaisseur ;
- Les variations dimensionnelles de l'arête rapportée qui modifient en cours d'usinage l'angle de coupe.

Les caractéristiques de coupe pour un Couple Outil Matière donné sont généralement considérées comme indépendantes de la machine outil. Cependant, de plus en plus de considérations sur l'ensemble Pièce Outil Machine permettent de limiter l'espace des solutions d'un (COM) appliqué sur un système usinant précis pour réduire les risques de vibrations [CAL 98].

I.8.3 Comment limiter le broutement (la recherche de la stabilité d'usinage):

La stabilité d'usinage est le résultat de plusieurs stabilités composées de la pièce, machine-outil, système d'ablocage, outil et conditions d'usinage (figure I.19).

a) Action sur l'outil : La stabilité de l'outil est assurée par :

- Une longueur de porte-à-faux minimale ;
- Une fixation sûre et suffisante de l'outil ;
- Une liaison rigide et efficace avec le porte-outil ;
- Un choix de section d'outil optimale ;
- Le maintien de l'arête de coupe en bon état ;
- Un entretien approprié de l'outil utilisé (changement des composants endommagés, nettoyage de la surface d'assise de la plaquette etc...) ;
- L'utilisation d'un outil et d'un matériau de coupe adaptée de manière optimale ;
- L'augmentation de l'angle d'attaque pour diminuer les efforts de coupe.
- La réduction de la longueur d'arête en prise ;
- La réduction du rayon du bec de l'outil en tournage.

b) Action sur le porte outil :

- Choisir un porte outil assurant une trajectoire dégageante,
- Choisir un porte outil rigide,

c) Action sur la pièce et le porte pièce :

- Réduire au maximum les porte-à-faux ;
- Utiliser des porte-pièces rigides ;

- Supporter les pièces flexibles par des vérins ou des lunettes ;

d) Action sur la machine :

- Réduire les jeux fonctionnels dans les broches et les glissières ;
- Choisir la rigidité de la machine en fonction des conditions de travail.

En résumé, par rapport à notre problème, nous traiterons le cas de coupe stable et continue. La coupe stable est un processus où peu de phénomènes perturbateurs sont observés. La définition des conditions de coupe stables et leur étude sont utiles pour expliquer le comportement dynamique d'un système usinant.

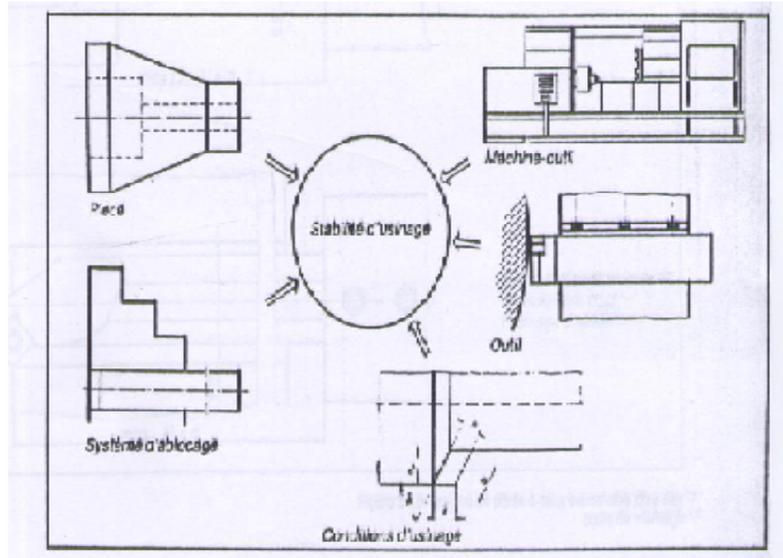


Figure I.19 : Paramètres d'influence de la stabilité d'usinage [BED 89].

I.9 Morphologie du copeau

Une nouvelle surface métallique est engendrée lors de la formation du copeau. Généralement le copeau est de forme courbe, sa morphologie est fortement influencée par les paramètres de coupe (essentiellement l'avance, la profondeur de passe). Il se forme par refoulement du métal devant la surface d'attaque de l'outil suivie d'un cisaillement d'un élément de copeau et du glissement de cet élément cisailé sur la face d'attaque.

I.9.1 Types de copeaux

Les mécanismes de génération de copeaux et les phénomènes thermomécaniques, intervenant conduisent, à l'échelle micrographique, à la formation de copeaux de natures et de morphologies très différentes. Les copeaux peuvent être classifiés suivant trois grands groupes : copeau continu, copeau avec arête rapportée, copeau discontinu [CAL 95], [HAB 06].

La pratique industrielle exige des copeaux courts. Les copeaux longs, lorsqu'ils sont enchevêtrés à la pièce, nuisent à son état de surface. Il existe une classification normalisée de la forme des copeaux. Les formes schématisées dans le tableau I.3 sont extraites de la norme ISO 3685.

1 Copeau ruban	2 Copeau tubulaire	3 Copeau en spirale	4 Copeau hélicoïdal en rondelle	5 Copeau hélicoïdal conique	6 Copeau en arc	7 Copeau élémentaire	8 Copeau aiguille
1.1 Long	2.1 Long	3.1 Plat	4.1 Long	5.1 Long	6.1 Attaché	7	8
1.2 Court	2.2 Court	3.2 Conique	4.2 Court	5.2 Court	6.2 Détaché		
1.3 Enchevêtré	2.3 Enchevêtré		4.3 Enchevêtré	5.3 Enchevêtré			

Tableau I.3 : Classification normalisée des formes des copeaux obtenue en tournage.

I.9.2 Paramètres qui influent sur le cisaillement du copeau

Le dégagement du copeau est optimisé avec la formation d'éléments courts. On dit alors que le copeau est fragmenté ou brisé. La forme des copeaux est largement influencée par la nature de la matière à usiner et peut varier d'une configuration continue à fragmentée. De ce point de vue, le mécanisme de coupe est un processus de formation et de fractionnement de copeaux. Il s'agit de contrôler l'écoulement du copeau de la zone de coupe. L'étude du fractionnement des copeaux est un domaine de recherche à part entière [THI 99], [THI 00]. Le schéma de la figure I.20, donne une idée des différents champs d'investigations. La formation du copeau est conditionnée par les paramètres de coupe, par le comportement du matériau usiné et par la nature de l'interface de contact outil/matière.

L'analyse des copeaux donne souvent des indications pertinentes sur le déroulement de l'usinage. Ainsi la couleur du copeau est un indicateur de température. Trop élevée, elle accélère l'usure de l'outil. Un copeau fragmenté à faible rayon de courbure est le signe de fortes contraintes mécaniques qui traduisent des efforts de coupe élevés.

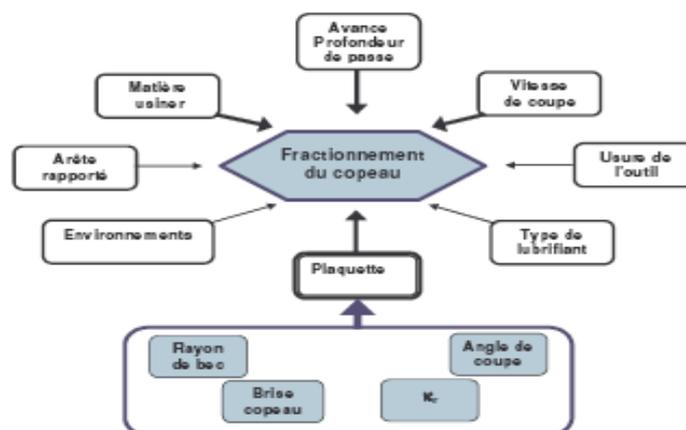


Figure I.20 : Champs de recherche sur le fractionnement du copeau [VAS 08].

I.9.3 Formation du copeau en usinage dur

Pour l'usinage des aciers très durs (~ 55 HRC), la formation de copeaux est différente de celle de l'usinage classique. En général, la coupe des aciers très durs entraîne la formation de copeaux discontinus appelés aussi en dents de scie. Plusieurs auteurs [KOM 81], [BER 92], [POU 99], ont étudié les mécanismes de génération de ce type de copeau tout en essayant d'expliquer les causes d'instabilités responsables de cette géométrie. D'après Komanduri et al. [KOM 82], cette instabilité dépend des conditions de coupe, de la rhéologie, des propriétés thermoplastiques du matériau, du cisaillement variable produit dans la zone de cisaillement, de la nature du contact outil copeau et de la réponse vibratoire de la structure de la machine-outil.

Dans ses travaux, Shaw [SHA 76] rappelle que ce type de copeau est observé pour la première fois dans l'usinage, à faible vitesse de coupe, du titane et des alliages réfractaires, ce qui à son avis favoriserait une concentration de l'énergie thermique dans les zones de cisaillement qui expliquerait la formation de copeaux segmentés. Ainsi, la concentration de l'énergie thermique dans des bandes très fines pourrait être due à un temps trop court de dissipation de chaleur [POU 99]. Vyas et Shaw [VYA 99] montrent que la rupture périodique est privilégiée sur une localisation purement plastique. Une étude effectuée par Nakayama [NAK 74] montre que les glissements périodiques observés sont causés par l'amorçage d'une fissure à la surface du copeau. [NAK 74] a étudié les copeaux produits lors de l'usinage de deux aciers durcis de microstructures différentes. Ils observent que, pour les deux microstructures, les copeaux obtenus sont en dents de scie et ceci est dû à la formation de bandes de cisaillement localisées dans les deux cas. Ce qui les amène à dire que cette morphologie n'est pas sensible à la microstructure du matériau. Ils ont aussi observé que la périodicité des segments est d'autant plus élevée que la vitesse de coupe est élevée.

D'autres travaux [MAT 87], [ELB 96], [KIS 97], [WAR 00], ont été menés pour expliquer les mécanismes intervenant lors de l'usinage dur. Les résultats obtenus par [POU 99] ont pu mettre en évidence, la formation des copeaux en dents de scie et confirmer la thèse de la rupture périodique et cela grâce à des essais de coupe interrompus réalisés sur l'acier à roulement 100Cr6 durci. A travers son étude, il décrit les différentes phases de la genèse de ce type de copeau comme suit (Figure I.21) :

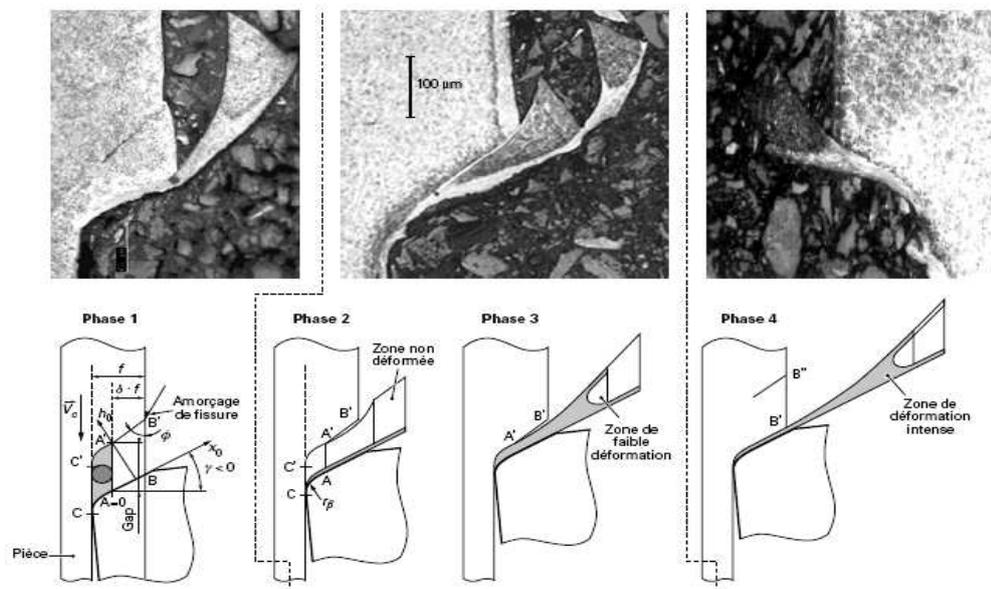


Figure I.21 : Différentes étapes de la genèse du copeau en dent de scie obtenu par des essais de coupe interrompue [POU 99].

I.10 Usinage des matériaux difficiles

I.10.1 Nouvelles stratégies de fabrication

Le tournage des métaux durs (dureté de 45 HRC à 68 HRC) est un procédé assez récent dans son utilisation (figure I. 22). Le but de celui-ci est, à terme de supprimer lors de l'usinage de pièces de précision, la phase de rectification, souvent longue et coûteuse.

Aussi, le tournage des métaux durs est prometteur et intéresse de nombreux industriels de part les gains de productivité qu'il doit permettre de réaliser sur l'usinage des pièces. En effet, avec les méthodes d'usinage conventionnel, là où une grande dureté fonctionnelle des pièces est demandée (50 à 65 HRC), consiste à faire les différentes phases successives suivantes [REM 01] :

- Usinage de la pièce à l'état non traité ;
- Traitement thermique jusqu'à l'obtention de la dureté désirée ;
- Finition par rectification pour que la pièce respecte les cotes notifiées sur le dessin de définition.

Cette longue séquence d'opérations est causée en partie par :

- La non disponibilité (jusqu'à récemment) d'un matériau à outil coupant les matériaux de hautes duretés, résistant à l'usure et tenace ;
- La mauvaise appréciation du besoin en machines-outils plus puissantes, plus rigides et plus précises ;
- La pratique traditionnelle qui consiste à faire l'ébauchage sur une machine et après faire la finition sur une autre machine plus précise.

Ce type d'usinage conventionnel implique donc des montages et des démontages des pièces qui sont inutiles avec le tournage dur. Avec le nouveau mode d'usinage, le brut peut être usiné directement après traitement thermique et beaucoup d'opérations peuvent être supprimées par substitution d'une opération à deux, donnant ainsi un gain considérable aussi bien en temps qu'en coût [POU 04], [BEC 92], [GON 98].

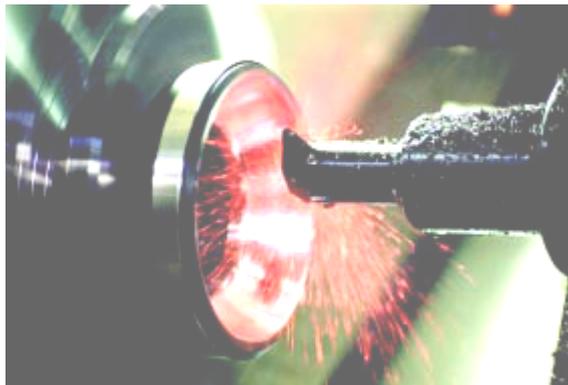


Figure I.22 : Le tournage d'un siège de vanne en acier traité à une dureté de 62 HRc est ici effectué avec une céramique mixte $Al_2O_3 + TiC$ revêtue par procédé PVD d'une couche de nitrure de titane, l'opération ayant lieu à sec et à grande vitesse de coupe [TRA 04].

I.10.2 Comparaison entre le tournage dur et la rectification

La comparaison réalisée par Poulachon [POU 99] entre le tournage dur et la rectification, est faite suivant quatre critères : "productivité, qualité, investissement et environnement".

- **Productivité**

- Le tournage dur autorise des taux d'enlèvement de matière trois à quatre fois supérieurs à ceux de la rectification conventionnelle.
- Il peut s'appliquer de la petite à la grande série (ex: roulementier, automobile);
- Les formes complexes sont réalisables par contournage et les réglages sont rapides;
- Il permet de s'adapter rapidement aux productions de plus en plus variables ;
- L'automatisation est bien plus aisée ;
- Le tournage dur est un procédé très souple, bien adapté aux petites séries répétitives et aux changements de fabrication fréquents, ce qu'exige le travail en flux tendu ou de type juste à temps ;
- La possibilité de tourner des pièces de très grandes dimensions ;
- Le travail aux chocs est possible en utilisant la nuance d'outil adaptée ;
- Pour un volume de matière déterminée, le tournage dur consomme 5 fois moins de puissance que la rectification ;
- Les plaquettes CBN normalement usées peuvent être réaffûtées sur la face de coupe.

- **Qualité et précision**

- Le TD permet de réaliser de multiples opérations sans reprises sur la machine;
- Le TD permet d'obtenir des états de surface (jusqu'à des Ra de 0,15 μm) de même valeur que ceux obtenus en rectification (inférieur à 0,5 μm);
- Le TD permet d'obtenir des qualités IT5-IT6, mais la rectification s'impose pour de meilleures qualités ;
- Les nouvelles machines disponibles sur le marché permettent d'atteindre des circularités de 1 μm des cylindricités de 2 μm sur 50 mm, des tolérances de forme de $\pm 2 \mu\text{m}$, des tolérances en production de 4 μm ;
- En rectification la pièce et la meule sont en rotation ce qui affecte la qualité de la cylindricité ;
- Les stries en hélice, caractéristiques de la topographie des surfaces tournées ne sont pas toujours favorables dans le cas des pièces avec fonction d'étanchéité ;
- L'alésage avec meule tige est très délicat (encrassement et flexion), l'alésage à la barre d'alésage -voir antivibratoire- est meilleur ;
- Les efforts de coupe sont plus faibles qu'en rectification.

- **Investissement**

- Le tournage dur diminue considérablement le montant d'investissements machine et outil (coût d'une rectifieuse : 300Keuro, coût d'un tour CN : 120Keuro) cependant le coût outil/pièce, peut être deux à trois fois plus important (mais suite à son industrialisation croissant rapidement, le prix des plaquettes CBN est en forte baisse) ;
- La rectification nécessite des opérateurs plus spécialisés.

- **Environnement**

Avec les nouvelles normes environnementales, les industries sont contraintes de traiter ou recycler leurs déchets sous peine de fortes amendes. Les entreprises qui génèrent des boues de rectification sont actuellement entre les mains des cimentiers. Effectivement les boues ne sont plus un déchet puisque c'est une matière première rentrant dans la fabrication du ciment, en conséquence, la qualité des boues doit être maîtrisée. L'analyse des taux d'hydrocarbures (huiles

machine, liquide de coupe, lavage des boues) doit rester inférieur à 0,05% sinon celle-ci doivent être traitées différemment soit par pyrolyse, en décharge ou en incinération (surcoût à la tonne 150euro). Ces boues sont constituées de 50% de minuscules copeaux d'acier générés en cours d'opération de rectification qui se mélangent avec 46% de liquide de coupe, 3% de meule et 1% d'huile de graissage.

Malgré des résultats encourageants concernant le traitement des déchets d'autres pistes sont à envisager :

- L'usinage pouvant s'effectuer à sec, le procédé contribue à des économies de lubrifiant. Aujourd'hui l'utilisation des liquides d'arrosage et des huiles représente 16 % des coûts totaux de fabrication, tant en produits utilisés qu'en recyclables de destruction entretien des installations ;
- Il génère des copeaux recyclables, donc revendus ;
- Les pièces rectifiées nécessitent un lavage.

I.10.3 Rentabilité du tournage dur

Les études permettant de comparer les techniques du tournage dur et de la rectification sont rares. À présent, il faut plutôt voir ces deux procédés comme complémentaires. Aux expositions mondiales de la machine-outil, les constructeurs présentent des tours conçus sur la base de rectifieuse ou les outils de tournage et les meules de rectification cohabitent dans le même magasin à outils. Du point de vue comparatif, peuvent être cités les travaux de [MAI 02], [POU 04], qui effectue un bilan exhaustif, chiffré et très détaillé de la fabrication de différentes pièces en moyenne série par ces différents procédés dans le cadre de PME-PMI. La chaîne complète de l'achat de la machine jusqu'au traitement des déchets a été analysée. Dans cette étude sont pris en compte l'investissement principal et l'achat des équipements périphériques, les coûts d'utilisation de la machine, les coûts d'outillages, les temps d'opération, les coûts de l'opération, les coûts de déchets, le coût de la pièce finie. Le tournage c-BN, le tournage c-BN+lubrification, le tournage céramique, la rectification+lubrification et la rectification c-BN sont comparés avec pour référence la rectification conventionnelle. Les résultats font apparaître que le retour sur investissement dans le cas du tournage dur au C-BN se fait en moins de deux ans avec une taille de lot de 200 pièces. Le tournage dur à l'outil céramique affiche un retour sur investissement de l'ordre de trois ans (les conditions de coupe étant plus modestes que celles du c-BN). Quant au retour sur investissement de la rectification c-BN, celui-ci n'est pas validé. En conclusion, l'auteur souligne fortement que la technique du tournage dur est un investissement très rentable pour une entreprise type PME-PMI [POU 04].

I.10.4 Les matériaux usinés en tournage dur

Les matériaux ferreux considérés ici comprennent les aciers rapides, les aciers d'outillages à chaud et à froid, les aciers alliés, les aciers de cémentation, les aciers de nitruration, les fontes blanches, les fontes alliées...(figure I.23) [POU 99].

- **Les aciers de construction pour TTh**

Pendant l'usinage d'aciers durs, même à de faibles vitesses de coupe, les outils en aciers rapides et en carbure cémenté sont peut efficaces à cause de leur faiblesse à supporter des contraintes élevées à des températures élevées. Par conséquent, l'usinage des alliages ferreux traités (45HRC à 70HRC) constitue le principal domaine d'application des outils céramiques et CBN. La prudence invite à dire qu'un des matériaux devient difficile à usiner lorsque sa dureté dépasse 30HRC ou 1020MPa.

- **Les aciers d'outillages à froid (X200Cr12, X160CrMoV12,...)**

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure et à la compression exceptionnelle. 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 découpe, outils d'extrusion,...

- **les aciers d'outillages à chaud (X40CrMoV5-1, X38CrMoV 40NiCrMo16, 35CrNiMo4...)**

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 : matriçage à chaud, moules à couler sous pression, filage à chaud, vis d'extrudeuse, lame de cisaille à chaud. La dureté après revenu peut varier de 30HRC à 55HRC.

- **les aciers à moules (XC48, 40CrMnMo8, 40NiCrMo16...)**

L'acier XC48, livré à l'état normalisé, permet après trempe d'obtenir une dureté de surface appréciable (50HRC). Le 40CrMnMo8 spécialement conçu pour l'élaboration des moules, pour matrice plastique est livré à l'état trempé et revenu a une résistance de 1000 à 1100 MPa. Il est caractérisé par la grande facilité d'usinage que lui donne la désulfuration. Ces aciers à moules sont utilisés pour la réalisation des carcasses de moules pour matières plastiques, semelles d'outillages, outils pour moulage sous pression, plaques porte empreintes,...

- **les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI52100)**

Ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils CBN sont employés avec succès [WER 85], [KON 87]. Lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à faible concentration de CBN est préférable par rapport à un outil à forte concentration de CBN ou à une céramique mixte (Al_2O_3+TiC).

- **Les aciers rapides (HS 6-5-2, HS 2-9-1-8)**

Cette famille d'acier comprend, en majorité, les matériaux utilisés pour la fabrication des lames de découpe et des poinçons. La représentation de cette catégorie de matériaux regroupe les aciers rapides, les aciers de travail à chaud et les aciers de travail à froid.

- **Les aciers de cémentation (16MnCr5, 10 CrNi6, C10, 18CrMo4...)**

L'usinage de finition et la coupe continue d'aciers de cémentation de dureté de 65HRC peuvent être effectués avec des CBN à haute vitesse de coupe. En général le liant céramique TiC est plus performant qu'un métal liant CBN, en raison de sa capacité à garder une plus grande dureté aux températures élevées. L'usinage en coupe interrompue peut également être pratiqué avec satisfaction à l'aide de Pc-BN. Les outils à base de céramique peuvent être utilisés à de plus faibles conditions de coupe, mais les risques de rupture augmentent beaucoup.

- **Les aciers de nitruration (30CrMo4, 30CrAlMo6-12, 40CrAlV6-10)**

Le but de la nitruration est de former une couche très dure sans trempe ultérieure. La nitruration peut être solide, gazeuse, liquide ionique, la dureté des couches peut varier 850HV à 1400HV. Suivant le procédé de nitruration et selon les matériaux traités. L'épaisseur des couches durcies n'excède pas 0,4mm. Pendant ce procédé, l'accroissement de dureté et produit par insertion des atomes de carbone et d'azote dans le réseau cristallin du matériau. L'usinage de ses couches fines est très dur.

- **Les fontes**

Les fontes grises, blanches en et nickel/chrome représentent un marché important de l'utilisation des CBN et des outils céramiques.

Les fontes grises (fontes moulées) sont utilisées en grandes quantités pour des applications générales, leur faible coût en étant la raison principale. Les fontes grises ont une plage de dureté typiquement comprise entre 180 et 320HB. Dans ce cas, les Pc-BN dépassent de loin les performances des outils en carbures et en céramique. Cependant d'autres auteurs ont affirmé que les céramiques à base de nitrure de silicium ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$) présentaient une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage de la fonte grise. Les fontes blanches ou trempées sont beaucoup plus dures, plus fragiles et plus résistantes à l'usure à cause de la présence de carbure de fer (cémentite), au lieu de graphite. Leur dureté varie typiquement de 45 à 65HRC. Des additions de nickel et de Chrome produisent un type de fonte blanche martensitique qui est habituellement connue sous le nom de Ni-Hard. Elle est caractérisée par une dureté de 50 à 65HRC et qui est largement employée comme pièces d'usure. Les fontes Ni-Hard chrome sont dures, fragiles et difficiles à usiner. La haute dureté de ces fontes limite l'utilisation des outils carbure à des conditions de coupe non économiques.

- **Les alliages réfractaires à base de nickel (Inconel 718) ou cobalt (stellite)**

Les alliages à base de nickel ou de cobalt sont très utilisés dans l'industrie aéronautique et sont plus difficiles à usiner que la plus part des aciers par ce qu'ils sont réfractaires. Ils maintiennent donc une grande partie de leur résistance pendant l'usinage mais s'écrouissent également. L'usure en entaille sur la face de dépouille et le principal problème. Les alliages à base de nickel et de cobalt sont habituellement usinés avec des outils en carbure avec des vitesses de coupe inférieures à 30 m/min.

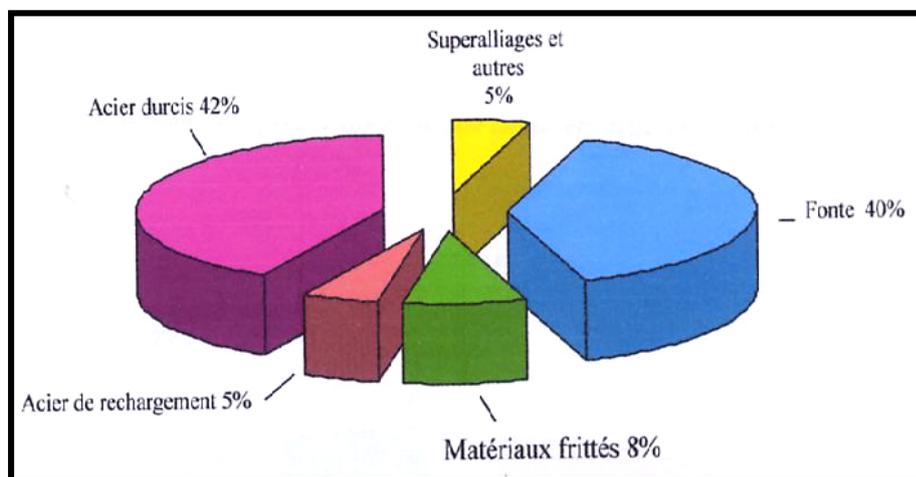


Figure I. 23 : Répartition des matériaux usinés en tournage dur [POU 04].
(D'après Goran Avance Métal Institutie)

I.10.5 Conclusion

Les grandes entreprises ayant compris les gains financiers qu'elles pouvaient en tirer de la technique du tournage dur sont de plus en plus nombreux. On citera à titre d'exemple : Ford (Bordeaux), Mercedes (Gaggenau), Volkswagen (Kassel), Fiat (Turin), BMW (Munich), General motors, etc....

Les pièces usinées sont des baladeurs, des couronnes, des manchons d'accouplement, des pignons, des arbres, des cages de roulement. On notera aussi que, s'il est quelquefois possible d'usiner complètement par tournage dur les pièces traitées, il est vain de vouloir en faire un

substitut à la rectification. En combinant les deux techniques d'usinage, il est possible de réduire considérablement les temps d'usinage et de réalisations des produits.

I.11 Etat de l'art sur l'usinage des pièces dures

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

[O'ZEL 05] et autres présentent dans cette étude, les effets de la géométrie d'arête de coupe, la dureté de la pièce, l'avance et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface et les forces résultantes lors du tournage dur de finition de l'acier d'AISI H13. Des plaquettes en CBN avec deux préparations distinctes d'arête ont été employées. Un plan d'expérience de deux niveaux avec quatre facteurs (dureté, géométrie d'arête, avance et vitesse de coupe) avec une analyse statistique de la variance (ANOVA) a été réalisé. Les résultats de cette étude montrent que les effets de la dureté de la pièce, la géométrie d'arête de coupe, l'avance et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface sont statistiquement significatifs. Les effets des interactions des facteurs (la géométrie d'arête et de la dureté de la pièce - la géométrie d'arête et de l'avance - la vitesse de coupe et de l'avance) ont également des effets importants. Particulièrement la géométrie d'arête rectifiée et la dureté inférieure de surface de la pièce qui ont eu comme conséquence une meilleure rugosité de surface. La géométrie d'arête, la dureté de la pièce et la vitesse de coupe de coupe s'avèrent affecter par les composantes de l'effort de coupe. La dureté inférieure de la surface de la pièce et l'arête rectifiée ont eu comme conséquence des efforts tangentiels et radiaux inférieures (figures I.24 et I.25).

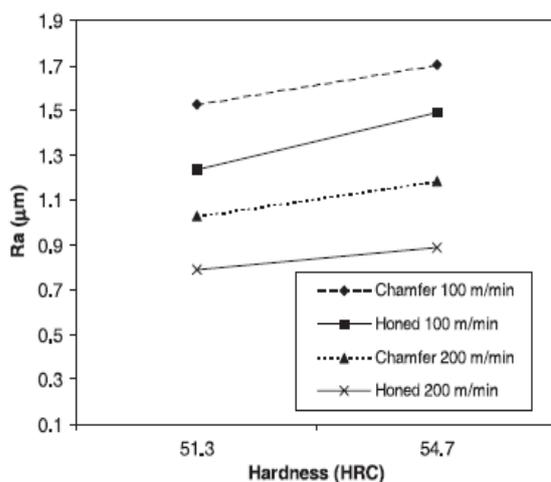


Figure I.24 : Effet de la géométrie de l'arête de coupe et la dureté de la surface sur la rugosité ($f=0.2\text{mm/tr}$; $L=203.2\text{mm}$) [O'ZEL 05]

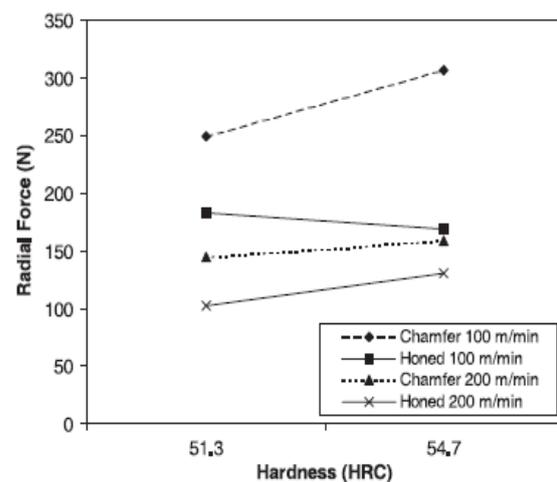


Figure I.25 : Effet de la géométrie de l'arête de coupe et la dureté de la surface sur l'effort radial ($f=0.2\text{mm/tr}$; $L=203.2\text{mm}$) [O'ZEL 05]

[THI 99] et autres ont conduit une recherche expérimentale pour déterminer les effets de la géométrie de l'arête de coupe et la dureté de la pièce sur la rugosité de surface et les efforts de coupe lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 avec des plaquettes en CBN. Cette étude prouve que l'effet de la géométrie d'arête sur la rugosité de surface et les efforts de coupe est statistiquement significatif. Particulièrement, les larges arêtes rectifiées donnent une rugosité de surface moyenne (R_a) plus élevée que les petites arêtes rectifiées. L'effet de l'interaction de deux facteurs (la géométrie de l'arête et de la dureté de la pièce) sur la rugosité de surface s'avère également important. En plus, les résultats montrent que les efforts de coupe des arêtes larges sont plus élevés dans les directions axiales, radiales, et tangentielles que de petites arêtes.

Également, l'effet de la dureté de la pièce sur les composantes axiales et radiales des efforts est significatif, en particulier pour les larges arêtes (figures I.26 et I.27).

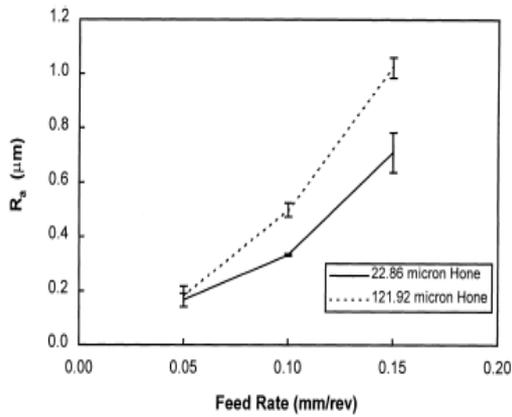


Figure I.26 : Effet d'avance et la géométrie de l'arête de coupe sur Ra : 47HRC [THI 99]

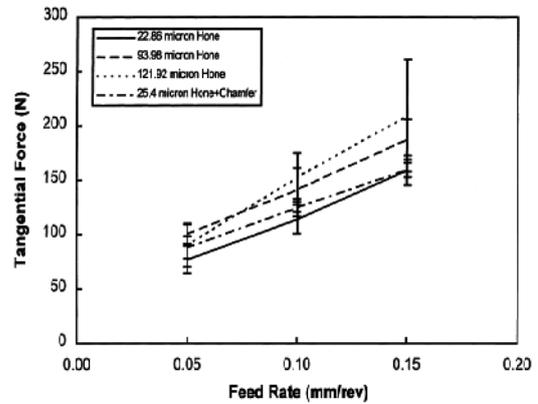
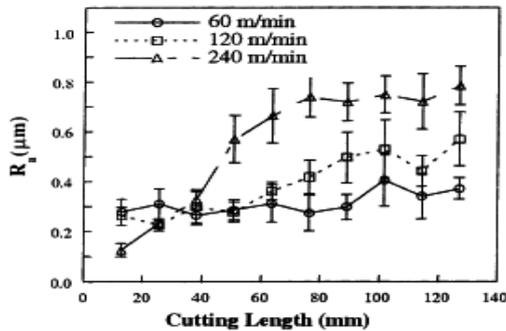
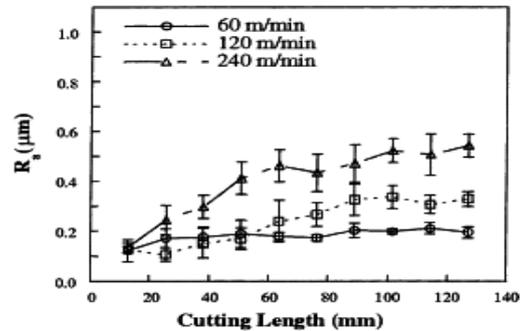


Figure I.27 : Effet d'avance et la géométrie de l'arête de coupe sur l'effort tangentiel : 41HRC [THI 99]

[CHO 03] et autres ont étudié expérimentalement l'influence du contenu de CBN sur la qualité de surface et l'usure de CBN l'outil lors du tournage dur de l'acier AISI 52100. L'étude conclue que les outils contenant un pourcentage bas de CBN produisent une meilleure rugosité de surface et la profondeur de passe a l'effet mineur sur le taux d'usure d'outil (figures I.28 et I.29).

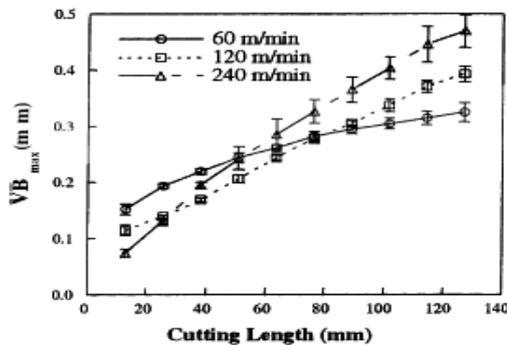


(a) BZN6000

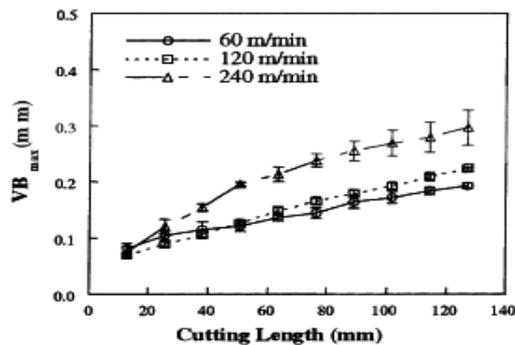


(b) BZN8100

Figure I.28 : L'usure VB en fonction de la longueur de coupe à différentes vitesses de coupe a) BZN 6000 b) BZN 8100 [CHO 03].



(a) BZN6000



(b) BZN8100

Figure I.29 : L'usure VB en fonction de la longueur de coupe à différentes vitesses de coupe a) BZN 6000 b) BZN 8100 [CHO 03].

[PAW 07] et autres ont fait une investigation sur les efforts de coupe et l'endommagement de surface en tournage à grande vitesse de l'Inconel 718. Sachant les conditions de fonctionnement rigoureuses auxquelles des superalliages sont soumis dans les industries d'automobiles, d'espace et des turbines à gaz, leur efficacité d'usinage et la génération des surfaces usinées avec l'intégrité élevée prend beaucoup d'importance. Par conséquent, cette étude présente une recherche expérimentale sur l'effet des différents paramètres de coupe sur les efforts de coupe et l'intégrité des surfaces usinées. Une analyse microstructurale de l'endommagement des surfaces usinées a été faite aussi. L'usinage a été réalisé par un outil CBN aux conditions de coupe suivantes : $V_c = 125$ à 475 m/min, $f = 0,05$ à $0,15$ mm/tr, $a_p = 0,50$ à $1,0$ mm et pour les géométries suivantes : chanfrein de 30° et 20° et un chanfrein rectifié de 30° . Les résultats trouvés dans cette étude prouvent que les composantes de l'effort radial et axial sont presque égales et l'effort de coupe tangentiel égale deux à trois fois l'effort axial et radial. L'arête de coupe chanfreinée et rectifiée a une influence significative sur la réduction des efforts de coupe. L'étude a montré aussi que les échantillons montrant des grands efforts de coupe ont produit un mauvais état de surface. Les résultats trouvés montrent aussi que la vitesse de coupe est un facteur très influent sur l'usure et la durée de vie des outils CBN lors de l'usinage des alliages à base de nickel, c'est pour cela qu'il est important de l'optimiser (figures I.30, I.31 et I.32).

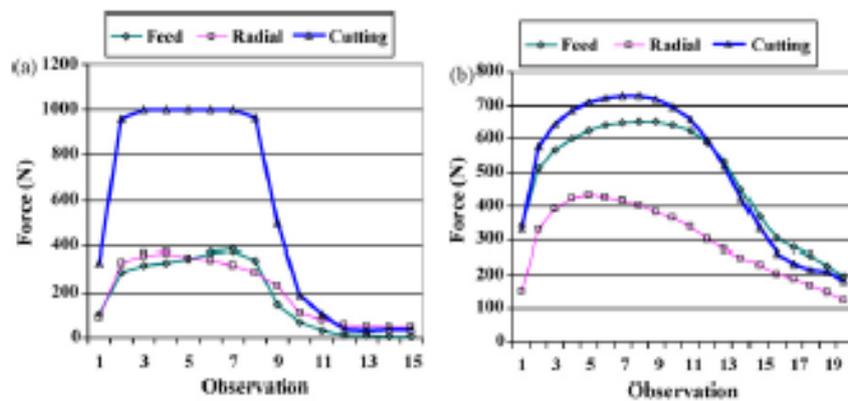


Figure I.30 : Composantes de l'effort de coupe en fonction du temps en usinage à sec de l'Inconel 718 à : $V_c=125$ m/min avec outil PCBN : (a) chanfrein de 20° , $f=0.15$ mm/tr et $a_p=1.0$ mm, (b) chanfrein de 30° , $f=0.1$ mm/tr et $a_p=1.00$ mm [PAW 07].

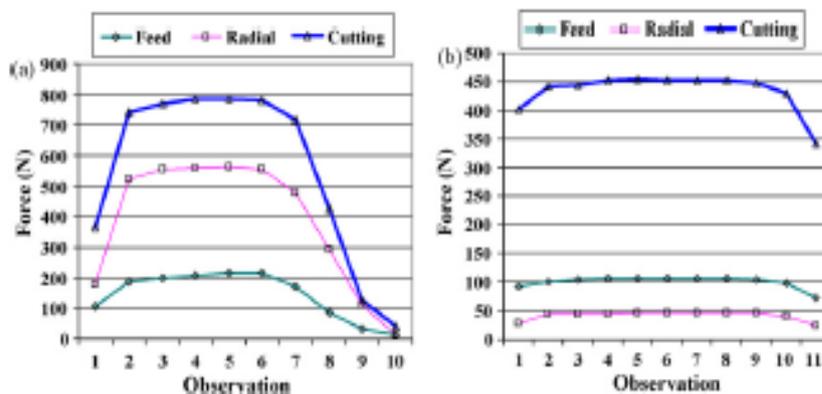


Figure I.31 : Composantes de l'effort de coupe en fonction du temps en usinage à sec de l'Inconel 718 à : $V_c=475$ m/min avec outil PCBN : (a) chanfrein de 20° , $f=0.15$ mm/tr et $a_p=0.50$ mm ;(b) chanfrein de 30° , $f=0.10$ mm/tr et $a_p=0.50$ mm [PAW 07].

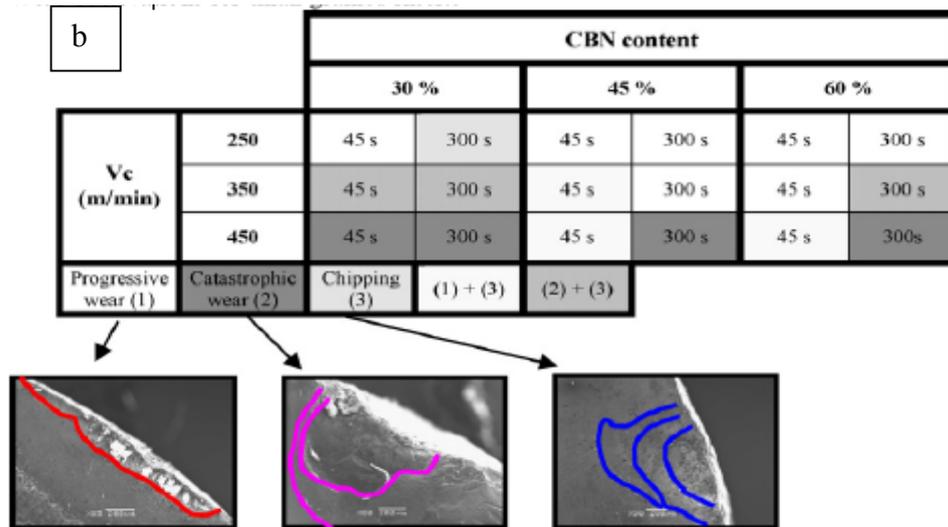


Figure I.33 : a) Effet du liant et du contenu du CBN sur la durée de vie de l'outil (le critère de l'usure $VB=0.3mm$)

b) Observation des petits grains de la paquette en CBN [COS 07].

[NEO 03] et autres ont étudié la performance d'un outil en CBN lors de l'usinage de l'acier inoxydable (X38Cr13), cet acier est de la famille martensitique, il est largement utilisé pour la fabrication des matrices et des moules de précision. Les performances en termes de rugosité de surface et d'usure de l'outil en PCBN et en CBN conventionnel dans différentes conditions d'usinage étaient étudiées et leurs résultats étaient comparés. Sur la base des résultats expérimentaux, le PCBN s'est avéré plus performant en termes de résistance à l'usure comparé à l'outil en CBN conventionnel. Il peut également réaliser un état de surface miroir dont la rugosité Ra est inférieure à 30nm, et par conséquent il semble être un outil prometteur pour la coupe des matériaux réservés pour la fabrication des matrices et des moules. Les auteurs ont conclu que, pour atteindre une bonne qualité de surface sur STAVAX (X38Cr13), la vitesse de coupe élevée est exigée pour les outils en CBN et en PCBN, ce dernier peut réaliser un meilleur état de surface. Ils ont constaté aussi qu'à la gamme élevée de la vitesse de coupe, l'outil en PCBN peut mieux résister à l'usure (figure I.34).

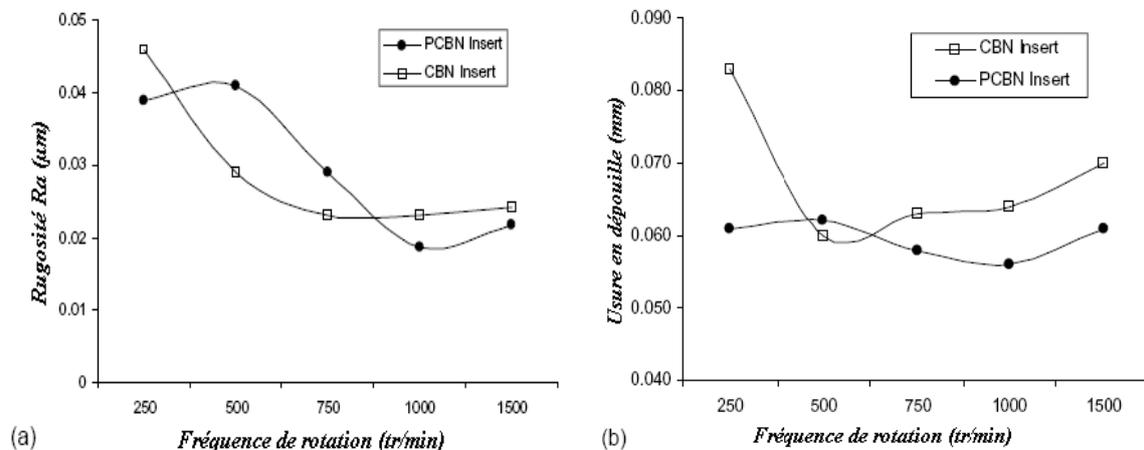


Figure I.34 : Evolution de la rugosité et de l'usure en dépuille en fonction de La fréquence de rotation [NEO 03].

[KUM 06] et autres 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.35).

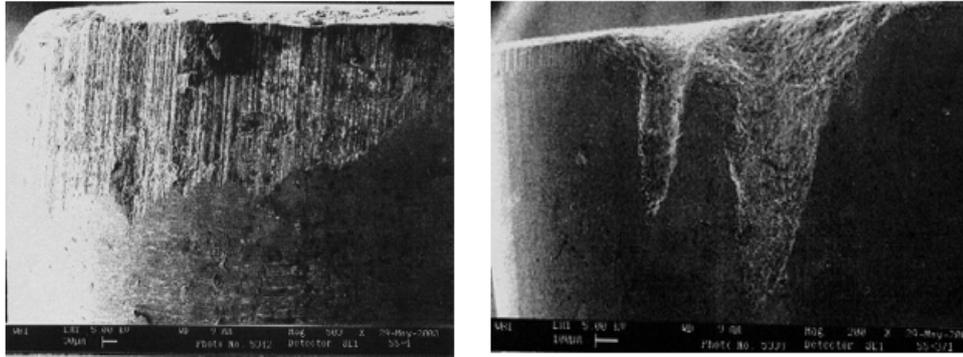


Figure I.35 : L'usure en dépouille d'une céramique mixte à base d'alumine lors l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC [KUM 06].

[CHE 00] a étudié l'effort de coupe et l'état de la surface pendant l'usinage de l'acier durci entre (45-55 HRC) à l'aide d'un outil CBN. Les résultats ont prouvé que l'effort radial était le plus grand parmi les trois composantes de l'effort de coupe (figure I.36).

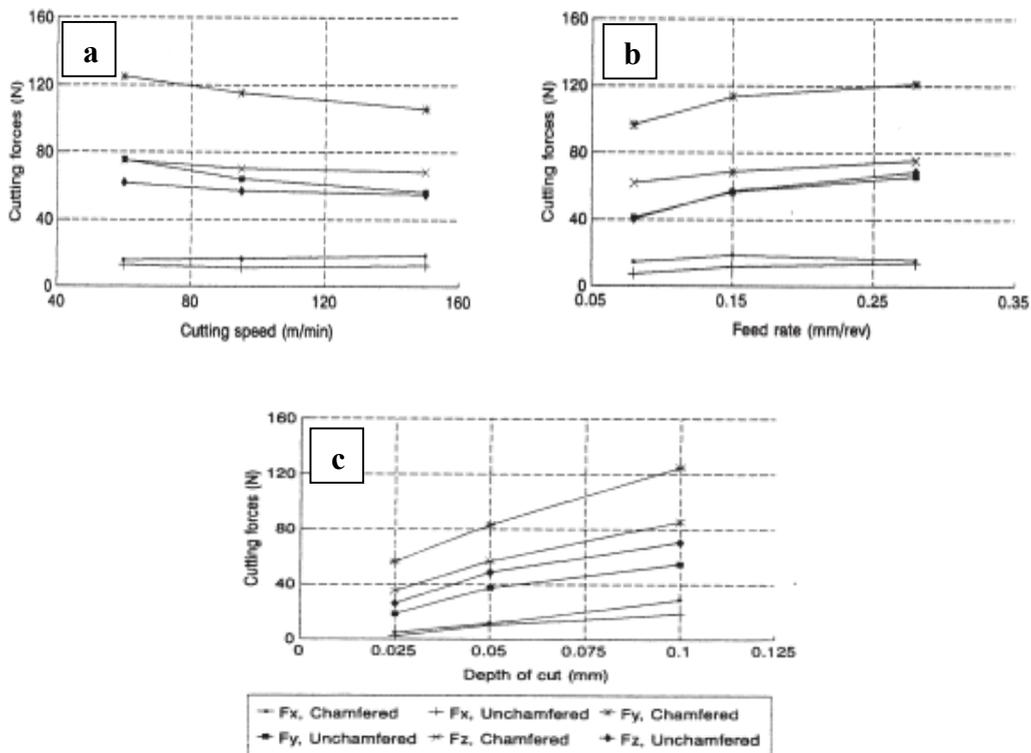


Figure I.36 : Efforts de coupe en fonction de régime de coupe et de l'arête chanfreinée en utilisant CBN 1. (a) $f = 0.15$ mm/tr, $a_p = 0.05$ mm; (b) $v = 95$ m/min, $a_p = 0.05$ mm ; (c) $v = 95$ m/min, $f = 0.15$ mm/tr [CHEN 00].

[NAK 88] et autres ont indiqué que les forces de coupe dans l'usinage des matériaux durs ne sont pas nécessairement hautes comparées à ceux des matériaux doux. Un angle élevé de cisaillement et la formation des copeaux en dent de scie dus à la ductilité faible réduisent les forces malgré la haute résistance du matériau dur. Ils mentionnent que pour des essais de coupe d'aciers de 0.25% en carbone à des duretés variable jusqu'à 500HV, quand l'angle d'attaque est 0° , les forces de coupe sont presque indépendantes de la dureté. D'autre part, quand l'angle d'attaque est -20° , l'augmentation de la dureté de la pièce diminue les efforts de coupe et de poussée. Dans l'usinage des aciers (760HV), l'angle de coupe négatif augmente de manière significative la force de poussés, tandis que l'augmentation de la force de coupe est petite.

[WAR 00] et autres ont présenté dans ce travail les qualités et l'intégrités de la surface produite, les effets des paramètres de coupe et de l'usure de l'outil sur la morphologie de copeau pendant le tournage à grande vitesse de l'acier pour travail à froid AISI D2 durci à (60–62 HRC). L'analyse métallographique de la surface produite illustre la région endommagée de surface qui contient des défauts géométriques et change dans la structure métallurgique de sub-surface. Les types de surfaces endommagées dépendent des paramètres de coupe, de la géométrie d'outil et de la croissance des zones d'usure (figure I.37).

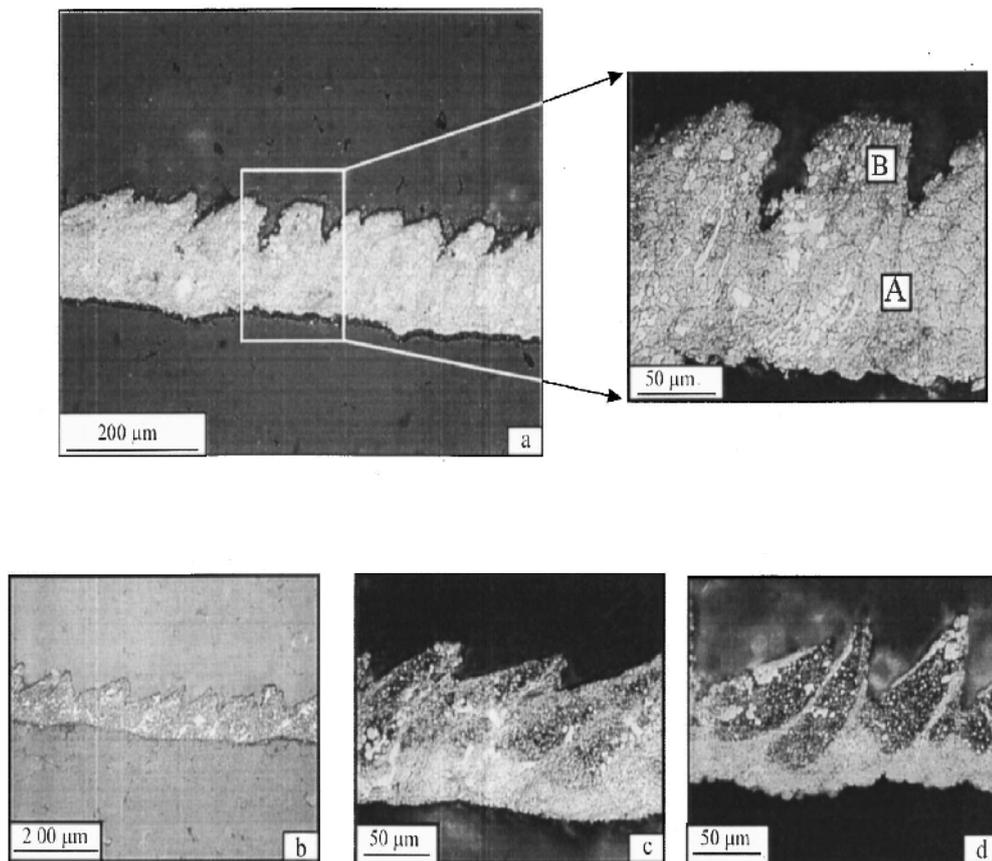


Figure I. 37 : Micrographes de la section moyenne longitudinale des copeaux produits par un outil usé ($V_c= 350$ min, $f= 0.4$ mm / tr, $d= 0.4$ mm, $r= 1.2$ mm, arête chanfreinée $20^\circ / 0.1$ mm) [WAR 00].

[SAD 06] et autres ont examiné le rapport entre la vibration de la pièce et l'usure de l'outil pendant le fraisage de finition de l'acier d'outil pour travail à froid d'AISI D3 durci à 35HRC. Ils ont montré que l'amplitude de vibration n'a pas une augmentation considérable jusqu'à une valeur d'usure VB de $160\mu\text{m}$, au-dessus l'amplitude de cette valeur de vibration a augmenté de manière significative (figure I.38).

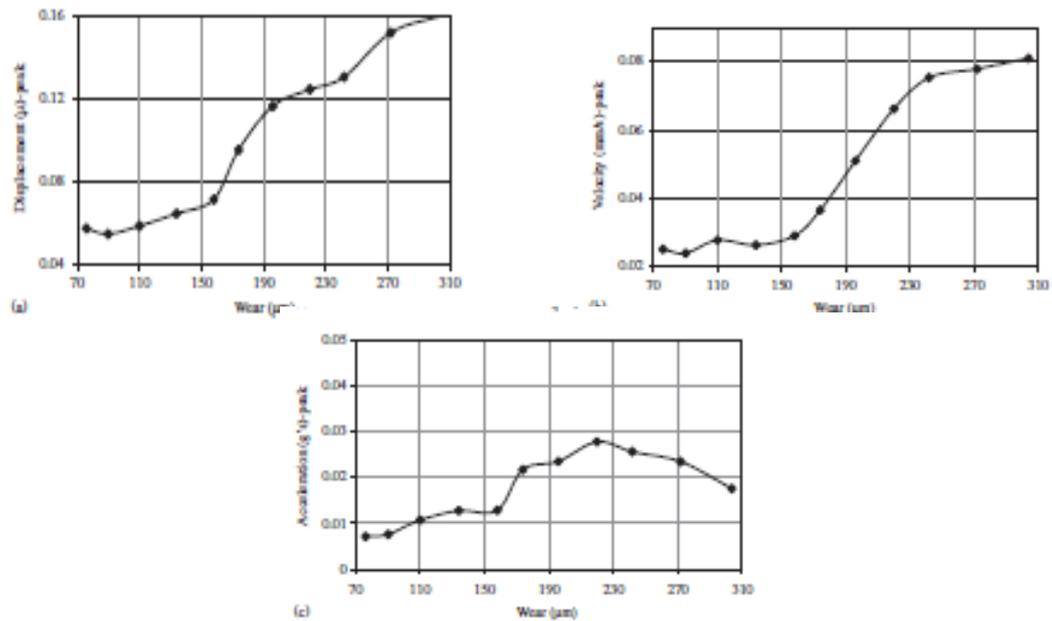


Figure I.38 : Relation entre l'amplitude de vibration et l'usure de l'outil (a) déplacement, (b) vitesse et (c) accélération [SAD 06].

[POU 03] et autres ont souligné que la microstructure des aciers durcis possède une influence critique sur les mécanismes d'usure de l'outil CBN, en particulier la présence des carbures. En raison de la variation de la dureté des particules de carbure, l'usure des plaquettes de PCBN peut avoir lieu à différents taux.

[HUA 04] et autres ont proposé un modèle analytique, calibré avec les données expérimentales, qui permet la corrélation du taux d'usure en dépouille de l'outil CBN avec les propriétés de matériau outil/pièce et les paramètres de coupe. Le modèle proposé concerne le tournage de finition tridimensionnel de l'acier à roulement 52100 usiné par une plaquette CBN. Les principales mécanismes d'usure observées et de la plaquette suivant les conditions de coupe est l'adhésion. Néanmoins, la diffusion chimique peut gagner des périodes étendues par dominance de temps d'usinage sous des conditions de coupe agressives. Potentiellement, le travail d'auteurs pourrait aider la conception de la géométrie d'outil de CBN et optimiser des paramètres de coupe dans le tournage dur de finition.

[ESL 04] et autres ont 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, céramique mixte avec l' Al_2O_3 +TiCN et des outils en CBN. Les résultats ont indiqué que l'outil CBN prouve 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.39).

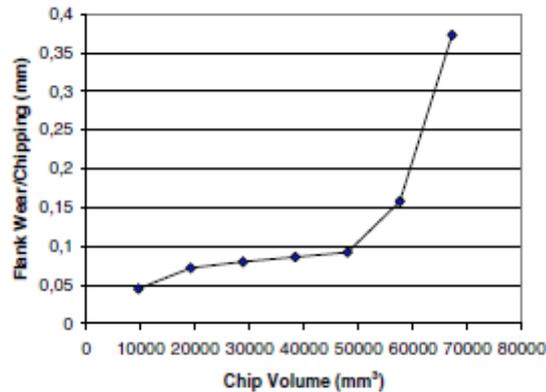


Figure I.39 : Progression de l'usure en dépouille avec l'augmentation du volume de copeau enlevé avec un outil en CBN [ESL 04].

[NOO 04] et autres ont exploré les performances d'un outil en carbure de tungstène multicouche lors de l'usinage de l'acier AISI 1045, utilisant la méthodologie de surface de réponse (MRS). Les résultats expérimentaux ont indiqué que l'avance est le facteur le plus significatif qui influe sur la rugosité de la surface et la force tangentielle. Cependant, il y a d'autres facteurs qui fournissent les contributions secondaires aux indicateurs de performance (tableaux I.4 et I.5).

Source	Sum of squares	d.f	Mean square	F	Prob. > F
Model	9.71	9	1.08	35.59	0.0002 significant
A	0.080	1	0.080	2.62	0.1564
B	8.77	1	8.77	289.44	<-0.0001
C	0.038	1	0.038	1.24	0.3075
A²	0.050	1	0.050	1.66	0.2449
B²	0.018	1	0.018	0.60	0.4678
C²	0.16	1	0.16	5.43	0.0586
AB	0.065	1	0.065	2.16	0.1922
AC	0.0028	1	0.0028	0.091	0.7729
BC	0.24	1	0.24	7.86	0.0310
Residual	0.18	6	0.030		
Lack-of-fit	0.18	5	0.036	181.67	0.0563 not significant
Pure error	0.0002	1	0.0002		
Cor. total	9.89	15			
S.D.	0.17	R²	0.9816		
Mean	2.20	Adj. R²	0.9540		
CV	7.91	Pred. R²	0.7502		
PRESS	2.47	Adeq. precision	19.16		

Tableau I.4 : Table d'ANOVA pour le modèle quadratique de la surface de réponse (réponse : rugosité de la surface, Ra) [NOO 04].

Source	Sum of squares	d.f	Mean square	F	Prob. > F
Model	7.86E+04	5	1.57E+04	168.78	<-0.0001 significant
A	482.40	1	482.40	5.18	0.0462
B	7.62E+04	1	7.62E+04	817.91	<-0.0001
C	104.33	1	104.33	1.12	0.3149
C²	1668.17	1	1668.17	17.90	0.0017
BC	485.13	1	485.13	5.21	0.0457
Residual	931.90	10	93.19		
Lack-of-fit	905.84	9	100.65	3.86	0.3769 not significant
Pure error	26.06	1	26.06		
Cor. total	7.96E+04	15			
S.D.	9.65	R²	0.9883		
Mean	452.18	Adj. R²	0.9824		
CV	2.13	Pred. R²	0.9714		
PRESS	2279.00	Adeq. precision	35.91		

Tableau I.5 : Table d'ANOVA pour le modèle quadratique (réponse : force tangentielle, Fc) [NOO 04].

[LIM 05] et autres ont étudié l'usinabilité des aciers durcis à différents niveaux de dureté et à l'aide de divers matériaux d'outil de coupe. Leur étude a été concentrée sur l'usinage d'AISI 4340 durci (acier faiblement allié de haute résistance) et d'AISI D2 (acier d'outil travail à froid). Les résultats ont indiqué que lors du tournage de l'acier AISI 4340, la rugosité de surface des

pièces usinées a été amélioré avec l'augmentation de la vitesse de coupe par contre avec l'augmentation de l'avance la rugosité se détériore, tandis que la profondeur de passe présente un effet moins significatif sur l'amélioration de rugosité de surface. L'usinage de l'acier AISI D2 avec les plaquettes mixte à base d'alumine a permis un état de la surface comparable à celui obtenu en rectification cylindrique (figure I.40).

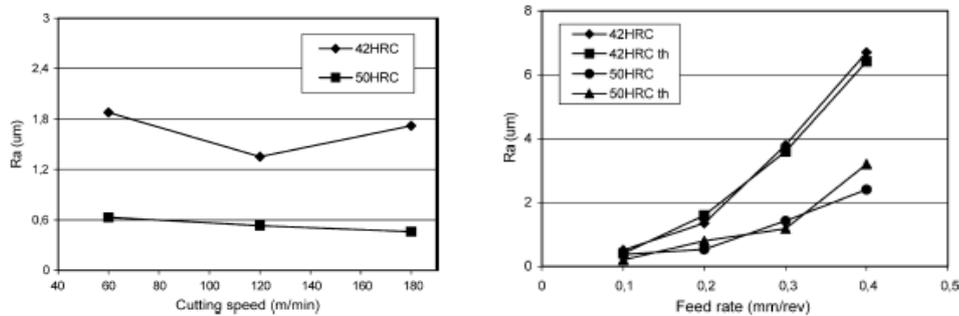


Figure I.40 : Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface pour $f = 0.2 \text{ mm/tr}$, $V_c = 120 \text{ m/min}$ et $a_p = 1 \text{ mm}$ (acier AISI 4340) [LIM 05].

[PAU 06] et autres ont étudié l'usinabilité de l'acier D2 pour le travail à froid avec les outils en céramique en utilisant des techniques statistiques lors du tournage dur. Les résultats indiquent qu'avec les paramètres de coupe appropriés, le choix est possible d'obtenir une rugosité de la surface ($R_a < 0.8 \mu\text{m}$) qui permet d'éliminer les opérations de rectification cylindrique.

[LAH 07] et autres ont conclu que les différentes théories existent concernant le mécanisme d'usure de l'outil ; cependant, il y a un accord général parmi les chercheurs c'est que l'usure de l'outil PCBN est complexe et aucun mécanisme simple fournit une explication complète. Les auteurs ont souligné également que l'usure en dépouille affecte l'état de surface, l'intégrité et la précision dimensionnelle de la pièce usinée, alors que l'usure en cratère influe sur la fiabilité de processus. Néanmoins, le mécanisme d'abrasion, due aux particules de carbure dans la pièce et des grains de CBN, est le plus prépondérant pour l'outil de coupe en CBN.

[YAL 09] et autres ont souligné que l'outil CBN offre une bonne résistance à l'usure pendant le tournage dur de l'acier 100Cr6 trempé à (60HRC), malgré l'agressivité de ce matériau dur. La qualité de surface obtenue avec l'outil CBN est significativement améliorée comparée à l'opération de rectification en dépit d'une augmentation de l'avance à un facteur de 2.5 (figure I.41).

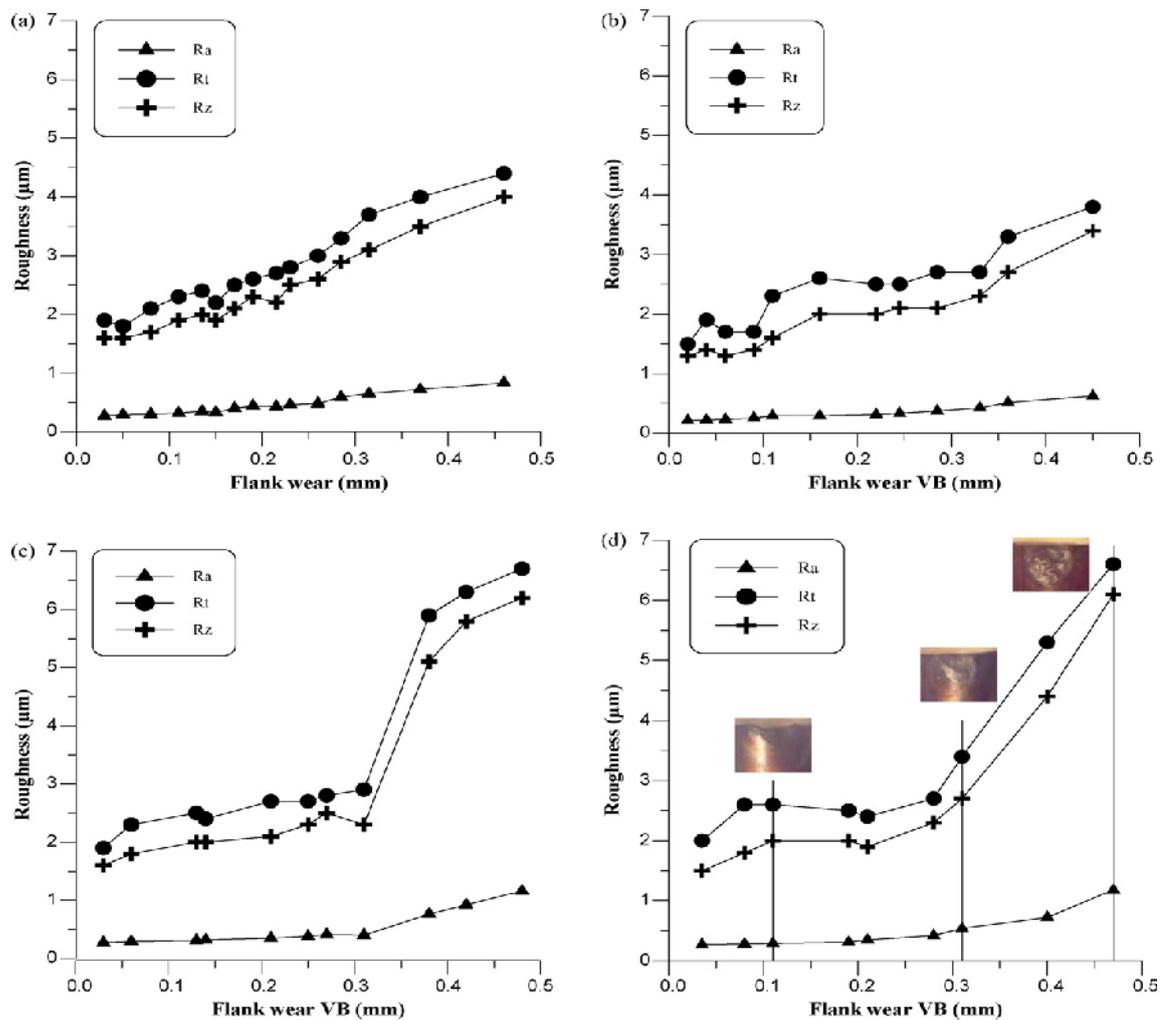


Figure I.41 : Effet de la vitesse sur l'évolution de rugosité en fonction de l'usure VB pour $f = 0.08$ mm/tr; $a_p = 0.5$ mm: (a) $V_c = 90$ m/min, (b) $V_c = 120$ m/min, (c) $f = 0.08$; $V_c = 180$ m/min and (d) $V_c = 220$ m/min [YAL 09].

[BOS 90] s'est intéressé à l'usure des outils en fonction de l'influence du pourcentage du CBN dans la plaquette. La proportion du CBN contenu dans la plaquette influe sur la conductivité thermique. Plus le pourcentage est important, plus la conductivité est grande. Par conséquent, il est préférable de prendre, en finition, des plaquettes ayant des teneurs en CBN plus faibles pour conduire à un adoucissement thermique plus important de la matière. La chaleur dégagée en finition est plus faible parce que les sections du copeau sont plus faibles.

[TAK 83] et autres ont réalisé des essais sur un acier à roulement 100Cr6 durci à 62 HRC avec des outils identiques mais à un pourcentage différent en CBN. Ils ont constaté que l'usure en dépouille et l'usure en cratère ont été réduites au minimum avec un pourcentage de 55% de CBN. [BOG 96] a suggéré que cela est dû à la réaction chimique des CBN pendant la coupe, le pourcentage en CBN devait être réduit, ce qui a mené au développement du BZN8100 par General Electric. Tandis que, [BAR 01] et autres étaient d'accord avec [BOG 96], que cette usure d'outil en CBN est dominé par un mécanisme chimique, [ZIM 97], [KLI 92] et autres ont proposé que l'agglomérant est réellement plus résistant que les grains des CBN.

[DAV 96] et autres ont effectué des expériences semblables pour comparer les taux d'usure de l'outil pour trois aciers de la même composition chimique mais de différentes microstructures. Ils ont notamment prouvé que le taux d'usure de l'outil diminue avec la décroissance de la taille des grains.

[LUO 99] et autres ont étudié le comportement à l'usure lors du tournage de l'acier allié durci 35NCD6 avec une dureté de (35-60 HRC), ils ont utilisé des outils en CBN (liants Tic et Al_2O_3) et des outils en céramique (Al_2O_3 et Tic). Ils ont trouvé que le principal mécanisme d'usure pour les outils CBN a été montré comme une abrasion du liant du matériau par les particules dures en carbure de la pièce, alors que pour les outils en céramiques, l'usure est dominée par l'adhésion et l'abrasion.

[KÖN 90] et autres ont étudié la durée de vie de l'outil pendant le perçage de différents aciers (16MnCr5E, 31CrMo12, X100CrMoV5-1, X210CrW12, S6-5-2) afin d'évaluer l'usinabilité de ces matériaux avec une dureté au-dessus de 60HRC. Pour la structure uniforme (16MnCr5E), Ils ont constaté pour chaque matériau, qu'il y a une vitesse de coupe optimale. Ils ont indiqué que l'effort d'avance augmente avec des carbures bruts (S6-5-2), alors que la force de coupe augmente avec des grains fins. Les PCBN ne peuvent pas être employés pour des raisons économiques pour les matériaux qui ont une teneur de ferrite élevée et une dureté au-dessous de 50HRC.

[MAT 96] et autres ont trouvé qu'il y a une adhésion du fer sur la face de l'outil en tournage de l'acier dur en utilisant des outils avec un taux élevé de CBN. Ils ont proposé que l'adhérence de cette couche contribue à la diminution de la durée de vie de l'outil. En parallèle, ils ont également découvert que l'adhérence du MnS sur la face de l'outil lors de l'usinage de l'acier à roulement en carbure a créé une couche lubrifiante qui a réduit le frottement outil /copeau et a augmenté la durée de vie de l'outil.

[LIQ 07] et autres ont effectué des simulations numériques de l'usinage orthogonal à grande vitesse pour étudier le procédé du tournage dur en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance, de la géométrie de l'outil, et de la dureté de la pièce. Dans les simulations, les propriétés représentative de l'acier d'outil pour travail à chaud AISI H13, de l'acier à roulement AISI 52100, acier pour travail à froid AISI D2, et acier faiblement allié AISI 4340 ont été utilisées pour la pièce. Le nitrure de bore cubique (CBN) ou les plaquettes (PCBN) polycristallines sont largement répandus comme un matériau d'outil de coupe pour l'usinage à grande vitesse des aciers d'outil durcis cela est dû à la dureté élevée, la résistance élevée d'usure abrasive, et à la stabilité chimique à une température élevée. Des efforts de coupe et des efforts axiaux ont été déterminés dans les simulations numériques. Parmi les paramètres du processus de coupe, la géométrie et la dureté de la pièce, l'avance a un effet plus significatif sur l'effort de coupe et axial. Avec les mêmes conditions de coupe, le tournage de l'acier AISI 4340 obtient un effort de coupe plus élevé alors que le tournage AISI 52100 a un effort axial plus élevé et le tournage AISI D2 obtient un effort de coupe et effort axial plus bas. L'effort axial semble être la plus grande composante de force que l'effort de coupe dans le tournage dur. L'effort de coupe et l'effort axial augmente avec l'augmentation de l'avance, du rayon d'arête de l'outil, d'angle d'attaque négatif, et de la dureté de la pièce. Des résultats des simulations sont comparés aux résultats expérimentaux rapportés dans la littérature (figures I.41, I.42, I.43 et I.44).

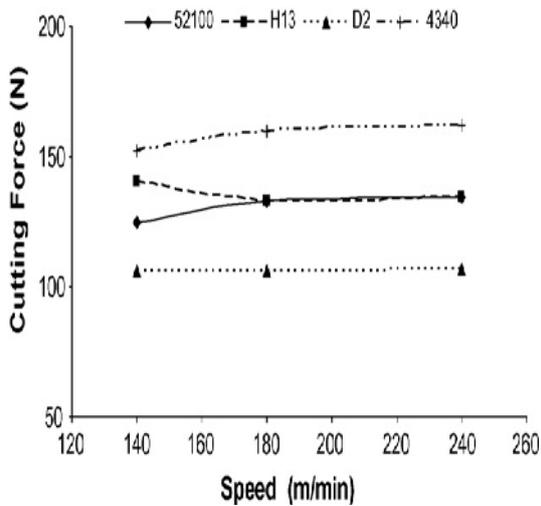


Figure I.41 : Effet de la Vc et le matériau de la pièce sur l'effort de coupe [LiQ 07].

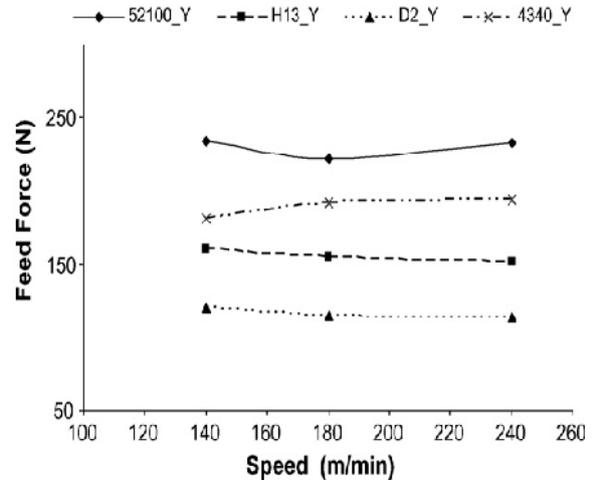


Figure I.42 : Effet de la Vc et le matériau de la pièce sur l'effort axial [LiQ 07].

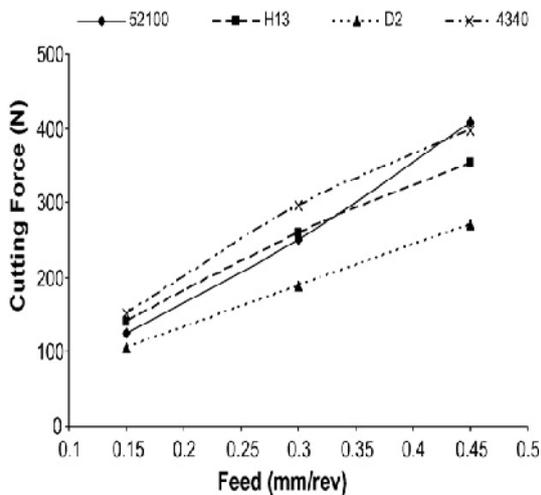


Figure I.43 : Effet de l'avance et le matériau de la pièce sur l'effort de coupe [LiQ 07].

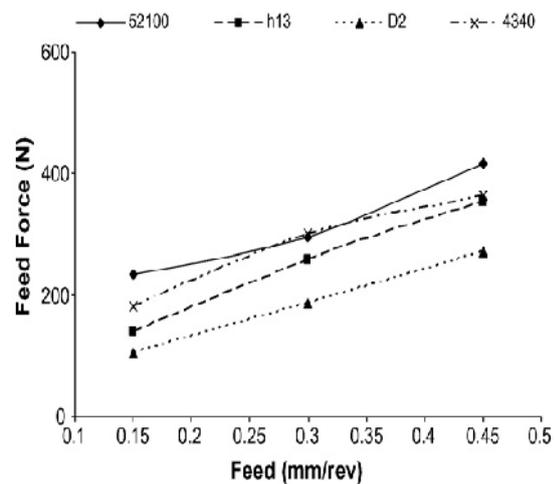


Figure I.44 : Effet de l'avance et le matériau de la pièce sur l'effort axial [LiQ 07].

[DUR 09] et autres ont étudié la modélisation de l'usure de l'outil et la rugosité de la 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 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) et. Le meilleur modèle quadratique non linéaire a adapté les points de repères expérimentaux. La fonction de l'approche désirable a été employée pour l'optimisation multiple des facteurs de réponse. Les expériences de confirmation effectuées pour vérifier la validité des modèles développés ont prévu des facteurs de réponse dans les limites d'erreur de 5 %. On observe que l'avance, la profondeur de passe, et la dureté de la pièce ont un impact statistiquement significatif sur l'usure en dépouille, mais l'avance et la dureté de la pièce sont les facteurs significatifs affectant la rugosité de surface. 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 et également par une usure d'adhésion (figures I.45, I.46, I.47 et I.48).

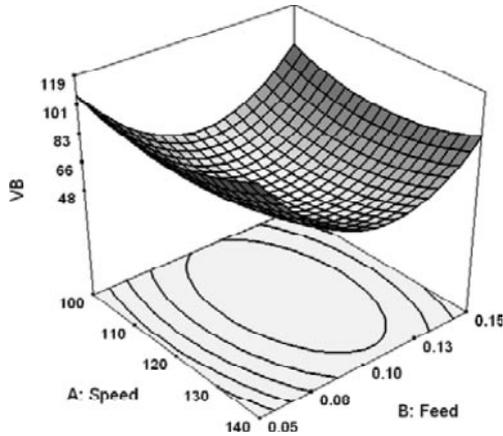


Figure I.45 : Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur l'usure VB (profondeur de passe $\frac{1}{4}$ 0.14mm, dureté de la pièce $\frac{1}{4}$ 47 HRC [DUR 09]).

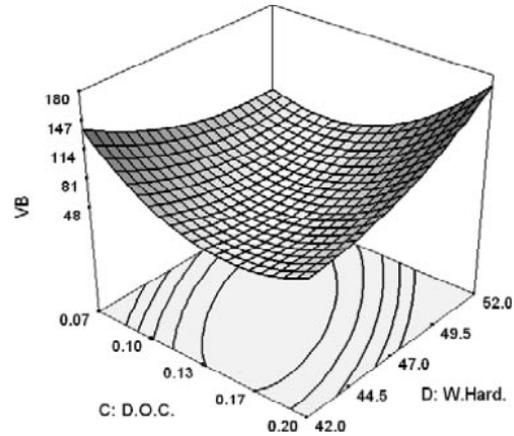


Figure I.46 : Effet de la profondeur de passe et de la dureté de la pièce sur l'usure VB ($V=200\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/tr}$) [DUR 09].

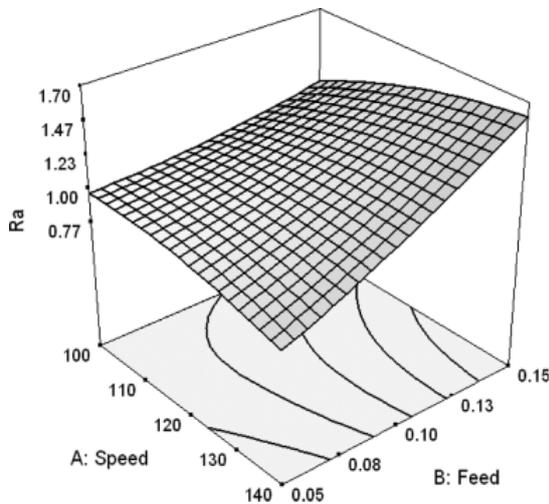


Figure I.47 : Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la rugosité Ra (profondeur de passe $\frac{1}{4}$ 0.14mm, dureté de la pièce $\frac{1}{4}$ 47 HRC [DUR 09]).

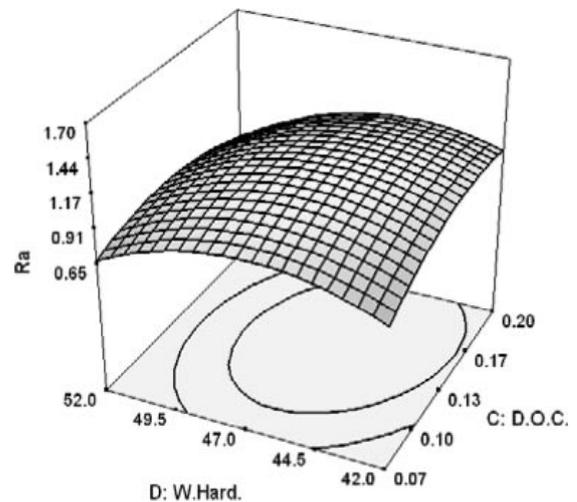


Figure I.48 : Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la rugosité Ra ($V=200\text{mm}$, $f=0.1\text{mm/tr}$) [DUR 09].

[FAR 08] et autres ont exécuté l'UGV pour le tournage dur d'un acier durci à 50 HRC (AISI 4140/42CrMo4) avec un outil de PCBN en employant les vitesses de coupe élevées (300 et 400 m/min). Les résultats prouvent que l'UGV pour le tournage dur peut être acceptable pour l'application industrielle en fournissant une très bonne rugosité de surface et en gardant une significative durée de vie de l'outil. Une corrélation qualitative est également présentée entre l'usure en cratère et la distribution de la température à l'interface outil-copeau, déterminé par un modèle thermomécanique. L'usure en dépouille, l'usure en cratère et la rugosité de surface sont étudiées afin de choisir un critère approprié de l'usure. Les investigations par MEB/DEX et la légère interférométrie blanche accentuent l'importance de l'usure en cratère et nous aident à

mieux comprendre le rôle des phénomènes de diffusion/chimique dans les mécanismes d'usure (figure I.47).

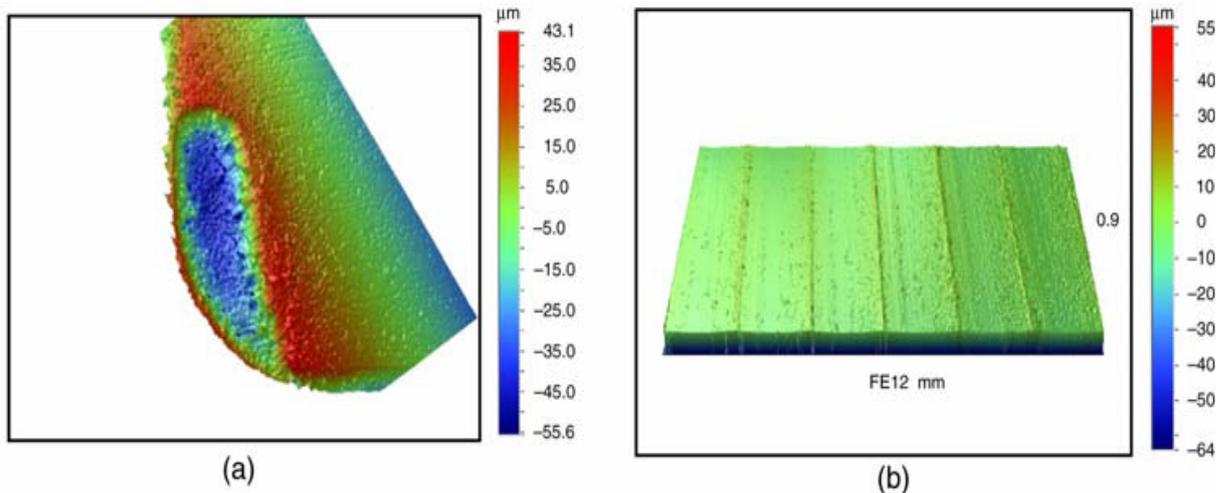
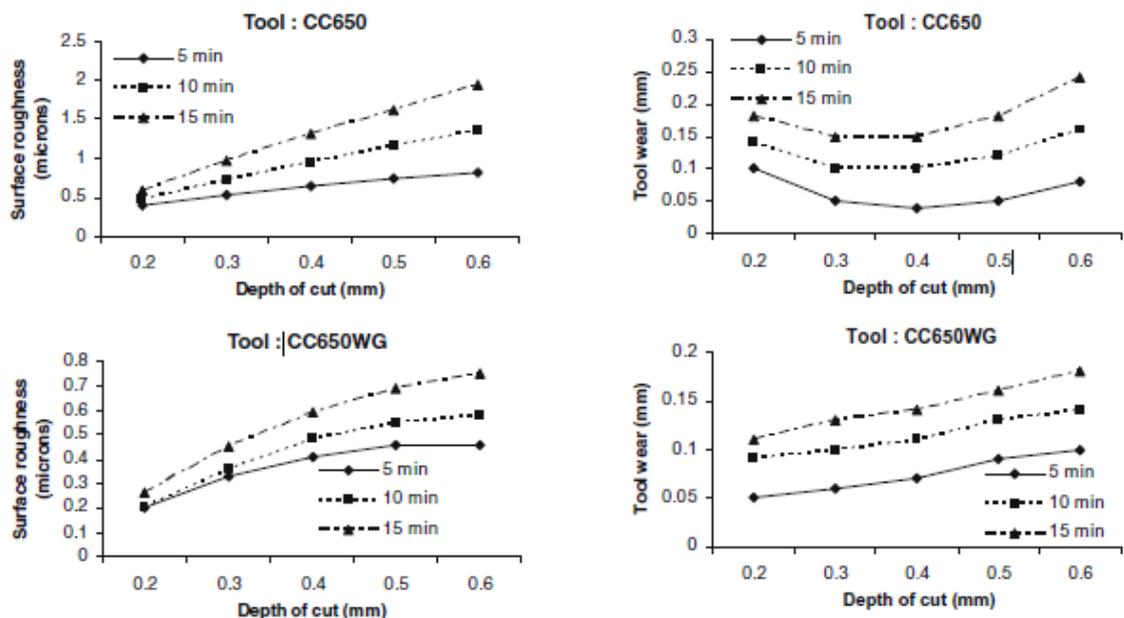


Figure I.47 : Topographies typiques obtenus par l'interférométrie blanche légère, (a) sur la surface d'attaque de l'outil ($V_c = 300$ m/min, $f = 0.1$ mm/tr, $ap = 1$ mm, temps de coupe = 6.26 min) et (b) sur une surface usinée ($R =$ un 0.21 μm) [FAR 08].

[GAI 09] et autres ont étudié les caractéristiques de l'usinabilité sur la précision élevée et les composantes de haute dureté. Une tentative a été faite pour analyser les effets de la profondeur de passe et du temps d'usinage sur des aspects d'usinabilité tels que la force d'usinage, la puissance, l'effort de coupe spécifique, la rugosité de surface et de l'usure de l'outil en utilisant les modèles mathématiques du deuxième degré lors du tournage de l'acier d'outil pour travail à froid à haut teneur en chrome AISI D2 avec les plaquettes en céramique (CC650, CC650WG et GC6050WH). La planification des expériences par un plan factoriel complet (FFD). D'après l'analyse paramétrique, il s'est révélé que la plaquette CC650WG est mieux performante concernant la rugosité de surface et l'usure de l'outil, alors que la plaquette conventionnelle CC650 est utile en réduisant la force d'usinage, la puissance et l'effort de coupe spécifique (figures I.48 et I.49).



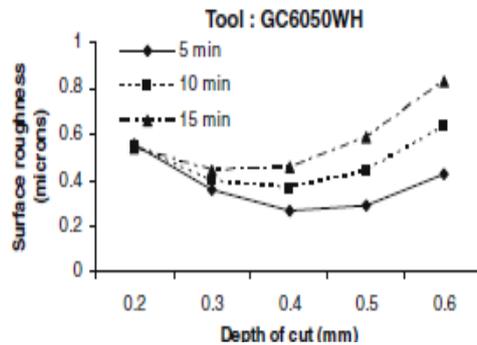


Figure I.48 : Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la rugosité [GAI 09].

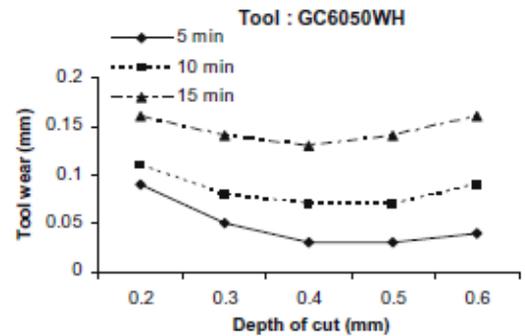


Figure I.49 : Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur l'usure [GAI 09].

[USM 07] et autres présentent les résultats d'une recherche sur la durée de vie de l'outil et du comportement à l'usure de pour les outils de coupe avec une faible teneur en CBN lors du tournage dur de l'acier durci H13. L'approche suivie dans ce travail a exigé des expérimentations et une modélisation thermique par éléments finis. Les expériences ont permis de mesurer les efforts de coupe, les températures de coupe, l'usure de l'outil et la zone de contact. En utilisant les efforts de coupe mesurés et la zone de contact dans le modèle orthogonal de coupe, ils ont calculé le flux de la chaleur sur l'outil. L'historique de l'analyse des températures a été associé avec les données expérimentales pour déterminer la quantité de la chaleur dans l'outil pour les vitesses conventionnelles et élevées. Ils ont trouvé que la quantité de la chaleur dans l'outil est de 21 à 22% pour les vitesses conventionnelles, tandis que pour le tournage à grande vitesse, elle est de 14%. L'usure de l'outil, cependant, s'est avérée quelle peut être dominée par l'écaillage pour les deux vitesses de coupe et peut être réduite considérablement avec une réduction de la quantité de chaleur dans l'outil.

[DUR 09] et autres ont étudié les mécanismes d'usure répandues d'un outil de céramique mixte revêtu de TiN pour différentes conditions d'usinage lors du tournage de l'acier d'outil pour travail à chaud AISI H11. Les différents mécanismes d'usure observés sont usure par abrasion à basse vitesse de coupe, faible avance, et dureté élevée de la pièce ; la formation de la couche protectrice et l'arête rapportée (BUE) résultant des réactions tribo-chimique entre les constituants de l'outil et le matériau de la pièce à la vitesse modérée. La haute température accompagnée de vitesse de coupe élevée a eu comme conséquence le déplacement de la couche protectrice et a supprimé la formation de l'arête rapportée. La particule dure du carbure du matériau de coupe à une avance plus élevée a sévèrement endommagé la dépouille de l'outil. Ils ont observé des fragiles écaillages et les ruptures à la profondeur de passe petite et élevée. L'adhérence du matériau de la pièce suivi par la déformation plastique et l'entaillage était clairement visible à une basse dureté de la pièce. L'influence de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe, et de la dureté de la pièce sur l'usure en dépouille de l'outil, le taux d'usure en dépouille ($VB \mu\text{m}/\text{km}$) dans la région d'usure constante ont été également analysés (figure I.50).

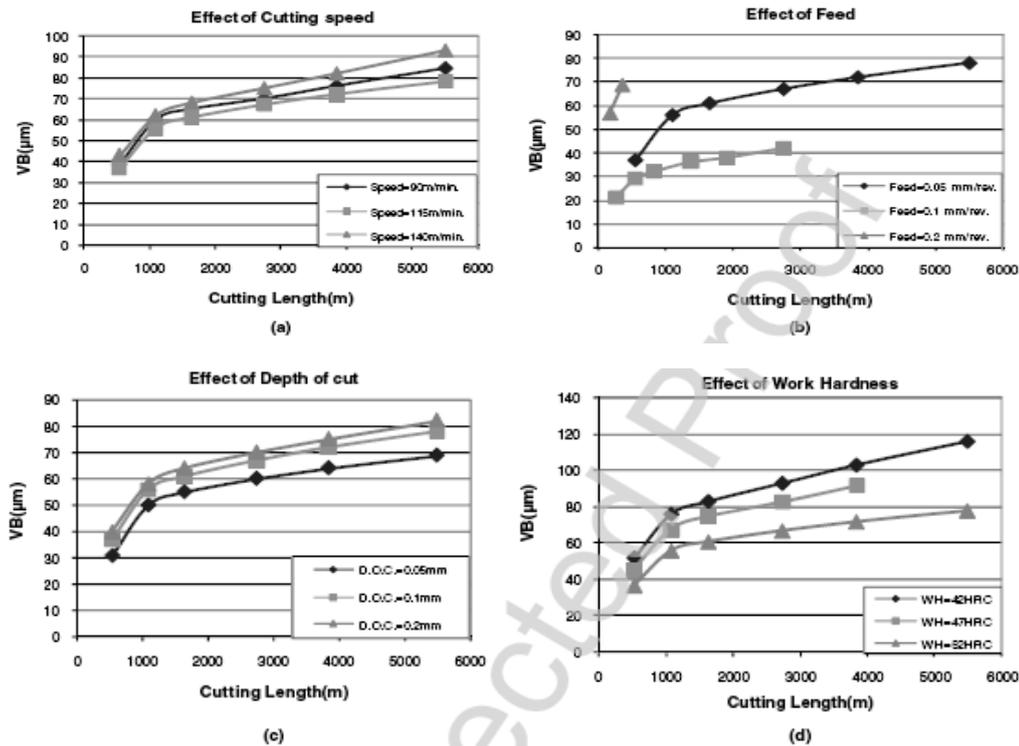


Figure I.50 : Effet des paramètres d'usinage sur l'usure de l'outil [DUR 09].

I. 12 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases nécessaires à la compréhension de cette étude :

- un rappel des bases scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux.
- un bref descriptif des matériaux de coupe et des mécanismes d'endommagements des outils de coupe.
- un bref descriptif de la méthodologie du couple outil-matière.
- un résumé sur les différents travaux scientifiques de recherche publiés ces 15 dernières années et qui concernent l'usinage dur ainsi que le comportement du couple outil matière.
- En se basant sur l'étude bibliographique, il ressort que les outils céramiques et les CBN sont des matériaux en pleine évolution par rapport aux carbures métalliques. Ils permettent des performances irréalisables avec les autres matériaux à outil du point de vue :
 - Productivité, parce qu'ils sont utilisés en usinage à grande vitesse.
 - Ces outils offrent la possibilité d'usiner des matériaux difficilement usinables.
 - Ils permettent d'obtenir des qualités de surface, avec toute satisfaction, lors des opérations de finition.

La suite de la thèse porte sur la description : des caractéristiques de la matière testée dans cette étude, ainsi que celle des plaquettes de coupe utilisées, des différents équipements, et méthodes de mesure mise en œuvre permettant d'aboutir à une caractérisation scientifique.

Problématique

Malgré le développement de nouvelles techniques permettant d'élargir le champ d'application des procédés de fabrication par enlèvement de la matière, telles que l'électroérosion ou la découpe par laser, l'Usinage par outil coupant garde une place dominante parmi ces procédés, en raison du rendement énergétique très favorable de ce processus traditionnel. Cette position se trouve d'ailleurs renforcée, grâce aux gains de productivité et à la flexibilité accrue, que permet l'utilisation de plus en plus étendue de la commande numérique et de la programmation automatique des machines-outils.

Aussi est-il souhaitable d'abaisser au maximum les coûts de production de ce processus par l'augmentation des vitesses de coupe, réalisable notamment grâce à l'introduction de nouveaux matériaux coupants. De ce fait, l'optimisation des conditions opératoires des outils coupants doit contribuer largement au développement et à la productivité des techniques avancées d'automatisation de l'usinage.

De plus les progrès techniques, notamment dans les domaines de l'automobile, l'aviation, de l'espace et du nucléaire, ont développé l'emploi de matériaux à d'usinabilité difficile, qui demandent des matériaux à outils très résistants. Parallèlement, ces progrès font apparaître de nouveaux matériaux susceptibles d'être utilisés pour réaliser des outils coupants répondant à ces exigences.

Les outils de coupe en acier rapide, carbure et cermet sont utilisés en tournage pour la plupart des matériaux usinés mais leur tenue est limitée et leur usage parfois impossible lorsque certaines pièces à usiner se caractérisent par une grande dureté et une résistance à l'abrasion élevée. C'est le cas principalement des aciers et fonte trempés, des alliages réfractaires à base de nickel et des matériaux composites à matrice métallique.

C'est pourquoi, bien que les études entreprises jusqu'à présent dans le domaine de la coupe des matériaux durs (mécanisme de la formation du copeau, comportement des outils, aspect thermique, endommagement des arêtes de coupe) aient permis des progrès importants pour la connaissance du processus de coupe en tournage dur, il est nécessaire de les réactualiser et de les poursuivre, afin de répondre à ces conditions nouvelles du contexte industriel. Notons aussi que le tournage dur a été appliqué dans beaucoup de cas industriels mais il n'est pas entièrement contrôlé. Il apparaît, en particulier, que la complexité et les interactions des nombreux facteurs impliqués dans les phénomènes de la coupe en TD, nécessitent des expérimentations spécifiques à chaque matériau, afin de définir le meilleur choix des outils et les conditions de coupe optimales correspondantes.

Les travaux de recherche qui font l'objet de cette thèse de doctorat s'inscrivent dans cet objectif. En particulier l'étude d'un matériau difficilement usinable (AISI D3) traité à 60 HRC ou il y a très peu de résultats bibliographiques sur son usinabilité et aussi l'évaluation des performances de coupe des outils en nitrure de bore cubique (CBN) et les céramiques.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des moyens exploités pour la réalisation des expériences, afin de caractériser le comportement du couple (outil-matière). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés et qui servent au suivi de l'évolution de l'usure, de l'effort de coupe générée, de la rugosité de surfaces obtenue et de la température de coupe dégagée lors de l'usinage. Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique et au laboratoire de LMS à l'Université de 08 Mai 1945.

II.2 Banc d'essais et équipement de mesure

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences. Un banc d'essais comportant un tour à charioter et à fileter, une plate forme Kistler pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée, un microscope pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe et un pyromètre pour la mesure de la température de coupe.

II.2.1 Machine outil

Les essais de chariotage ont été réalisés sur un tour conventionnel de la société chèque « TOS TRENCIN » modèle SN40 (figure II.1) avec les caractéristiques suivantes :

- Puissance du moteur électrique: 6.6 kW
- Nombres de tours par minute: 45 à 2000 tr/min.
- Vitesse d'avance en millimètres par tour: 0.08 à 6.4 mm/tr

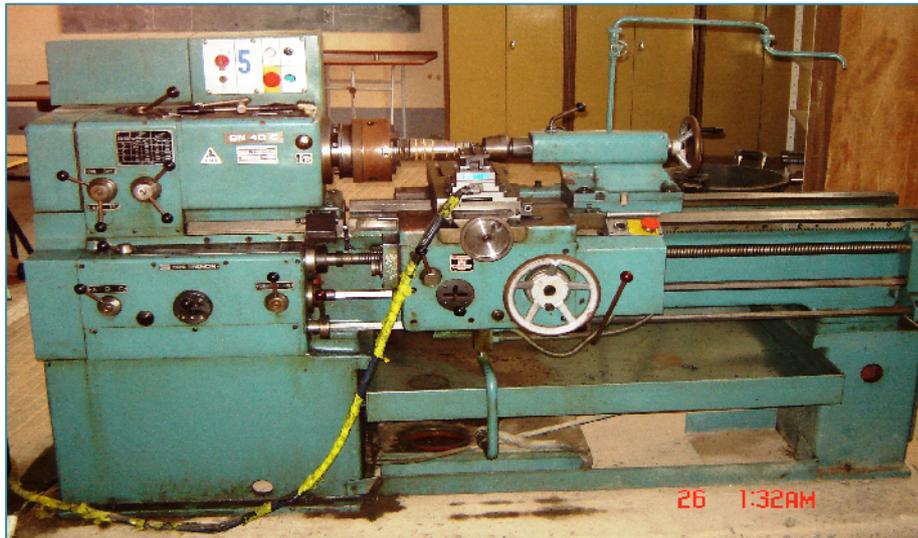


Figure II.1: Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

II.2.2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage

L'acier fortement allié AISI D3, (DIN 1.2080, JIS SKD1, GB Cr12, afnor Z200Cr12) 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). Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont comme suit :

- Densité : 7.7g/cm^3 .
- Module d'élasticité : 21.10 MPA.
- Conductibilité thermique: 20 W/m.C° .

L'acier fortement allié AISI D3 est utilisé surtout pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filières d'étirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois, peignes à rouler des filets, etc.... [NOT 81]. Les éprouvettes utilisées pour les essais d'usure, de rugosité et d'effort de coupe, sont coupées sur des barres plaines en acier AISI D3 laminées à chaud et qui possèdent un diamètre $D=80\text{ mm}$ et une longueur $L=400\text{ mm}$ (figure II.2, II.3).



Figure II.2: Barres laminées à chaud en acier AISI D3.

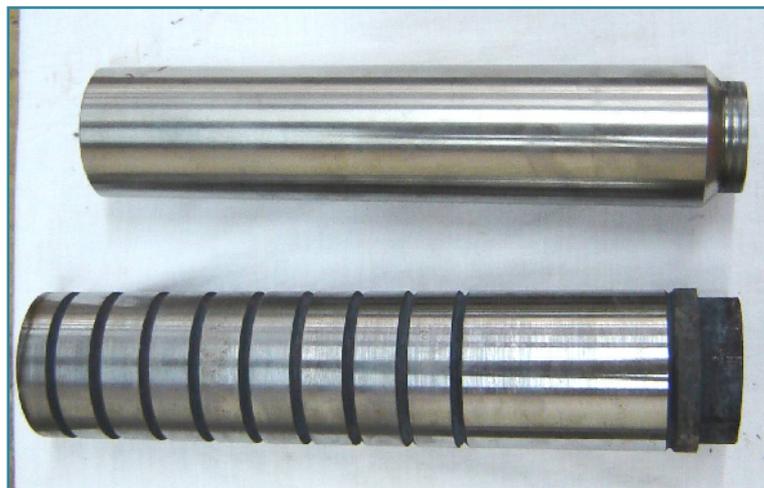


Figure II.3: Photos des éprouvettes utilisées.

✓ **Compositions chimiques**

Pour mieux caractériser notre matériau, nous avons réalisé une analyse de la composition chimique au complexe sidérurgique 'd'el-Hadjar'. Les résultats sont présentés dans le (tableau II.1)

<i>Carbone (C)</i>	<i>Silicium (Si)</i>	<i>Manganèse (Mn)</i>	<i>Chrome (Cr)</i>	<i>Tungstène</i>
2,00	0,25	0,30	11,50	0,70

Tableau II.1: Composition chimique de l'acier AISI D3

✓ **Traitement thermique appliqué:**

Avant la réalisation des différents essais, nos éprouvettes ont subi un traitement thermique pour avoir une dureté supérieure à 45 HRC (tournage dur). Le traitement thermique consiste à faire une trempe à une température de (930 à 980) C°, suivie immédiatement d'un revenu à ce qui a augmenté la dureté de 27 à 60 HRC.

La figure (II.4) présente le diagramme de revenu de l'acier AISI D3 établi par le fabricant [BÖHLER].

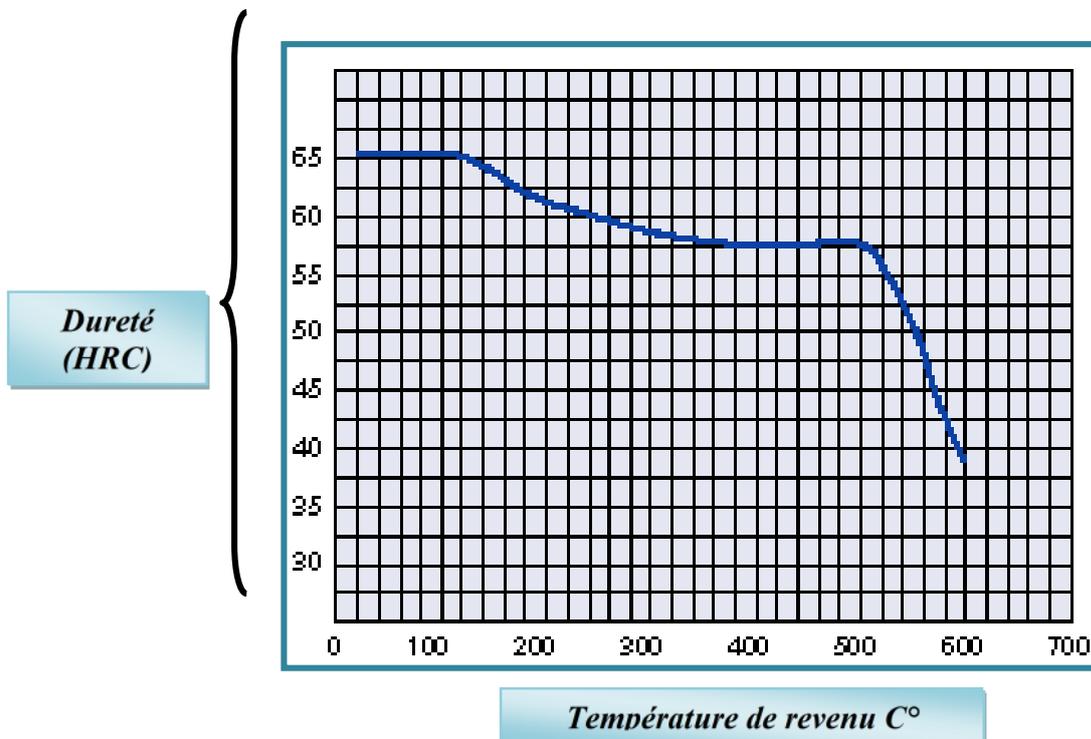


Figure II.4: Diagramme du revenu.

Les traitements thermiques des éprouvettes ont été réalisés dans un four électrique pour atelier de production (figure II.5). Les caractéristiques de ce four sont citées dans le tableau (II-2).

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

Tableau II.2: Caractéristiques du four électrique.



Figure II.5: Four à chambre électrique pour le traitement thermique des éprouvettes.

Les opérations de traitement thermique des éprouvettes sont représentées dans la figure II.6 ((a), (b) et (c)).



(a) Chauffage des éprouvettes

(b) Transport de la pièce

(c) Trempe à l'huile

Figure II.6: ((a), (b) et (c)) Opérations de traitement thermique [FNI 08].

II.2.3 Outils de coupe utilisés

✓ Plaquettes

Les plaquettes choisies pour cette étude (figure II.7) sont de marque **Sandvik** (de désignation: **SNGN 12-04-08**) et comportant 8 arêtes de coupe par plaquette. Leurs caractéristiques sont répertoriées dans le (tableau II.3).

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Marque	Composition
CBN	7020	SNGA 12.04.08 +12.04.12 T01020	Sandvik	57% CBN + 35% TiCN + 8% autre
Céramique mixte revêtue	CC6050	SNGA 12.04.08	Sandvik	70 % Al_2O_3 + 30 % TiC + revêtement en TiN
Céramique mixte	CC650	SNGA 12.04.08 T01020	Sandvik	70 % Al_2O_3 + 30 % TiC
Céramique composite	CC670	SNGN 12.04.08 T01020	Sandvik	Al_2O_3 (75%) + SiC (25%)
Carbure revêtu	GC4005	SNMG 12.04.08 PM	Sandvik	WC + triples revêtements

Tableau II.3 : Informations relatives aux plaquettes utilisées.

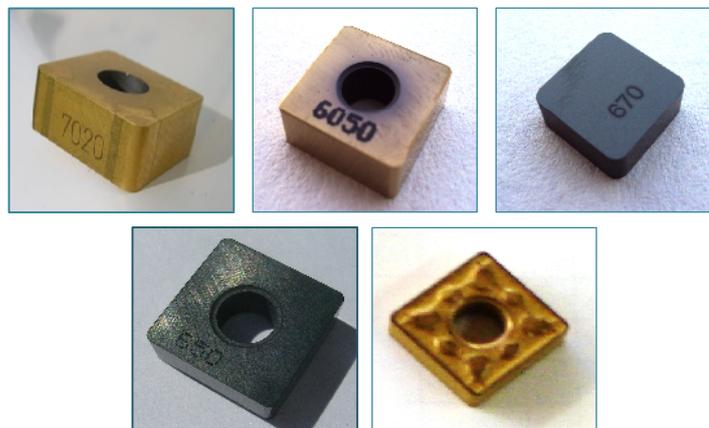


Figure II.7: Plaquettes de coupe utilisées.

CBN7020

C'est une nuance de Nitrure de bore cubique (CBN) additionnée de carbonitrure de titane. Pour une plus haute sécurité, le CBN est fritté (non brasé) (insert CBN en coin) sur chaque pointe du support carbure, d'où le nom de plaquettes multi-pointes. Cette technique réduit le risque de débrasage de l'insert causé par l'affaiblissement de cette liaison à hautes températures. Dans le cas des inserts brasés, lorsque la température de la plaquette atteint 640° C, la brasure fond et l'insert se déchausse du substrat WC. La plaquette a également un revêtement PVD TiN de 2 µm d'épaisseur pour faciliter la détection de l'usure. La résistance à l'usure et la stabilité chimique sont considérables, pour l'usinage de finition des aciers et les fontes trempées. Les plaquettes CBN sont fabriquées avec chanfrein de protection de 20° sur une largeur de 0,1mm ainsi qu'un rayon de raccordement r_{β} d'environ 0,03mm.

Céramique CC6050

La céramique CC6050 est une alternative économique au CBN quand les exigences de surface sont moins élevées, ou pour l'usinage du dur (65 HRC) au plus tendre (jusqu'à 40-50 HRC) de matières de dureté variable, dans lesquelles CC6050 offre des performances plus constantes qu'un CBN.

Céramique CC650

C'est une nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnée de carbure de titane. Elle est recommandée principalement pour l'usinage de finition des aciers trempés, des fontes trempés et les superalliages réfractaires, requérant une bonne résistance à l'usure associée à de bonnes propriétés thermiques.

Céramique CC670

La plaquette CC670 (figure II.7) est une nuance de céramique « Whisker » renforcée par des fibres de carbure de silicium dispersées dans le substrat (75%Al₂O₃+25%SiC). Convient particulièrement pour l'usinage sous hautes avances de superalliages réfractaires et de matières trempées où les exigences de sécurité et de robustesse sont élevées [Sandvik 2009].

Carbure GC4005

Nuance de carbure à revêtement CVD avec une excellente résistance à l'usure en cratère et à la déformation plastique. C'est un très bon choix pour l'usinage à sec, les temps de coupe prolongés et les vitesses élevées. A utiliser pour l'ébauche à la semi-finition dans les aciers.

✓ **Descriptif des plaquettes SNGN 12-04-08**

S : Indique la forme de la plaquette (ici carré) ;

N: Valeur de l'angle de dépouille ;

G: Tolérances dimensionnelles ;

N: Type de fixation de la plaquette sur le corps d'outil ;

12: Indication de la longueur d'arête de coupe

04: Indication de l'épaisseur de la plaquette

08: Rayon du bec de l'outil ici égal à 0.8mm.

✓ Porte outils

Les plaquettes utilisées dans notre étude, sont fixées mécaniquement sur deux porte-outils sur lesquels sont fixées les plaquettes mécaniquement par bride (PSBNR2525K12) et par trou central CSBNR2525 M12 (figure II.8). Les portes outils ont la géométrie suivante $\chi_r^\circ = 75$; $\alpha^\circ = 6$; $\gamma^\circ = -6$; $\lambda^\circ = -6$. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

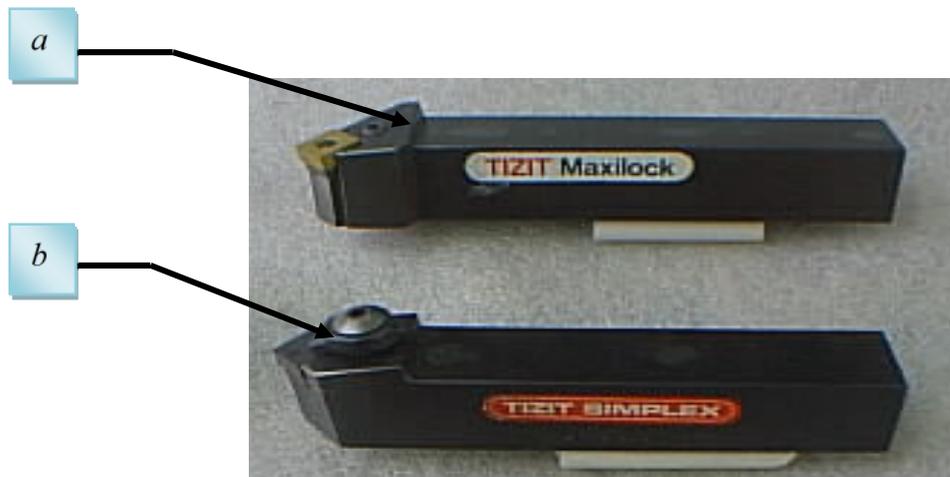


Figure II.8: Porte- outils utilisés (a) par trou de central; (b) par bride.

II.2.4 Appareillage de mesures utilisées

II.2.4.1 Mesure de l'usure

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) est du type HUND (W-AD). La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0.001mm. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure VB, VB max et VC. Après chaque séquence de travail la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (figure II.9). Pour la mesure de l'usure en cratère nous avons utilisé un comparateur équipé d'une touche à pointe vive, cette dernière suit le profil du cratère et sa profondeur sera indiquée sur le cadran digital du comparateur qui a une précision de 0,001 mm.



Figure II.9: (a) Microscope de mesure de l'usure frontale; (b) Stéréo- microscope pour prendre les photos de l'usure.

II.2.4.2 Mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) Surftest 301 (Mitutoyo) avec une résolution de $0,1\mu\text{m}$, équipé d'une imprimante de profil de rugosité (figure II.10). 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.11). 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: Rugosimètre Surftest 301.

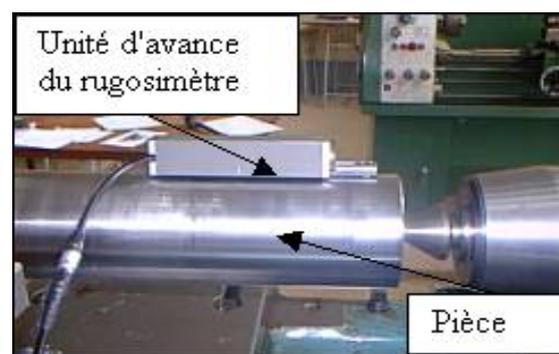


Figure II.11: Mesure de la rugosité sans démontage de la pièce.

II.2.4.3 Mesure de la température de coupe

Pour mesurer la température dans la zone de coupe, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge modèle Raynger 3I (figure II.12). Le pyromètre mesure les températures de surface à distance. Il concentre l'énergie infrarouge rayonnant de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (maximale, moyenne et minimale) qui seront affichées sur l'écran digital en degré Celsius ou Fahrenheit.

Une sortie analogique/digitale permet le transfert des données enregistrées. Le pyromètre à infrarouge Raynger 3I présente les caractéristiques suivantes:

- Étendue de mesure -30° à 1200°C .
- Étendue spectrale 8 à $14\ \mu$.
- Résolution optique 75: 1
- Émissivité 0,10 à 1,00 par pas de 0,01 (0,95 par défaut).
- Visée laser double.
- Temps de réponse 700 m sec.



Figure II.12: Pyromètre à infrarouge.

II.2.4 74

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (**KISTLER** 9257 B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on cite: la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (figure.II.13). La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (figure II.14).

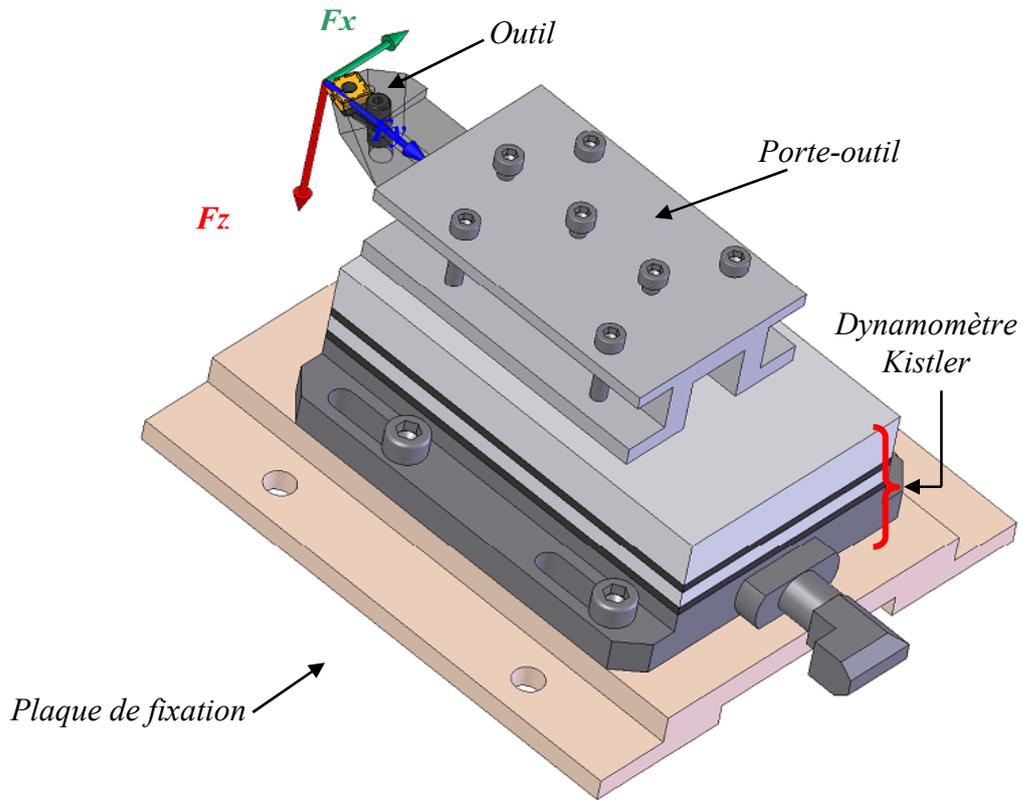


Figure II.13: Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

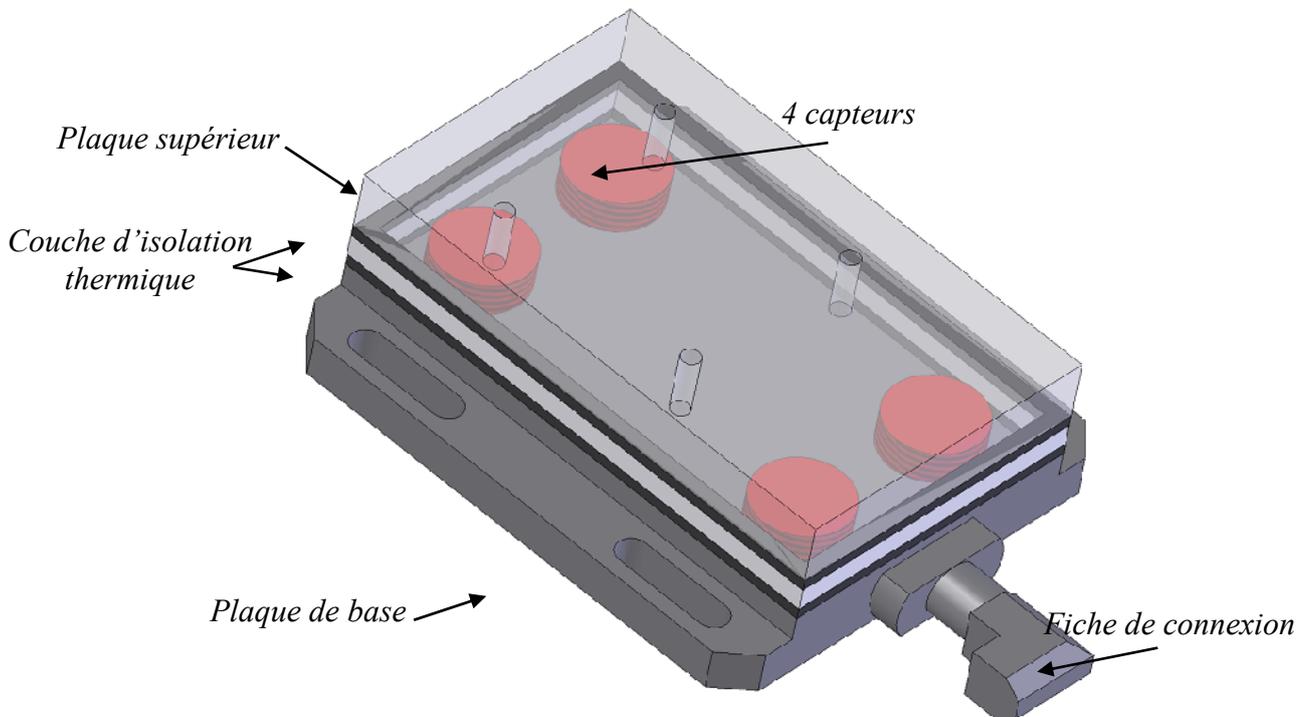


Figure II.14: Capteur d'effort de coupe KISTLER.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (*DYNOWARE*) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimé en trois composantes. La figure (II.15) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes des efforts de coupe (Force axiale: F_x , Force radiale: F_y et Force tangentielle: F_z).

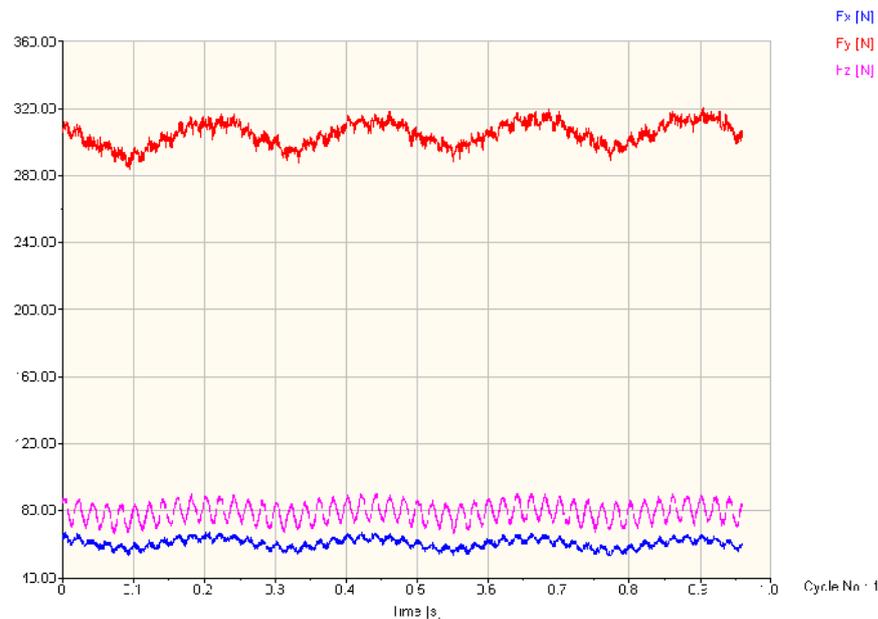


Figure II.15: Exemple d'acquisition du logiciel « *DYNOWARE* ».

✓ Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à 3 composantes (9257 B): le porte outil type 9403 vissable est employé pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26 (figure II.16).

- Grande rigidité, fréquence propre très élevée;
- Large gamme de mesure ;
- Bonne linéarité, sans hystérésis;
- Faible interaction (<1%) ;
- Utilisation simple (prêt à l'emploi);
- Construction compacte ;
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- Ordinateur personnel (PC) ;
- Traceur.

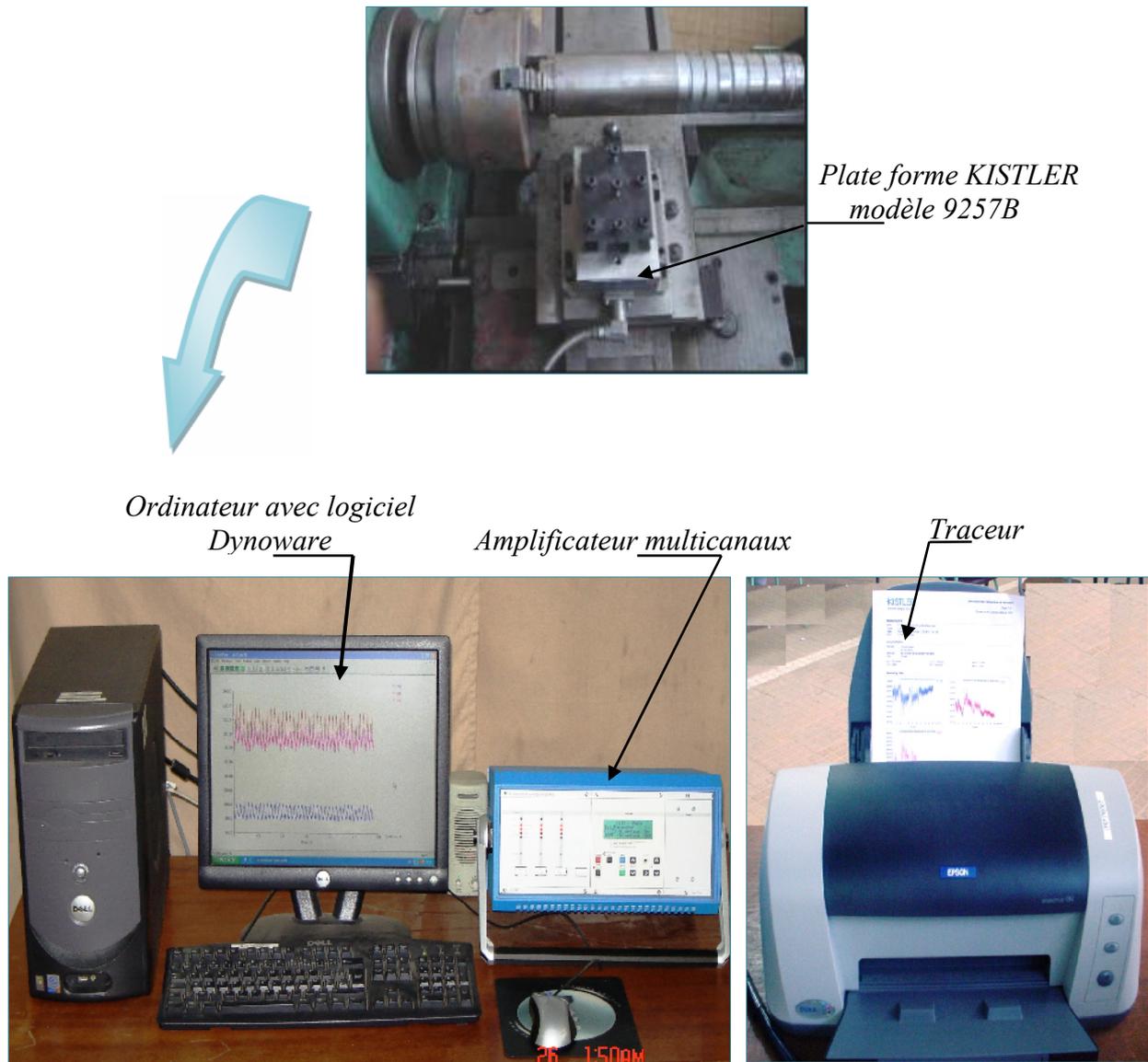


Figure II.16: Chaîne de mesure des efforts de coupe

II.3 Planification des expériences

II.3.1 Introduction

Il existe plusieurs éléments intervenant sur le processus de coupe. Parmi ces derniers on peut citer : les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (r , α , β , γ , ε , etc.....), ainsi que les conditions de coupe (rigidité de la machine, lubrification). On peut dire que tous ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre, les efforts de coupe, l'usure (durée de vie), la rugosité, la température de coupe représentent eux les paramètres de sortie. Il est sûr qu'en ce qui concerne notre étude, de nombreux points apparaissent

importants à traiter. Toutefois, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution des paramètres suivants :

- ◆ L'usure des 5 matériaux et particulièrement le CBN;
- ◆ Les efforts de coupe en fonction des paramètres (V_c , f , a_p , r et H) et en fonction de l'usure en dépouille VB ;
- ◆ La rugosité en fonction des paramètres (V_c , f , a_p , r et H) et de l'usure en dépouille VB ;
- ◆ La température de coupe en fonction des paramètres (V_c , f , a_p) et de l'usure VB .

Considérant $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ comme paramètres d'entrée et $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ comme paramètres de sortie. L'influence d'un ou de plusieurs facteurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) sur un paramètre Y [AND 84], [CLE 02], peut être obtenue en utilisant les deux méthodes suivantes:

- Méthode unifactorielle
- Méthode multifactorielle

II. 3.2 Méthode unifactorielle

On fait appel à cette méthode pour évaluer l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y . L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné X [$X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$], tout en maintenant tous les autres facteurs constants (tableau II.4).

Pour chaque $X = X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i , ($i = 1 \div N$). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation $Y = f(X)$. Dans ce cas, on varie seulement le facteur X , tout en maintenant les autres facteurs constants.

N°	Facteur variable	Paramètre de sortie						
	X	Y_1	Y_2	-	Y_g	-	Y_n	Y_{moy}
1	X_1	Y_{11}	Y_{21}	-	Y_{g1}	-	Y_{n1}	Y_{moy1}
2	X_2	Y_{12}	Y_{22}	-	Y_{g2}	-	Y_{n2}	Y_{moy2}
3	X_3	Y_{13}	Y_{23}	-	Y_{g3}	-	Y_{n3}	Y_{moy3}
i	X_i	Y_{1i}	Y_{2i}	-	Y_{gi}	-	Y_{ni}	Y_{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X_N	Y_{1N}	Y_{2N}	-	Y_{gN}	-	Y_{nN}	Y_{moyN}

Tableau II.4 : Réalisation d'essais d'après la méthode unifactorielle.

II.3.3 Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y_j . c'est une relation qui a la forme :

$$Y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

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 le premier cas (usinage avec le CBN) nous avons quatre facteurs de base (k = 4) et chaque facteur à deux niveaux de variation (un niveau supérieur (+ 1) et un niveau inférieur (-1)). Nous avons alors $N = 2^4 = 16$ (pour les essais de rugosité, les efforts de coupe et la température de coupe). Les essais ont été numérotés de 1 à 16. 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.5).

Dans le second cas (usinage avec la céramique mixte), 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 ont été 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).

Niveau de facteurs	Facteurs variables			
	f (mm/tr)	a _p (mm)	V _c (m/min)	r _ε (mm)
Nombre des essais	Valeurs codifiées des facteurs			
	X1	X2	X3	X4
1	- 1	- 1	-1	- 1
2	+ 1	- 1	-1	- 1
3	- 1	+ 1	-1	- 1
4	+ 1	+ 1	-1	- 1
5	- 1	- 1	+1	- 1
6	+ 1	- 1	+1	-1
7	- 1	+ 1	+1	- 1
8	+ 1	+ 1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1

Tableau II.5 : Matrice de planification pour un plan 2⁴.

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

Dans la coupe des métaux, les lois liant la sortie Y d'un système d'usinage aux paramètres d'entrée (X₁, X₂,, X_n) sont en général de la forme :

$$Y = CX_1^{k1} \cdot X_2^{k2} \cdot \dots \cdot X_n^{kn} \dots\dots\dots (II.2)$$

Où :

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

k₁, k₂, k₃,..... k_n: Sont des exposants qui reflètent respectivement les degrés d'influence de (X₁, X₂, X_n) sur Y [ROU 75].

II.3.4 Méthode de calcul des constantes des modèles mathématiques

La procédure pour le calcul des constantes et des exposants pour les différents modèles mathématiques est la suivante [YAL 05] :

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{it})^2 \dots\dots\dots (II.3)$$

où:

S : La somme des carrés des écarts quadratiques ;

N : Le nombre des essais ;

Y_i : Les coordonnées d'un point expérimental ;

Y_{it} : Les coordonnées d'un point situé sur la droite moyenne de régression ;

ε : Valeur infiniment petite.

Cette méthode exige que la somme S soit minimale. En dérivant l'équation (II.3) par rapport aux coefficients (C et n) et en égalisant les résultats à zéro, on obtient :

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial C} = 0$$

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - nX_i - C)^2 \dots\dots\dots (II.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial n} &= -2 \sum_{i=1}^N (Y_i - nX_i - C) X_i = 0. \\ \frac{\partial S}{\partial C} &= -2 \sum_{i=1}^N (Y_i - nX_i - C) = 0. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (II.5)$$

Le développement des expressions (II.13) nous donne:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N Y_i &= nC + n \sum_{i=1}^N X_i \\ \sum_{i=1}^N Y_i X_i &= C \sum_{i=1}^N X_i + n \sum_{i=1}^N X_i^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (II.6)$$

de (II.14) on peut déterminer les constantes C et n

$$C = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N Y_i - n \sum_{i=1}^N X_i \right] \dots\dots\dots (II.7)$$

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N Y_i X_i - \sum_{i=1}^N Y_i \sum_{i=1}^N X_i}{N \sum_{i=1}^N X_i^2 - (\sum_{i=1}^N X_i)^2} \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

Une fois, C et n sont déterminés le modèle mathématique cité dans l'équation est complètement défini. Cette méthode est très précise, seulement, elle nécessite des calculs sur micro-ordinateur. Pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques, nous avons utilisé un programme qui détermine directement les valeurs des constantes des modèles (tenue et usure) ainsi que le coefficient de détermination R².

a) Détermination de la loi de la coupe (méthode multifactorielle)

Les modèles mathématiques les plus couramment utilisés s'expriment (conformément aux idées de TAYLOR) sous la forme de l'équation (II.2) :

Pour la rugosité: $R = C \cdot f^\beta \cdot a_p^\gamma \cdot V^\alpha \dots\dots\dots(\text{II.10})$

Pour l'effort : $F = C \cdot f^\beta \cdot a_p^\gamma \cdot V^\alpha \dots\dots\dots(\text{II.11})$

Où :

R : Rugosité (Ra, Rz, Rt);

F : Effort de coupe (Fa, Fv, Fr) ;

C : constante qui tient compte des facteurs non cités dans (II.10 et 11)

α, β, γ : exposant qui expriment le degré d'influence des différents facteurs de base (V, f, a_p) sur les paramètres de sortie (R, F).

La méthode des moindres carrés de « GAUSS-LEGENDRE » permet de déterminer les différents coefficients de la loi de coupe.

Prenons le logarithme de l'équation (II.10), on obtient alors pour l'équation suivante :

$$\ln R = \ln c + \alpha \ln V + \beta \ln f + \gamma \ln a_p \dots\dots\dots(\text{II.12})$$

Un changement de variables permet d'écrire l'équation (II.12) sous la forme suivante :

$$Y = C + \alpha \cdot X_1 + \beta \cdot X_2 + \gamma \cdot X_3 \dots\dots\dots(\text{II.13})$$

Où :

$Y = \ln R$; $C = \ln C$; $X_1 = \ln V$; $X_2 = \ln f$; $X_3 = \ln a_p$.

La méthode des moindres carrés exige que la somme des écarts quadratiques soit minimale, nous aurons alors :

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{it})^2 \rightarrow \varepsilon \text{ (valeur infiniment petite).}$$

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - C - \alpha \cdot X_{1i} - \beta \cdot X_{2i} - \gamma \cdot X_{3i})^2 \rightarrow \varepsilon \dots\dots\dots(\text{II.14})$$

En prenant les dérivées partielles de la somme (S) par rapport aux inconnues C, α, β, et γ et en égalisant à zéro on obtient.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial C} &= -2 \sum_{i=1}^N (Y_i - C - \alpha X_{1i} - \beta X_{2i} - \gamma X_{3i}) = 0. \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^N Y_i - \sum_{i=1}^N C - \sum_{i=1}^N \alpha X_{1i} - \sum_{i=1}^N \beta X_{2i} - \sum_{i=1}^N \gamma X_{3i} &= 0. \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^N Y_i = NC + \alpha \sum_{i=1}^N X_{1i} + \beta \sum_{i=1}^N X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^N X_{3i} &\dots\dots\dots (II.15) \end{aligned}$$

Pour les autres dérivés on aura :

$$\begin{aligned} * \frac{\partial S}{\partial \alpha} &= -2X_{1i} \sum_{i=1}^N (Y_i - C - \alpha X_{1i} - \beta X_{2i} - \gamma X_{3i}) = 0. \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^N X_{1i} Y_i = C \sum_{i=1}^N X_{1i} + \alpha \sum_{i=1}^N X_{1i}^2 + \beta \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{3i} &\dots\dots\dots (II.16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} * \frac{\partial S}{\partial \beta} &= -2X_{2i} \sum_{i=1}^N (Y_i - C - \alpha X_{1i} - \beta X_{2i} - \gamma X_{3i}) = 0. \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^N X_{2i} Y_i = C \sum_{i=1}^N X_{2i} + \alpha \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{2i} + \beta \sum_{i=1}^N X_{2i}^2 + \gamma \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{3i} &\dots\dots\dots (II.17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} * \frac{\partial S}{\partial \gamma} &= -2X_{3i} \sum_{i=1}^N (Y_i - C - \alpha X_{1i} - \beta X_{2i} - \gamma X_{3i}) = 0. \\ \Rightarrow \sum_{i=1}^N X_{3i} Y_i = C \sum_{i=1}^N X_{3i} + \alpha \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{3i} + \beta \sum_{i=1}^N X_{3i} X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^N X_{3i}^2 &\dots\dots\dots (II.18) \end{aligned}$$

Les équations (II.22 à II.25) forment le système suivant :

$$\left(\begin{aligned} \sum_{i=1}^N Y_i &= NC + \alpha \sum_{i=1}^N X_{1i} + \beta \sum_{i=1}^N X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^N X_{3i}. \\ \sum_{i=1}^N X_{1i} Y_i &= C \sum_{i=1}^N X_{1i} + \alpha \sum_{i=1}^N X_{1i}^2 + \beta \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{3i} \\ \sum_{i=1}^N X_{2i} Y_i &= C \sum_{i=1}^N X_{2i} + \alpha \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{2i} + \beta \sum_{i=1}^N X_{2i}^2 + \gamma \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{3i} \\ \sum_{i=1}^N X_{3i} Y_i &= C \sum_{i=1}^N X_{3i} + \alpha \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{3i} + \beta \sum_{i=1}^N X_{3i} X_{2i} + \gamma \sum_{i=1}^N X_{3i}^2 \end{aligned} \right) \dots\dots\dots (II.19)$$

Pour résoudre le système (II.19), on remplace les X_{ji} par leurs valeurs codifiées du tableau (II.5) on obtient :

$$\left(\begin{array}{l} \sum_{i=1}^N Y_i = N C \\ \sum_{i=1}^N X_{1i} Y_i = N \alpha \\ \sum_{i=1}^N X_{2i} Y_i = N \beta \\ \sum_{i=1}^N X_{3i} Y_i = N \gamma \end{array} \right) \Rightarrow \left(\begin{array}{l} C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \\ \alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{1i} Y_i \\ \beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{2i} Y_i \\ \gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{3i} Y_i \end{array} \right) \dots\dots\dots (II.20)$$

Les valeurs ($Y_i = \ln R_i, F_i, T$) sont obtenues à partir des essais. Un coefficient dit « coefficient de corrélation global » (R) entre le modèle mathématique et les résultats expérimentaux est donné par la formule suivante :

$$R = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{it})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{moy})^2}} \dots\dots\dots (II.21)$$

avec :

$$Y_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$$

y_i : C'est la valeur obtenue expérimentalement;

y_{it} : Valeur calculée d'après le modèle.

Une meilleure adéquation est assurée lorsque la valeur de « R » tend vers l'unité. Pour déterminer les constantes du modèle de la rugosité et de l'effort de coupe (Multifactorielle), nous avons utilisé un programme en turbo pascal qui donne directement les valeurs des constantes des différents modèles ainsi que le coefficient de détermination R^2 .

II.4 Conditions de coupe

Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage), la pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification et dans les conditions de coupe suivantes:

- Pour les cinq matériaux testés (CBN ; CC6050 ; CC650 ; CC670 ; GC4005) (tableau II.6).
- Pour le matériau CBN 7020 (tableau II.7).
- Pour le plan d'expériences 2^4 nous avons adopté les niveaux indiqués au tableau (II.8).
- Pour le plan d'expériences 3^3 nous avons adopté les niveaux indiqués au tableau (II.9).

Condition de coupe	Essais d'usure	Essais d'effort de coupe et de rugosité
Vitesse de coupe (m/min)	110-200	30-40-55-80-110-160-180-200-220-300
Avance (mm/tr)	0.08	0.08-0.12-0.16-0.8-0.2-0.24-0.28
Profondeur de passe (mm)	0.2	0.05-0.1-0.2-0.3-0.4-0.5-0.6-0.8-1

Tableau II.6: Conditions de coupe.

Condition de coupe	Essais d'usure	Essais d'effort de coupe	Essais de rugosité	Essais de température
Vitesse de coupe (m/min)	85-115-150-200-240-310	30-40-55-80-110-160-220-300-420	55-110-140-200-280-400	120-160-320-450
Avance (mm/tr)	0.08-0.14	0.08-0.12-0.16-0.18-0.2-0.24-0.28	0.08-0.11-0.14-0.16-0.2	0.08
Profondeur de passe (mm)	0.5	0.05-0.1-0.2-0.3-0.4-0.5-0.6-0.8-1	0.1-0.2-0.3-0.4-0.5	0.2-0.5

Tableau II.7: Conditions de coupe.

Niveau	Vitesse de coupe (m/min)	Avance (mm/tr)	Profondeur de passe (mm)	Rayon du bec de l'outil (mm)
+1	95	0.08	0.1	0.8
-1	190	0.16	0.4	1.2

Tableau II.8: Conditions de coupe (Usinage avec le CBN).

Niveau	Vitesse de coupe (m/min)	Avance (mm/tr)	Profondeur de passe (mm)
+1	90	0.08	0.15
0	120	0.16	0.30
-1	140	0.24	0.45

Tableau II.9: Conditions de coupe (Usinage avec la céramique CC6050).

Chapitre III

Comportement des matériaux de coupe face à l'acier AISI D3

III.1 Introduction

En se basant sur l'étude bibliographique dans le premier chapitre traitant la question de l'usure des outils de coupe, on constate que les principaux paramètres technologiques, tels que la précision d'usinage, la qualité de l'état de surface, le prix du revient, la productivité de travail, ...etc., sont en relation directe avec l'usure. Par conséquent, l'étude approfondie et continue de l'usure, notamment lors de l'usinage des aciers durcis tel que l'acier AISI D3 trempé à 60 HRC avec des matériaux à outils de hautes performances, est une tâche d'une grande importance économique et technologique en productique mécanique. C'est pourquoi dans ce chapitre, nous présentons en premier temps une comparaison entre les performances en termes d'usure des différents types de matériaux de coupe tels que (CBN, CC6050, CC650, CC670 et GC4005) en usinant l'acier AISI D3 à une basse vitesse de coupe $V_c=110\text{m/min}$. Nous exposons également les résultats de l'évolution des efforts de coupe et la dégradation de la qualité de la surface de la pièce, sous l'effet de l'usure de ces cinq matériaux à outil à $V_c=110\text{m/min}$. En deuxième temps, nous exposons une comparaison entre les performances en termes d'usure des cinq matériaux testés à une vitesse élevée $V_c=200\text{m/min}$, ainsi que les résultats de l'évolution des efforts de coupe et de la rugosité de surface en fonction du temps et de l'usure. Ensuite l'étude sera focalisée sur l'étude approfondie de l'usure de l'outil CBN. A cet effet, nous présentons les différentes formes d'usure (VB et KT) du CBN en fonction du temps d'usinage et cela pour différentes conditions de coupe suivie d'une série de micrographies et des photos MEB avec une analyse par rayon X pour suivre les mécanismes d'usure sur les surfaces en dépouille et en cratère de l'outil CBN. En dernier lieu, nous présentons une exploitation des résultats de l'usure en termes de durée de vie et de productivité. Cette exploitation débouche sur une proposition des modèles mathématiques de la tenue.

III.2 Performances des matériaux de coupe

III.2.1 Performances des matériaux de coupe à $V_c=110\text{m/min}$

Les essais réalisés en tournage sont ceux d'usure de longue durée [**Norme ISO 3685**] et cela pour évaluer la tenue des différents matériaux de coupe utilisés. Ce type d'essai fournit des résultats fiables et proches de la réalité industrielle.

La majorité des spécialistes de l'usinabilité des matériaux admettent que seuls les essais d'usure de longue durée (conduisant au tracé de la droite de Taylor), fournissent les données fondamentales permettant d'apprécier le comportement d'un matériau face à un certain outil de coupe [**BER 74**], [**BOD 90**].

Les résultats de l'évolution de l'usure (frontale) de cinq plaquettes étudiées en fonction du temps sont présentés sur la figure (III.1). L'analyse de cette figure montre 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 ». 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. Au court de la deuxième qui dépasse la période de rodage, l'usure évolue avec une vitesse relativement plus lente en devient plus au moins linéaire, cette période est connue dans la littérature par "l'usure normale". Elle se distinguant 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 faisant favoriser l'apparition de la troisième

période. L'élévation de la température dans les zones de contact de la partie active de l'outil conduit à l'accélération des mécanismes d'usure par abrasion et par diffusion. Par conséquent, l'usure augmente brusquement et l'outil perd ses qualités de coupe en affectant la rugosité et la précision dimensionnelle.

L'analyse de la figure (III.1) montre que ces trois périodes ne sont pas claires pour le carbure GC 4005 à cause de l'usure accélérée.

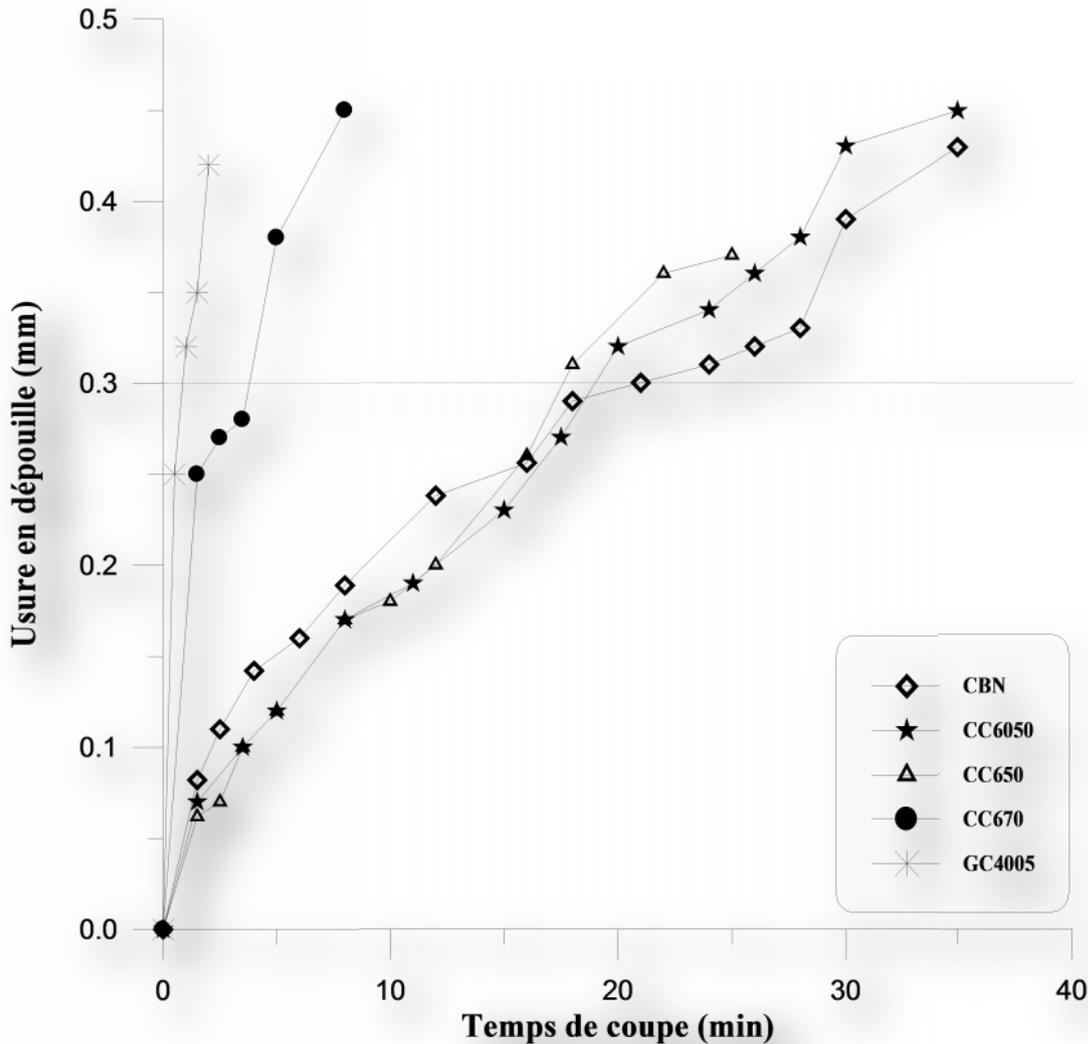


Figure III.1 : Usure en dépouille (VB) en fonction du temps de coupe pour $V_c=110m/min$; $f=0.08mm/tr$; $a_p=0.2mm$.

Pour comparer les performances en termes d'usure des différents matériaux de coupe, lors de l'usinage à sec de l'acier AISI D3 usiné par les cinq (05) matériaux de coupe, nous avons adapté le critère d'usure admissible [VB] = 0.3mm. La comparaison entre les performances des différents matériaux en terme de tenue, nous permet de déterminer les différentes tenues. A cet effet, la tenue du CBN est de 21min, tandis que celle à l'usure admissible la plaquette en céramique CC6050 est de 18 min, pour la plaquette en céramique mixte CC650 au premier temps sa courbe est presque confondu avec la courbe de CC6050 donc sa valeur de tenue est de 17min. Pour la plaquette en céramique composite CC670 sa tenue est de 4min, suivie en dernier lieu par le carbure GC 4005 avec une durée de vie de 1min seulement. D'après l'allure des courbes d'usure des plaquettes (CC670 et GC4005),

on remarque que la zone normale d'usure est presque inexistante que les deux arêtes de coupe des deux plaquettes deviennent totalement endommagées à cause de l'usure rapide.

La figure III.2 (a, b, c, d, e) expose la morphologie de l'usure en dépouille VB et en cratère KT du CBN7020, de la céramique revêtue CC6050, de la céramique mixte CC650, de la céramique composite CC670 et en dernier lieu du carbure GC4005 à $V_c=110m/min$, $f=0.08mm/tr$ et $ap=0.2mm$. Initialement, l'usure en dépouille du CBN se développe suivant une bande régulière qui s'élargit avec le temps pour acquérir à la fin d'essai une forme irrégulière. On remarque aussi à la fin de l'essai et après 37 minutes de travail un petit effondrement qui s'est formé sur le bec de l'outil CBN à cause de l'usure. Cette dernière est le résultat des sollicitations-thermomécaniques qui existe à la pointe de l'outil. L'usure suivant la surface d'attaque se présente sous la forme d'un petit cratère (figure III.2a). Pour la céramique revêtue CC6050 (figure III.2b), l'usure VB se manifeste à la fin de l'usinage par une usure irrégulière on remarque aussi sur la surface en dépouille de l'outil la présence des cannelures qui présentent la caractéristique d'une haute usure abrasive. La céramique CC650 a subi un écaillage après 24 minutes de travail, ce qui a conduit à un effondrement du bec de l'outil comme s'est représenté sur la figure (III.2c). Pour la céramique composite CC670 (figure III.2d) et après 9 minutes d'usinage, on remarque une usure accélérée sur le bec de l'outil et aussi sur la surface d'attaque ce qui nous a conduit à dire que ce matériau n'est pas bien adapté à l'usinage de l'acier AISI D3 traité à 60 HRC. En dernier lieu pour le carbure GC 4005 (figure III.2e), on remarque un effondrement du bec de l'outil qui survient après 2 minutes de travail et une rupture totale est observée sur la surface d'attaque de la plaquette, ce qui nous conduit à dire que le carbure GC4005 n'est pas conseillé pour l'usinage de l'acier AISI D3 dans ces conditions de coupe.

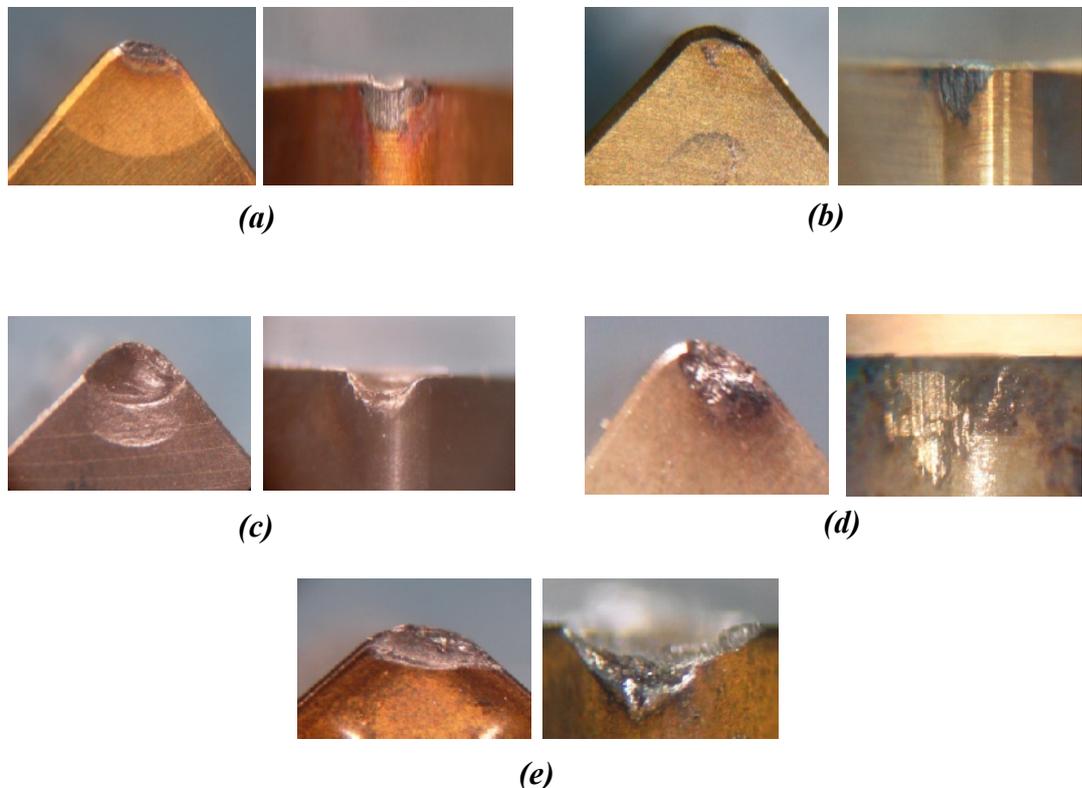


Figure III.2: Photos de l'usure VB et KT en fonction du temps à $V_c=110m/min$; $f=0.08mm/tr$; $ap=0.2mm$ pour : a) CBN7020 ; b) CC6050 ; c) CC650 ; d) CC670 ; e) GC4005.

Les histogrammes de la figure (III.3) présentent les tenues des cinq outils utilisés pour une usure admissible $[VB]=0.3$ mm. La comparaison entre les tenues des cinq matériaux de coupe nous indique que, le ratio ($T_{\text{CBN}}/T_{\text{CC6050}}$) est de 1.16, le ratio ($T_{\text{CBN}}/T_{\text{650}}$) augmente un peu pour donner la valeur de 1.23, le ratio ($T_{\text{CBN}}/T_{\text{670}}$) augmente encore plus pour donner une valeur de 5.25 et en fin le ratio ($T_{\text{CBN}}/T_{\text{GC4005}}$) est à son maximum en prenant la valeur 21. Cette comparaison des ratios des tenues confirme la supériorité de l'outil CBN vis à vis des céramiques et du carbure métallique lors de l'usinage des pièces trempées, ceci est confirmé par les études réalisées par [LUO 99], [YAL 05]. Ces résultats prouvent que le CBN est le matériau le plus performant que les autres nuances utilisées en termes de résistance à l'usure.

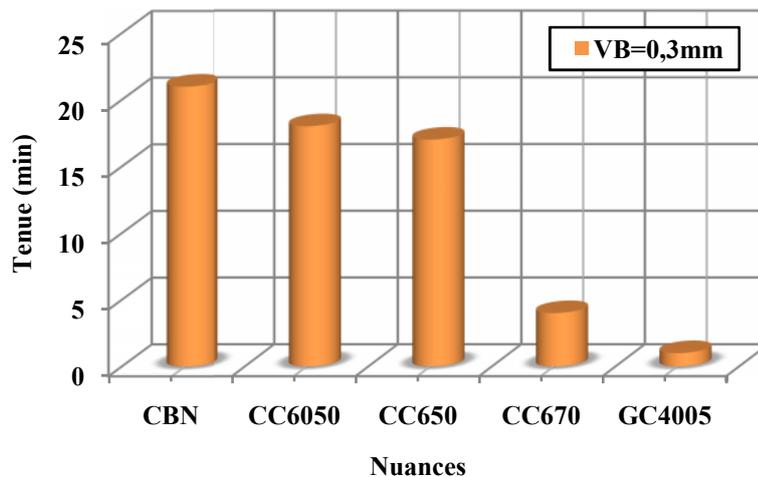


Figure III.3 : Durée de vie des outils de coupe utilisés pour une usure $[VB]=0.3$ mm

La comparaison entre les différents matériaux de coupe en termes de productivité exprimée en volume du copeau enlevé est illustrée dans la figure (III.4). L'analyse des résultats montre que le volume du copeau enlevé pour les cinq nuances de coupe est comme suit : 184.8 cm^3 pour le CBN ; 158.4 cm^3 pour la céramique CC6050; 14.6 cm^3 pour la céramique mixte CC650; 35.2 cm^3 pour la céramique composite CC670 ; 8.8 cm^3 pour le carbure GC4005. On remarque que le CBN conduit à un meilleur rendement tandis que le carbure GC4005 produit un volume minimal.

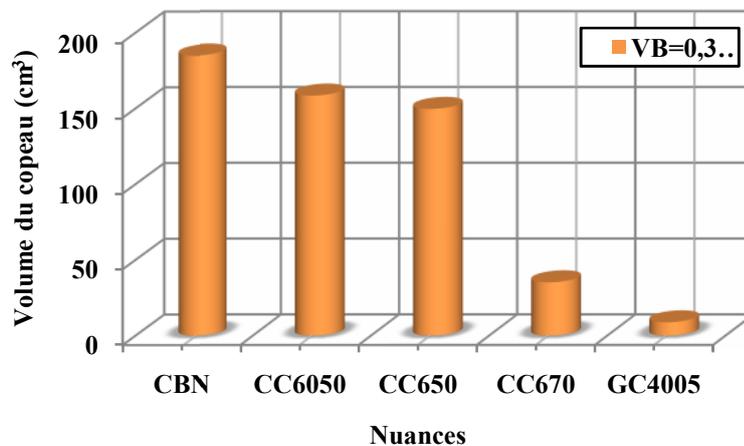
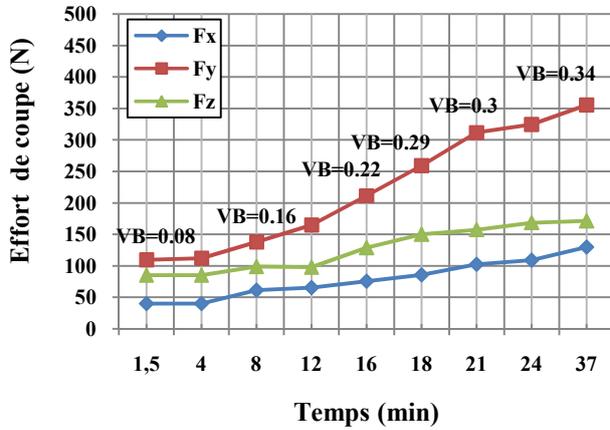


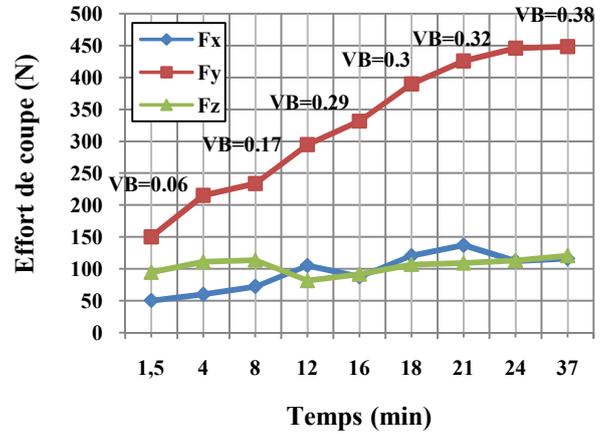
Figure III.4 : Comparaison entre le volume du copeau enlevé par les cinq matériaux de coupe.

a) Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure

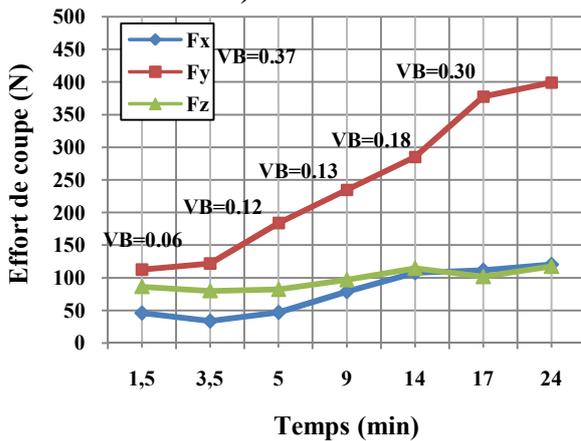
La figure III.5 (a, b, c, d, e) présente l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps de coupe pour les cinq matériaux de coupe.



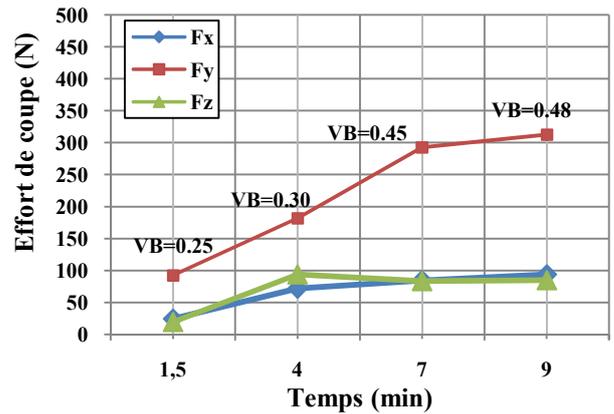
a) CBN 7020



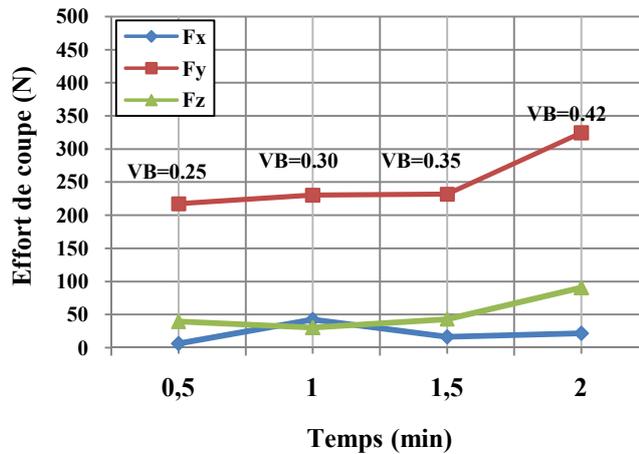
b) CC6050



c) CC650



d) CC670



e) GC4005

Figure III.5: Evolution des efforts de coupe en fonction du temps à $V_c=110m/min$; $f=0.08mm/tr$; $a_p=0.2mm$ pour : a) CBN ; b) CC6050 ; c) CC650 ; d) CC670 ; e) GC4005.

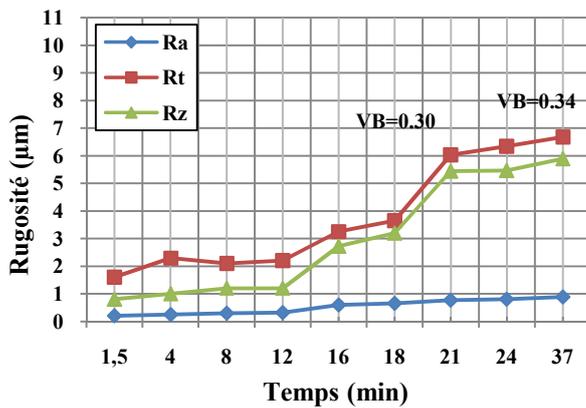
Il en ressort que les composantes de l'effort de coupe augmentent en fonction du temps d'usinage pour les cinq matériaux testés. Ceci est une conséquence de l'évolution de l'usure sur les surfaces en dépouille et d'attaque des outils, puisque dans ce cas, la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente aussi bien que les forces de frottement et, par conséquent, les trois composantes de l'effort de coupe. L'analyse des résultats de la figure (III.5a) montre que pour un temps d'usinage qui varie de 1.5 à 21 minutes, l'usure de l'outil CBN varie de 0.08 à 0.3mm et, par conséquent, les trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z) augmentent aussi successivement aux valeurs de 102.39N pour F_x ; de 312.36N pour F_y et de 157.32N pour F_z ce qui indique une augmentation des trois composantes de 66.48%; 126.44% et 62.78%. Pour la céramique CC6050 (figure III.5b), l'augmentation du temps d'usinage de 1.5 à 18 minutes provoque une augmentation de l'usure VB de 0.06 à 0.3mm. Cette dernière entraîne une augmentation des trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z) respectivement de 139.90%; 159.68% et 13.16%. À la fin de l'usinage et après 37 minutes, les efforts de coupe atteignent les valeurs de (116.03 ; 448.21 et 120.53) N. L'évolution des efforts de coupe pour la céramique CC650 (figure III.5c) augmente autant bien qu'avec le temps d'usinage et de l'usure. Pour une valeur admissible de l'usure VB=0.3mm, on enregistre des efforts de coupe de 111.44N pour F_x ; 377.64N pour F_y et 101.44N pour F_z . Les sollicitations thermomécaniques sur la pointe de l'outil sont élevées, ce qui a pour effet d'accélérer l'usure. Pour la céramique CC670 (figure III.5d) et après 1.5 minutes d'usinage, l'usure VB atteint la valeur de 0.25mm et pour obtenir des efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) de l'ordre de (24.41 ; 92.42 et 19.4) N. A la fin de l'usinage et après 9 minutes de travail, l'usure VB atteint 0.48mm, suivie d'une augmentation des efforts de coupe par rapport à la première minutes d'usinage de 283.61%; 238.34%; 337.57%. Pour le carbure GC 4005 l'outil s'use rapidement à cause des frottements intenses et des températures élevées, ce qui augmente les efforts de coupe (figure III.5e). Après 0.5 minutes de travail, l'usure atteint la valeur 0.25mm, faisant enregistrer des efforts (F_x , F_y , F_z) de 6.41 ; 217.72 et 39.58 N, après 2 min d'usinage, les composantes de l'effort de coupe atteignent les valeurs (21.99 ; 324.53 ; 90.81) N.

b) Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure

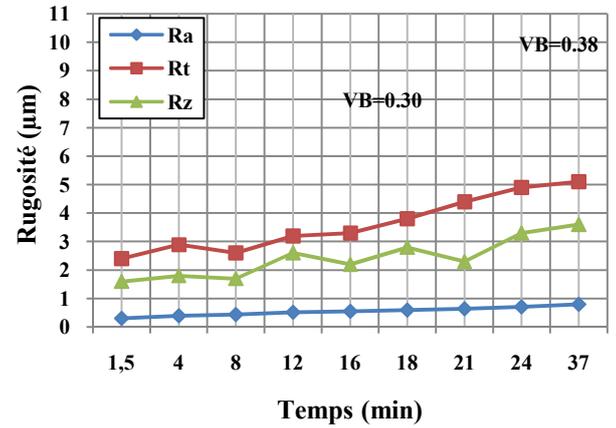
Les figures III.6 (a, b, c, d, e) présentent l'évolution des trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction de temps d'usinage pour les outils suivants: (a) CBN 7020, (b) CC6050, (c) CC650, (d) CC670 et (e) GC4005 à $f=0.08mm/tr$; $ap=0.2mm$ et $Vc=110m/min$. On remarque que toutes les courbes prennent une allure ascendante ce qui signifie que le temps d'usinage a un effet important sur la rugosité. Les courbes des trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction du temps d'usinage pour le CBN sont exposées dans la figure (III.6a). Pour un temps d'usinage variant de 1.5 à 37 minutes, les critères de rugosité (R_a , R_t , R_z) passent de (0.2; 1.6 et 0.8) μm à (0.88; 6.86 et 5.89) μm , soit une variation qui correspond à une augmentation de (340; 317.5 et 636.25) %. La figure (III.6b) montre l'effet du temps d'usinage sur les critères de rugosité pour la céramique composite CC6050 dans les mêmes conditions de coupe. Il s'avère que pour un temps d'usinage de 8 min de travail l'usure atteint la valeur 0.17mm, les critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) prennent directement les valeurs de (0.44; 2.6 et 1.7) μm . Alors que pour la céramique mixte CC650 (figure III.8c), les critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) sont successivement de (0.22; 1.5; 1) μm à un temps d'usinage de 1.5 min. La céramique composite CC670 (figure III.6d) à l'usure admissible [VB]=0.3mm et après un temps d'usinage $t=4min$, les trois critères de rugosité (R_a , R_t , R_z) atteignent respectivement les valeurs de (0.41; 2.8; 2.1) μm . A la fin de l'usinage, les critères de rugosité augmentent jusqu'à les valeurs de 2.4 μm pour R_a , de

10.4 μm pour Rt et de 9.2 μm pour Rz. Les rugosités mesurées lors du chariotage par le carbure revêtu GC4005 pour les mêmes conditions de coupe sont illustrées dans la figure (III.6e). Pour un temps d'usinage de 2min, les trois critères de rugosité (Ra, Rt et Rz) prennent les valeurs de (1.23; 6 et 4.8) μm respectivement.

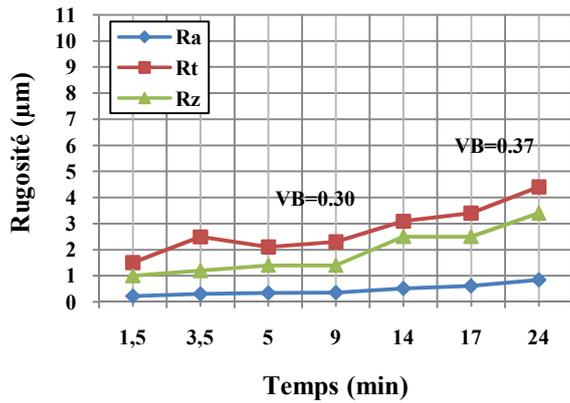
L'analyse des résultats de la figure III.6 montre que la rugosité Ra pour les trois matériaux de coupe (CBN, céramiques CC6050 et CC650) ne dépasse pas le 1 μm et cela au-delà de l'usure admissible [VB]=0.3mm (fin d'usinage).



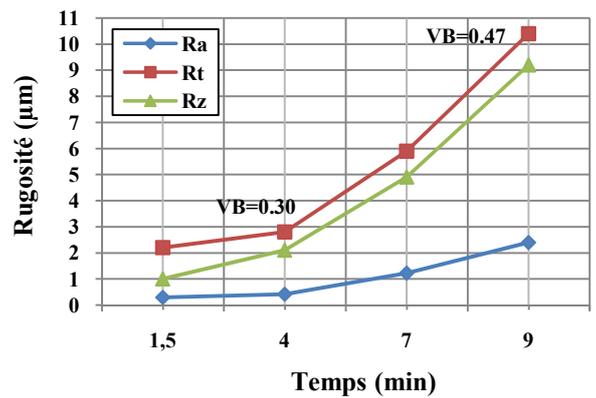
a) CBN 7020



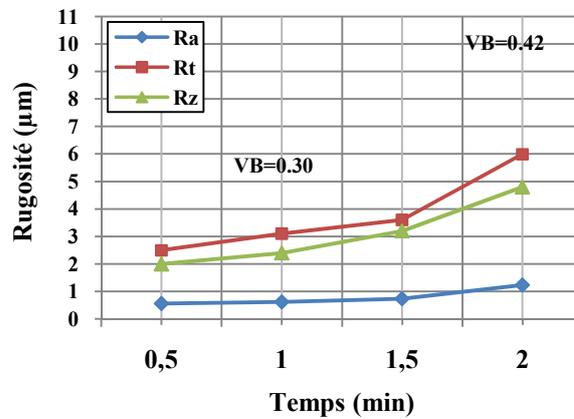
b) CC6050



c) CC650



d) CC670



e) GC4005

Figure III.6: Evolution de la rugosité en fonction du temps à $V_c=110\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.2\text{mm}$ pour : a) CBN ; b) CC6050 ; c) CC650 ; d) CC670 ; e) GC4005.

III.2.2 Performances des matériaux de coupe à $V_c=200\text{m/min}$

Pour pouvoir évaluer les performances en termes d'usure, lors de l'usinage à sec de l'acier AISI D3 traité à 60HRC par les cinq (05) matériaux de coupe, nous avons jugé utile de réaliser un autre essai d'usure à grande vitesse de coupe avec les conditions de coupe suivantes : $f= 0,08\text{mm/tr}$; $a_p=0,2\text{mm}$; $V_c= 200\text{m/min}$ et $t= 130\text{ secondes}$. La figure (III.7) met en évidence l'évolution de l'usure VB, VB max et VC en fonction du temps de coupe. L'analyse de cette figure montre que le CBN présente une bonne résistance à l'usure par rapport aux autres nuances de coupe. D'après cette comparaison, on peut dire que le CBN est le matériau le plus adapté pour l'usinage de l'acier AISI D3 en termes d'usure à $V_c=200\text{m/min}$. La comparaison des ratios de l'usure VB des cinq matériaux de coupe, nous montre que le ratio ($\text{VB}_{\text{CC6050}}/\text{VB}_{\text{CBN}}$) est de 1.38, le ratio ($\text{VB}_{\text{CC650}}/\text{VB}_{\text{CBN}}$) décroît pour donner la valeur de 1.23, par contre le ratio ($\text{VB}_{\text{CC670}}/\text{VB}_{\text{CBN}}$) augmente et prend la valeur 1.84, en dernier lieu le ratio ($\text{VB}_{\text{GC4005}}/\text{VB}_{\text{CBN}}$) s'envole à une valeur maximale de 3.69.

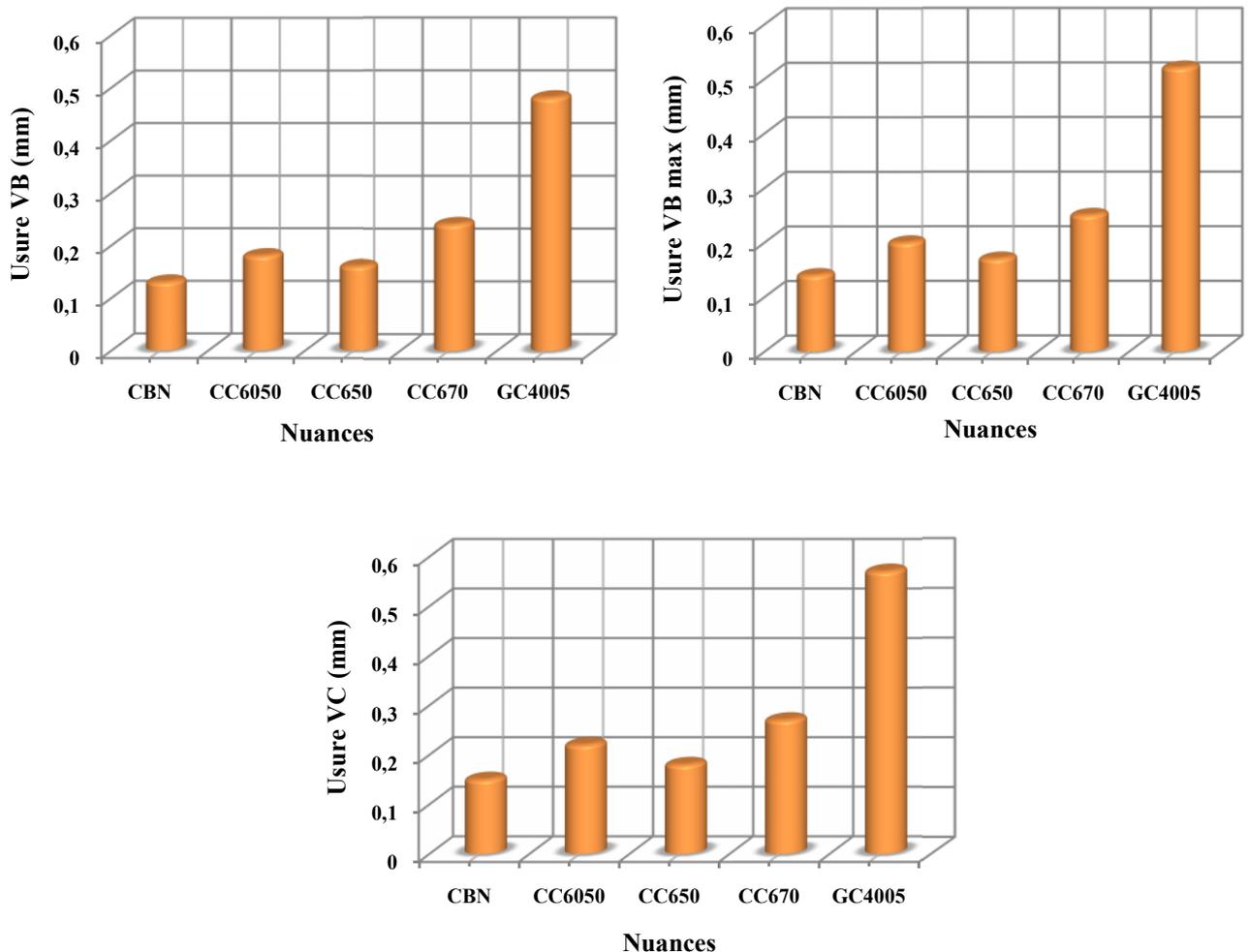
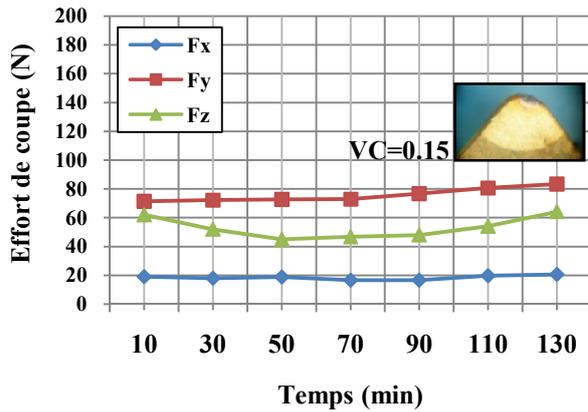


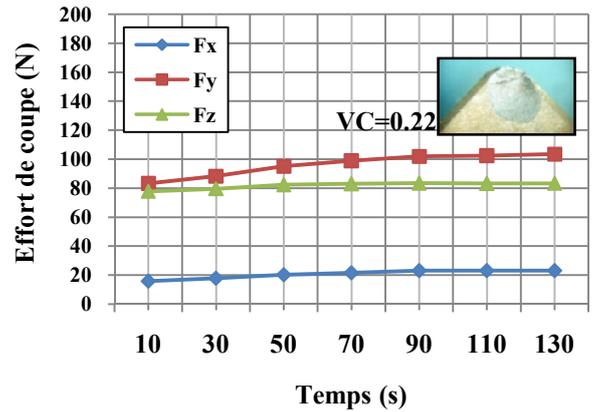
Figure III.7 : Comparaison entre l'usure des différents matériaux à $V_c=200\text{m/min}$, $t=130\text{s}$.

a) Evolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure

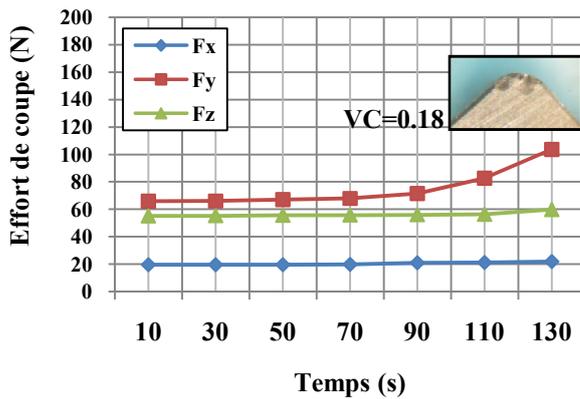
La figure III.8 (a, b, c, d, e) illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage lors de l'usinage de l'acier AISI D3 avec les cinq matériaux de coupe : (a) CBN 7020, (b) CC6050, (c) CC650, (d) CC670 et (e) GC4005 à $V_c=200m/min$, $f=0.08mm/tr$, $ap=0.2mm$ et un temps d'usinage $t=130$ secondes.



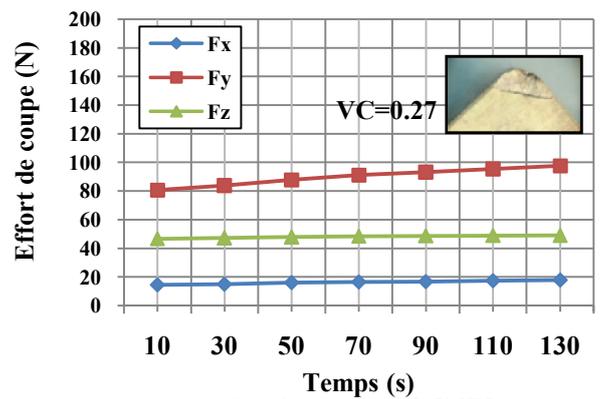
a) CBN 7020



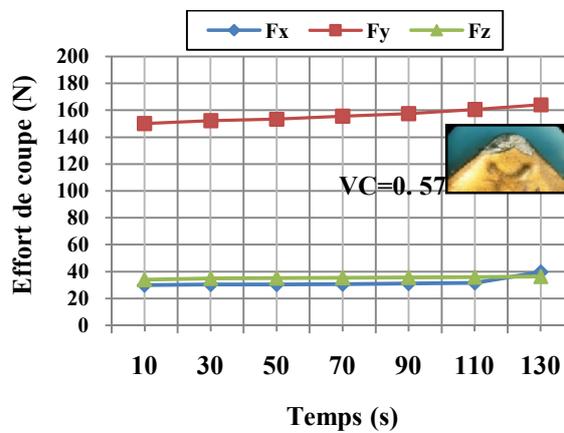
b) céramique CC6050



c) céramique CC650



d) céramique CC670



e) carbure GC4005

Figure III.8 : Evolution des efforts de coupe en fonction du temps pour les cinq nuances de coupe à $V_c=200m/min$, $f=0.08mm/tr$, $ap=0.2mm$ et $t=130s$.

L'analyse des résultats montre que l'augmentation du temps d'usinage conduit à une augmentation des trois composantes de l'effort de coupe pour toutes les nuances de coupe testées, ceci est dû à l'évolution de l'usure VC sur l'arête de coupe de l'outil. En examinant l'allure des courbes on remarque que dans l'intervalle du temps de 10 à 130 secondes, les composantes (F_x , F_y , F_z) augmentent respectivement de (8.87 ; 16.90 ; 23.36)% pour le CBN, de (47.05 ; 24.42 ; 6.78) % pour CC6050, de (12.15 ; 57.05 ; 8.46) % pour CC650, de (23.86 ; 20.89 ; 4.87) % pour CC670 et de (31.98 ; 9.41 ; 7.23) % pour GC4005. A la fin d'usinage la valeur maximale de l'usure VC enregistrée est de 0.15mm pour le CBN, 0.22mm pour CC6050, 0.18 pour CC650, 0.27mm pour CC670 et 0.57mm pour GC4005. Sur la figure aussi sont représentées les micrographies de l'usure sur la face d'attaque de chaque matériau de coupe à la fin de l'usinage.

Sur la figure (III.9) sont représentés les résultats des trois composantes de l'effort de coupe à la fin de l'usinage. L'analyse des résultats montre clairement que l'usinage avec le CBN donne un effort radial faible par rapport aux autres matériaux.

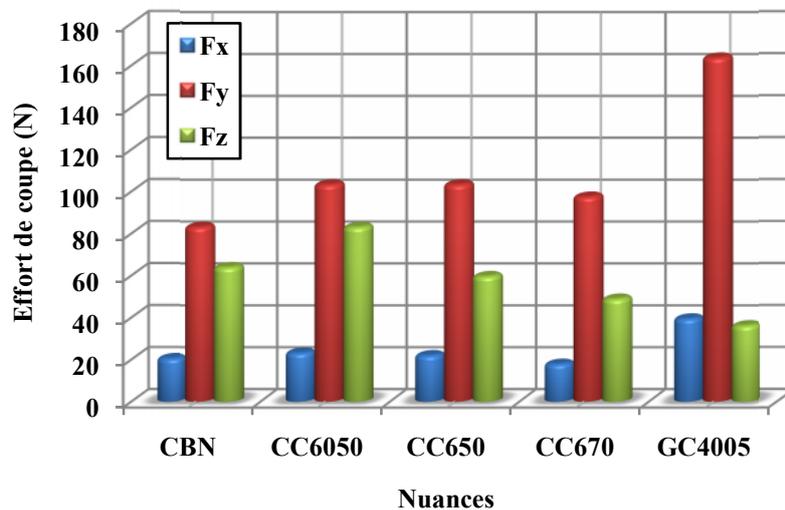
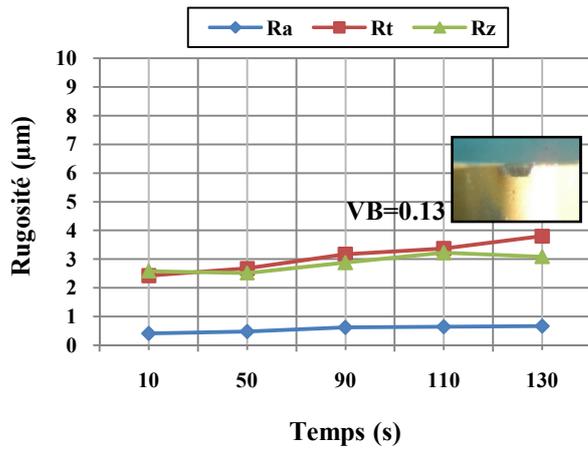


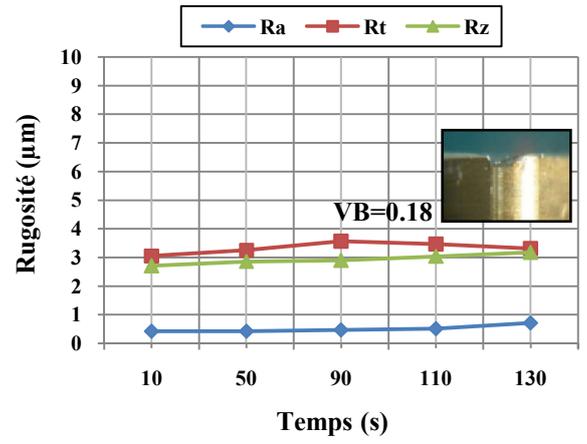
Figure III.9 : Comparaison entre les efforts de coupe enregistrés pour les cinq nuances à $V_c=200m/min$, $f=0.08mm/tr$; $a_p 0.2mm$ et $t=130s$.

b) Evolution de la rugosité en fonction du temps et de l'usure

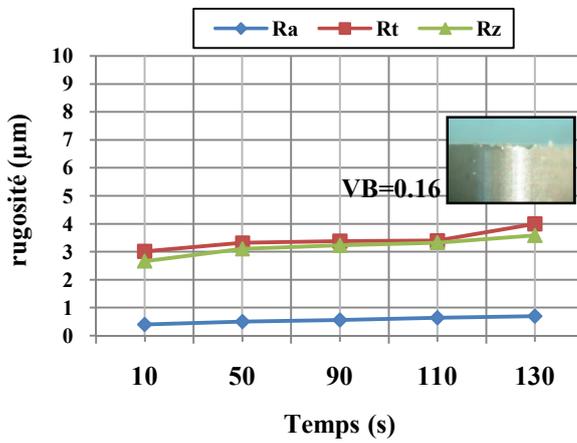
La figure III.10 (a, b, c, d, e) présente l'évolution des trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction du temps d'usinage pour les outils suivants: (a) CBN 7020, (b) CC6050, (c) CC650, (d) CC670 et (e) GC4005 à $f=0.08mm/tr$; $a_p=0.2mm$ et $V_c=200m/min$ et un temps d'usinage $t=130s$. L'analyse des résultats montre que la valeur pour les critères (R_a , R_t , R_z) n'est pas stable et uniforme pendant la coupe, mais elle subit une évolution en fonction du temps d'usinage. Ce dernier est étroitement lié avec l'usure. Alors on peut dire que l'endommagement superficiel des facettes et des arêtes tranchantes de la partie active de l'outil conduit à la dégradation de l'état de surface du matériau usiné. Les conséquences sur le plan pratique est comme suit : pour une élévation du temps de travail de 10 à 130 secondes (2,16 min), on a une augmentation des trois critères de la rugosité (R_a , R_t , R_z) successivement de (59.52 ; 56.79 ; 19.30) % pour le CBN, de (65.11 ; 8.16 ; 17.34) % pour la céramique revêtue CC6050, de (75 ; 32.45 ; 34.45) % pour la céramique mixte CC650, de (84.44 ; 66.01 ; 65.85) % pour la céramique composite CC670 et de (105.33 ; 47.02 ; 63.11) % pour le carbure GC4005.



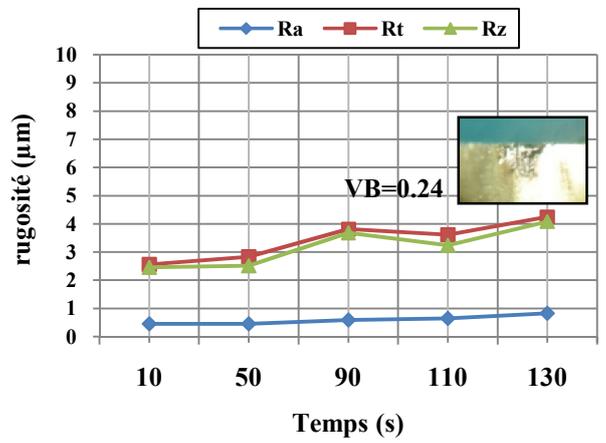
a) CBN 7020



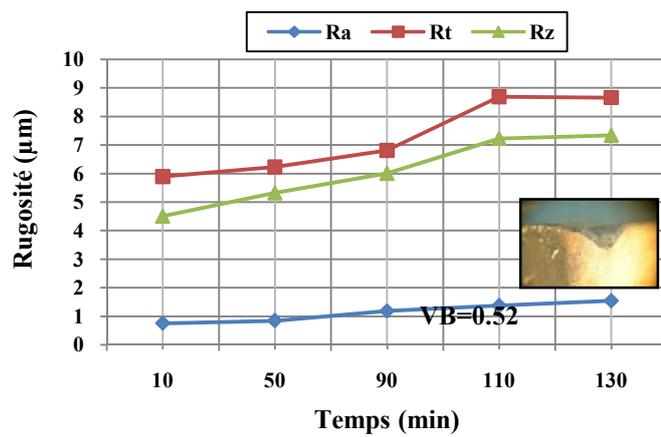
b) céramique CC6050



c) céramique CC650



d) céramique CC670



e) carbure GC4005

Figure III.10 : Evolution de la rugosité en fonction du temps pour les cinq nuances de coupe à $V_c=200\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$ et $t=130\text{s}$.

La figure (III.11) montre une comparaison entre les trois critères de la rugosité de surface pour les cinq matériaux de coupe testés pour un temps d'usinage de 130s. l'analyse des résultats montre que le CBN donne des rugosités de surface minimales par rapport aux autres matériaux.

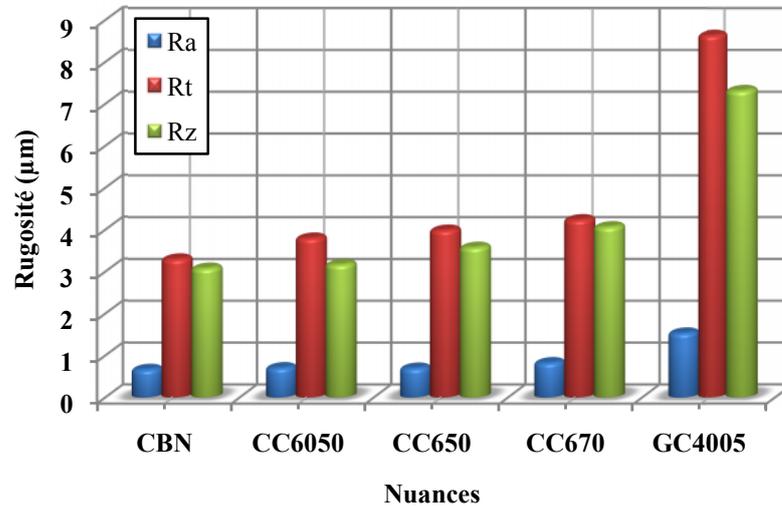


Figure III.11 : Comparaison entre les rugosités de surface mesurées par les cinq nuances à $V_c=200m/min, f=0.08mm/tr ; a_p 0.2mm$ et $t=130s$.

III.3 Conclusion partielle

D'après cette étude comparative entre les différents matériaux de coupe pour deux vitesses de coupe, il ressort que l'outil CBN présente des performances supérieures à celle des autres matériaux testés, en termes d'usure, productivité, tenue, effort de coupe et rugosité de surface. Par conséquent, les résultats qui vont suivre, seront focalisés sur l'outil CBN et une analyse profonde des différents résultats sur le comportement de ce matériau de coupe moderne sera réalisée.

III.4 Évolution de l'usure du CBN en fonction des conditions de coupe

Dans ce point nous allons focaliser notre étude sur le nitrure de bore cubique puisque c'est le matériau le plus performant en termes d'usure par rapport au x (04) quatre autres matériaux testés. Les figures (III.12) et (III.13) illustrent l'évolution de l'usure en dépouille et en cratère du CBN en fonction du temps. Les conditions de coupe utilisées sont les suivantes : $V_{c1}=85m/min ; V_{c2}=115m/min ; V_{c3}=150m/min ; V_{c4}=180m/min ; V_{c5}=240m/min ; V_{c6}=310m/min, f_1=0.08mm/tr ; f_2 =0.14mm/tr$ et $a_p 0.5mm$ [BOU 06]. L'analyse des résultats des figures (III.12) et (III.13), montre que la vitesse de coupe a une influence capitale sur l'usure. En effet avec l'augmentation de cette dernière, l'usure s'accroît d'une façon remarquable à partir de 115m/min. Cet accroissement de l'usure peut réduire considérablement l'étendue de la zone d'usure normale. Ceci est justifié par les essais réalisés avec les vitesses de coupe élevées. En effet à la vitesse de 85 m/min, la zone de l'usure normale s'étend sur une durée 35min, alors que pour l'essai à $V_c = 150m/min$, elle est d'une durée de 15 min. Enfin pour la vitesse de 310 m/min la zone d'usure normale est presque inexistante. Concernant les courbes de la figure (III.13), l'allure de l'usure en

cratère KT est relativement faible par rapport à celle de l'usure VB, à cet effet l'usure en dépouille est considérée comme le critère principal de la durée de vie de l'outil. La droite $[VB] = 0.3\text{mm}$ correspond à la valeur de l'usure admissible, à partir de l'intersection de cette droite avec les courbes d'usure, on peut déterminer les tenues de l'outil CBN pour chaque vitesse de coupe.

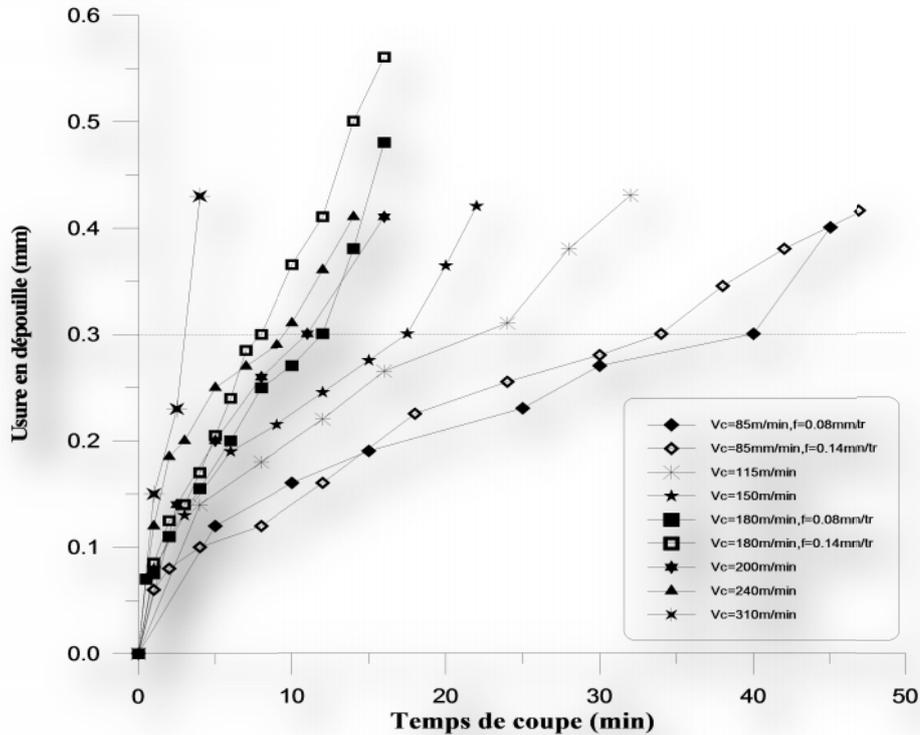


Figure III.12 : Usure en dépouille (VB) en fonction du temps de coupe.

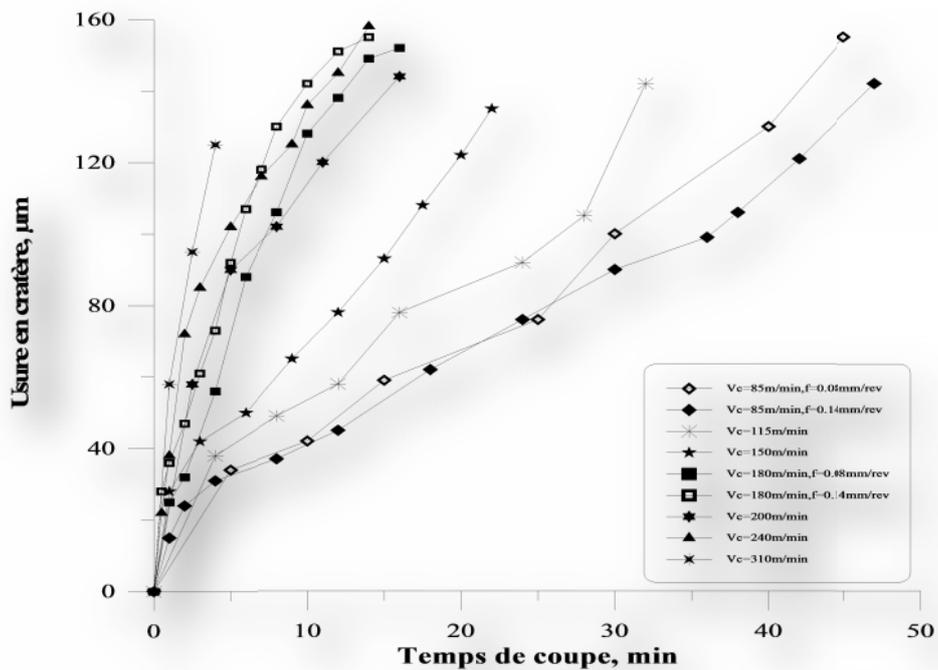


Figure III.13 : Usure en cratère (KT) en fonction du temps de coupe.

III.4.1- Observations microscopiques de la morphologie de l'usure

Pour pouvoir visualiser l'évolution de l'usure cratère et en dépouille de l'outil CBN, une série des photos microscopique a été réalisé [BOU 06].

- A la vitesse de coupe $V_c=85\text{m/min}$ et une avance $f=0.08\text{mm/tr}$, l'usinage se fait sans difficulté. L'usure sur la surface en dépouille est régulière et elle se manifeste au début par l'apparition d'une bande striée et brillante, parallèle à l'arête de coupe. Avec l'augmentation du temps d'usinage, la valeur de VB augmente. Le copeau est fragmenté en remarquant une stabilité du système usinant. L'usure en cratère se manifeste par une petite cuvette sur la surface d'attaque dès les premières minutes d'usinage et elle s'élargie avec le temps. A la vitesse 85m/min , on ne remarque pas d'écaillage sur l'outil (annexe I. a). Pour $V_c=85\text{m/min}$ et $f=0.14\text{mm/tr}$ l'usure VB se manifeste toujours par une bande striée sur la surface en dépouille ($t=2\text{min}$). Au fur et à mesure que l'outil coupe, le cratère s'élargit en longueur et en largeur ainsi qu'en profondeur, ce qui fragilise l'arête tranchante. En plus, on remarque un effondrement du bec de l'outil à la fin d'usinage (après 47min de travail). La tenue de l'outil à cette avance est de 34min. Cet effondrement a pour effet l'augmentation de la rugosité de la surface usinée, en influant du coup sur la précision dimensionnelle et en dernier lieu sur la formation du copeau. Les résultats montrent aussi que l'avance a une influence non négligeable sur l'évolution de l'usure car avec l'augmentation de cette dernière, l'usure s'accroît. Cet accroissement de l'usure réduit légèrement l'étendue de la zone d'usure normale pour deux avances différentes et avec la même vitesse de coupe (85 m/min). En effet pour l'avance 0.08 mm/tr , la zone d'usure normale s'étend sur une durée de 40 min, alors que pour l'avance 0.14 mm/tr , elle est de 30 min (annexe I. b).

- A la vitesse de coupe $V_c=115\text{m/min}$, on observe que la forme de l'usure VB reste inchangée présentant toujours une bande striée. Après 24min d'usinage la profondeur de l'usure en cratère augmente. Après 32min et à la fin de l'usinage l'usure VB devient irrégulière on remarque un effondrement de l'arête de coupe due à une usure combinée de (VB) et (KT), avec un écaillage sur la surface d'attaque (Annexe I.c).

- Avec l'augmentation de la vitesse de coupe à 150m/min , les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent et conduisent après un temps de 3 min à la formation de petites cannelures sur la surface de dépouille (stries). Celles-ci sont générées suivant le sens de la direction de la vitesse de coupe. A 17.5min d'usinage, l'usure VB évolue et augmente de largeur et devient irrégulière. Notons que l'usure en cratère KT augmente aussi (Annexe I.d). Après 22min de travail, l'usinage devient difficile et le copeau obtenu est de couleur rouge vif. On observe l'apparition des écailles sur la surface d'attaque de l'outil suite aux contraintes élevées générées de processus de coupe. L'évolution rapide de VB et KT conduisent à la fin à l'effondrement du bec de l'outil CBN (Annexe I.d).

- A la vitesse de coupe $V_c=180\text{m/min}$ et une avance $f=0.08\text{mm/tr}$, le revêtement du CBN se détache rapidement à cause de la température et de la vitesse de coupe élevée. La tenue du CBN à cette vitesse est de 12min pour $[VB]=0.3\text{mm}$ avec une rugosité $R_a=0.95\mu\text{m}$. Quand l'avance augmente jusqu'à 0.14mm/tr l'usinage devient encore plus difficile et des micros écaillages apparaissent au cours de l'usinage (Annexe I.e). Un petit effondrement du bec de l'outil apparaît aux premières minutes de travail, au fur et à mesure que l'outil coupe cet effondrement augmente en profondeur. Pour $f=0.14\text{mm/tr}$ la tenue de l'outil est de 8 min

▪

avec une rugosité de $Ra=1.25\mu m$. L'usure en cratère KT évolue a un rythme beaucoup moins accentué que celui de l'usure VB. La valeur de l'usure en cratère admissible $[KT]=0.15mm$ est atteinte à la fin de l'usinage pour la vitesse 180m/min. Cela veut dire, que la vitesse d'accroissement de $[VB]$ et supérieur à celle de $[KT]$, c'est pour cela quelle a été choisie comme critère principal de la durée de vie de l'outil CBN (Annexe I.f).

- A la vitesse de coupe $V_c=200m/min$, l'usinage au début est caractérisé par une stabilité ainsi que par l'absence d'écaillage de la plaquette CBN sur la surface en dépouille et en cratère. Le copeau obtenu est fragmenté de couleur rouge. L'usure en dépouille à 2.5min se manifeste par l'apparition d'une bande régulière. A 11min la valeur de VB augmente la largeur et les dimensions du cratère s'élargissent aussi. A la fin de l'usinage et après 16 min d'usinage, l'usure VB devient irrégulière avec l'apparition d'un petit effondrement sur la pointe de l'outil CBN (Annexe I.j).

- A la vitesse de coupe $V_c=240m/min$, au début du travail, on remarque une bande d'usure régulière sur la surface de dépouille. Après 3 min d'usinage, la température de coupe augmente et les dimensions de l'usure VB et KT s'élargissent. Le travail ultérieur a conduit à un écaillage suivant la surface d'attaque et en dépouille qui a donné lieu à la formation d'une poche assez profonde au niveau du bec de l'outil à $t_3=14min$ (Annexe I.k).

- A la vitesse de coupe $V_c=310m/min$ et après 2.5min du début de l'usinage, on observe que le chanfrein de la plaquette subit une usure accentuée provoquée par l'élévation de la température et on remarque aussi un écaillage sur la surface d'attaque. Après 4min, on remarque un petit effondrement du bec de l'outil. La fin de l'usinage est marquée par un écaillage sur la surface d'attaque, qui s'élargit dans la direction de la diagonale de la plaquette. A cette vitesse aussi, on remarque sur le flanc de l'outil et à la hauteur de l'usure VB des sillons (cannelures), résultat d'une haute usure abrasive (Annexe I.l).

III.4.2 Mécanismes d'usure

Durant les essais d'usure de longue durée réalisée par l'outil CBN sur l'acier AISI D3, nous avons observé des petites cannelures sur la surface en dépouille de l'outil formées dans le même sens de la direction de la vitesse de coupe. Ces dernières semblent être le résultat d'une haute usure abrasive. Les cannelures sur la surface de dépouille apparaissent au début de l'usinage et elles ne disparaissent jamais. La profondeur de ces cannelures est constante. Elle n'est pas en fonction de l'usure en dépouille par contre elles s'élargissent comme montre la figure (III.14).

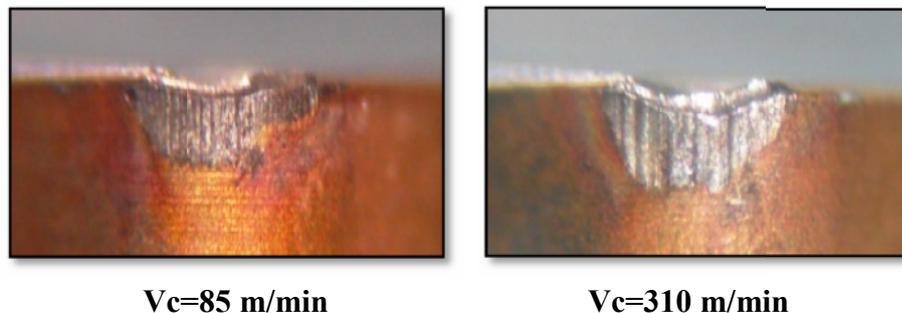


Figure III.14 : Cannelures formées sur la surface en dépouille de l'outil

Ce phénomène a été observé par d'autres chercheurs :

En usinant l'acier fortement allié X155CrMoV12 avec le CBN, Poulachon [POU 03] a remarqué l'apparition de quelques cannelures sur la surface de dépouille d'outil à l'aide d'un microscope électronique. La fréquence de ces cannelures le long de l'arrête de coupe est mesurable. Il a observé deux type de cannelures : le premier type sont de cannelures large d'une dimension moyenne de $10\mu\text{m}$, le deuxième type sont des cannelures étroite d'une dimension moyenne de $1\mu\text{m}$. Il a aussi observé que le phénomène n'est pas local mais généralisé. Il a deux différentes origines comme le montre la figure (III.15a).

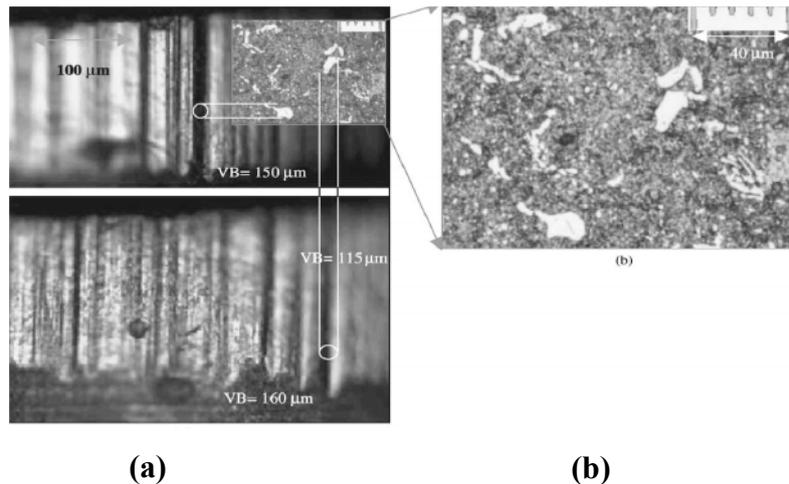


Figure III.15: Micrographie de l'usure de l'acier X155CrMoV12 durcis à 50HRC avec $V_c=180\text{ m/min}$; $f=0.08\text{ m/min}$ [POU 03].
a) usure en dépouille, b) microstructure de la pièce.

La figure (III.15b) montre la structure de l'acier X155CrMoV12, dont les grands faisceaux (taches) blancs sont des carbures primaires M_7C_3 avec une dimension moyenne de $15\mu\text{m}$. Les grandes cannelures se trouvent proches des faisceaux de carbure de grande dimension, bien que les petites cannelures semblent être creusées près des petits faisceaux de carbure qui sont dix fois plus petits que les grands faisceaux. Ce sont des carbures secondaires M_7C_3 qui apparaissent durant le revenu. À ce stage de l'étude, la seule chose qui peut être affirmée est que les grandes cannelures sont formées près des grands faisceaux du carbure M_7C_3 [POU 03].

Dans notre cas nous avons réalisé des photos en microscope optique (avec un agrandissement 1000 fois) sur un échantillon de l'acier AISI D3 traité à 60 HRC, après le traitement de la surface de l'échantillon (polissage à plusieurs niveaux). L'observation microscopique de la structure (figure III.16) montre la présence de carbure formé après traitement thermique à différentes tailles, similaires à ceux trouvées par [POU 03] lors de l'usinage de l'acier AISI D2. Ces carbures formés après les traitements thermiques sont responsables des cannelures trouvés sur la surface en dépouille de l'outil CBN.

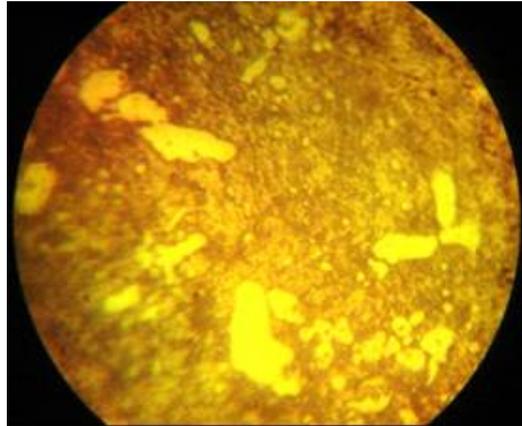


Figure III.16: Microstructure de l'acier AISI D3.

De la même manière, Luo [LUO 97] a observé quelques cannelures avec des traces abrasives sur la surface de dépouille de l'outil à l'aide d'un microscope électronique, après le tournage de l'acier 35CrNiMo6 durcie à 55HRC pendant 5 minutes d'usinage. C'est le cas typique d'une usure abrasive. L'origine de ces cannelures d'après [LUO 97] est attribué à l'endommagement de l'agglomérant de l'outil par les particules dures de carbure de la pièce, ce qui mène au détachement des grains de CBN.

La figure (III.17) montre l'usure en dépouille et en cratère de l'outil en CBN 7020 observé par un microscope à balayage électronique (MEB) lors de l'usinage de l'acier AISI D3 aux conditions de coupe suivantes : $V_c=115\text{m/min}$; $f=0,08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.5\text{mm}$, après 32min d'usinage. Les cannelures présentes sur la surface en dépouille de l'outil CBN est la caractéristique du mécanisme d'usure abrasive et l'usure adhésive. Cela est confirmé par l'analyse par rayon X (EDS) (figure III.18). La présence du fer (Fe) et du chrome (Cr) dans le matériau de l'outil CBN est la preuve de l'usure adhésive.

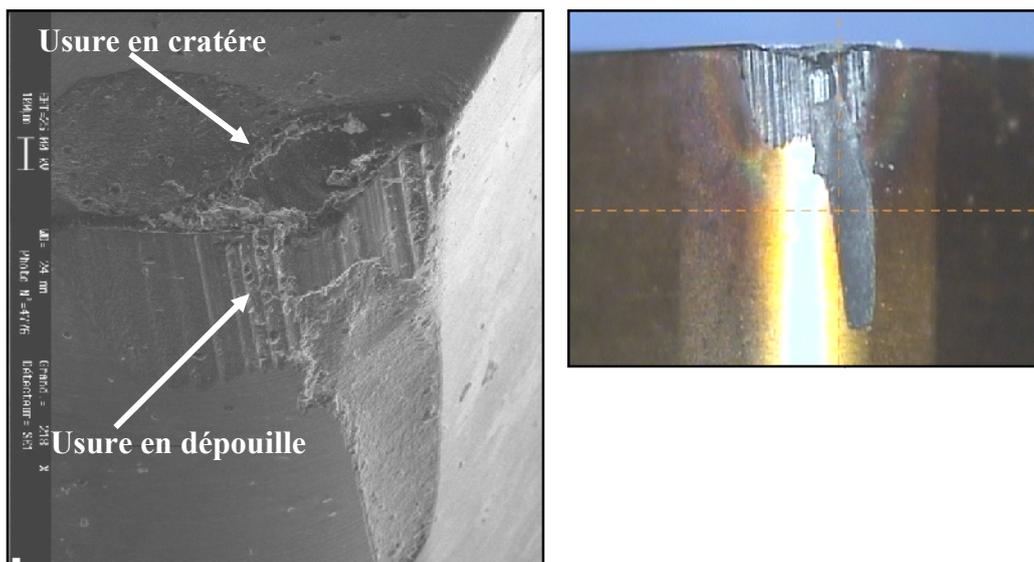


Figure III.17: Photo par MEB de l'usure en de dépouille et en cratère d'un outil de coupe en CBN.

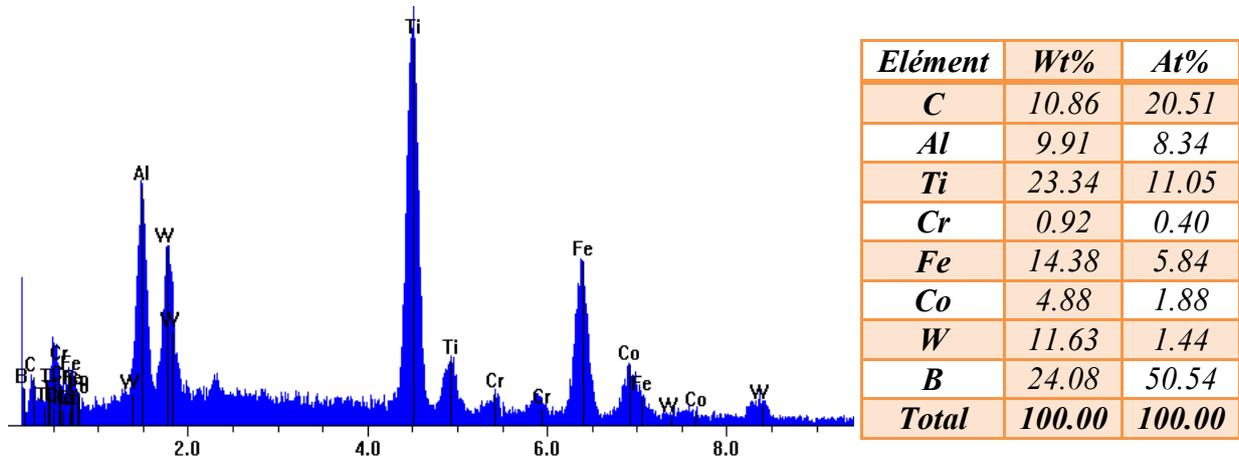


Figure III.18: Exemple de l'analyse par rayon X sur la surface de dépouille d'un outil de coupe en CBN.

Pour confirmer nos remarques, nous avons effectué deux analyses par rayon X sur une plaquette CBN. La première analyse est effectuée sur la surface du revêtement au point (A) (figure III.19), sur lequel le résultat par rayon X montre la présence seulement de Titane (revêtement) (figure III.20). Par contre au point (B) sur la surface d'usure en cratère (figure III.21), l'analyse par Rayon X (figure III.22) montre la présence du fer (Fe) avec un pourcentage de 14,69% ce qui montre la présence du mécanisme d'usure adhésif lors de l'usinage de l'acier AISI D3.

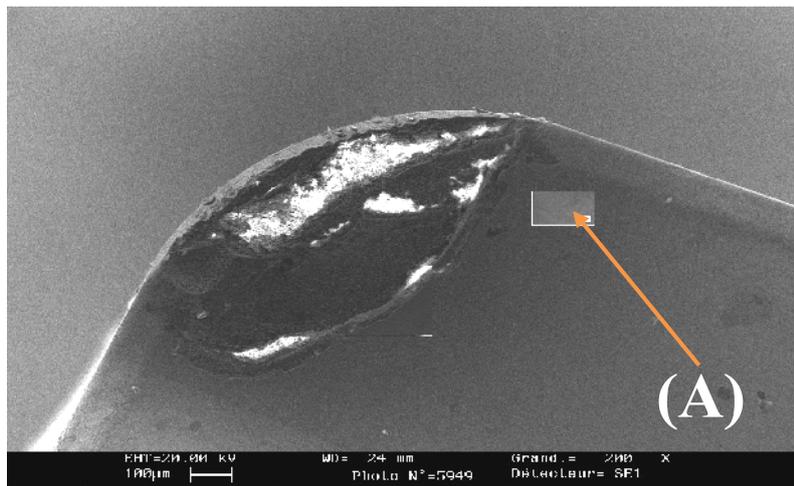


Figure III.19: Photo par MEB du revêtement d'un outil de coupe en CBN.

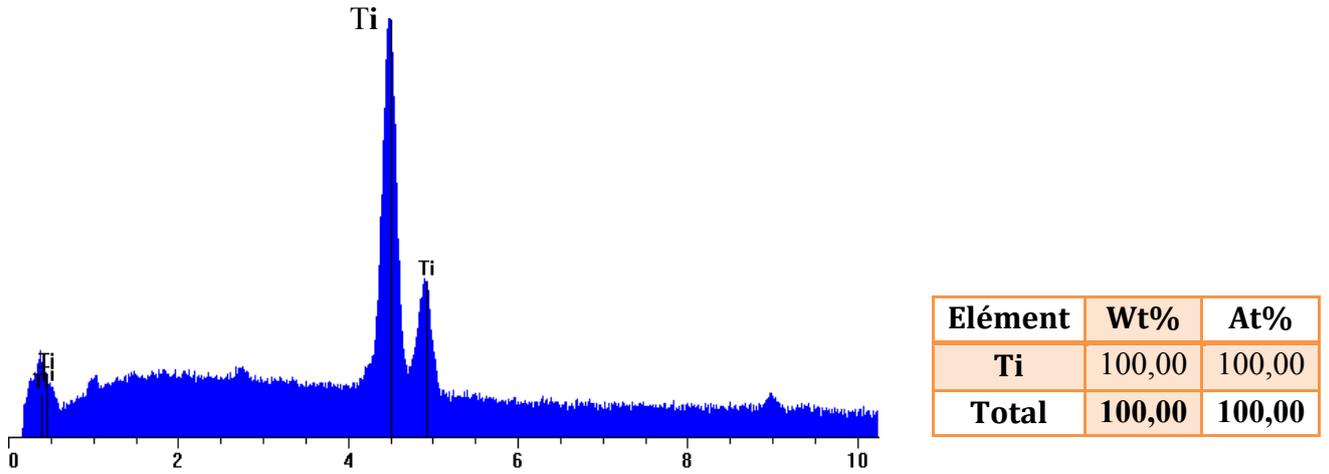


Figure III.20: Analyse par rayon X de la surface revêtue d'un outil de coupe en CBN.

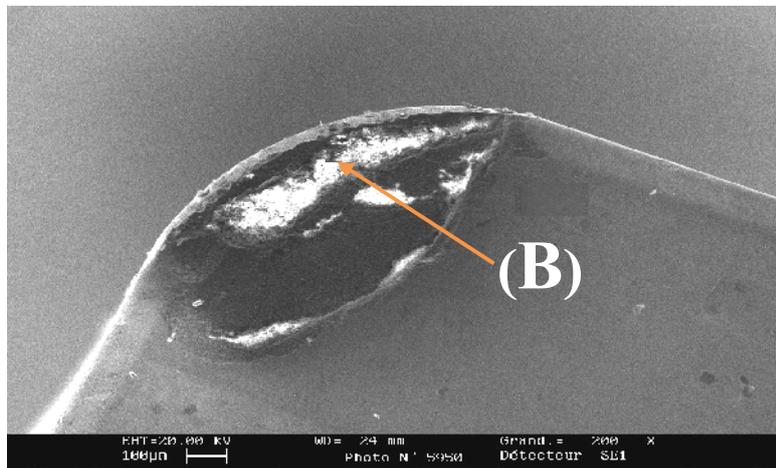


Figure III.21: Photo par MEB de l'usure en cratère d'un outil de coupe en CBN.

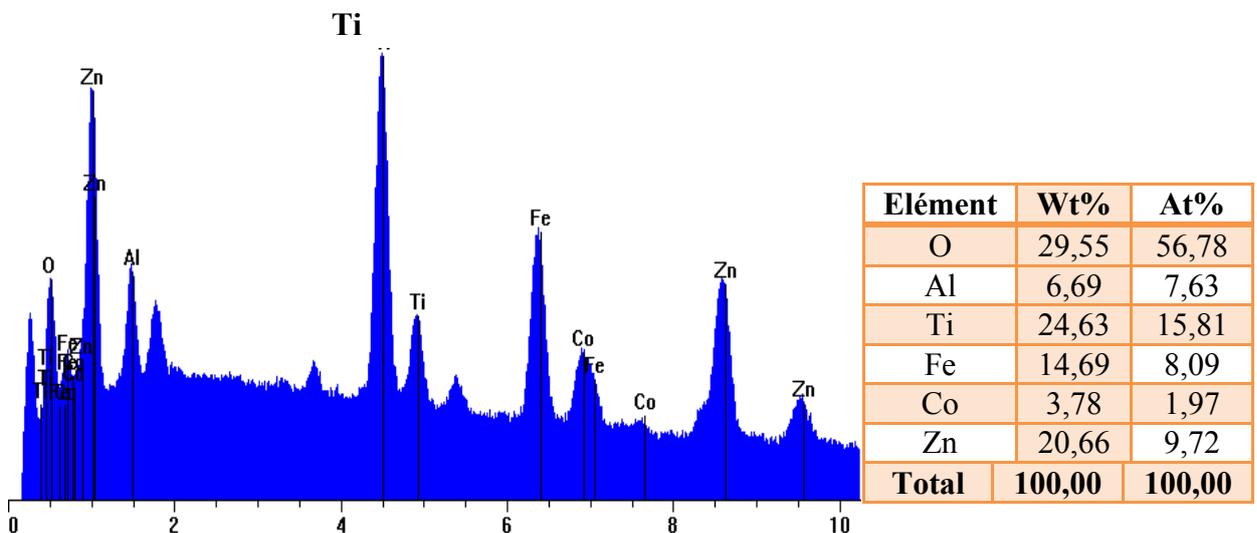


Figure III.22: Analyse par rayon X sur la surface de dépouille d'un outil en CBN.

Ces résultats sont confirmés par d'autres études réalisées par plusieurs chercheurs : Davim et autres [DAV 07] ont fait une analyse par rayon X lors de l'usinage d'AISI D2 avec une plaquette en céramique mixte ($Al_2O_3 + TiC$). Les résultats trouvés montrent la présence du fer (Fe) et du chrome (Cr) sur la face de l'outil en indiquant ainsi la présence de l'usure adhésive (figure III.23)

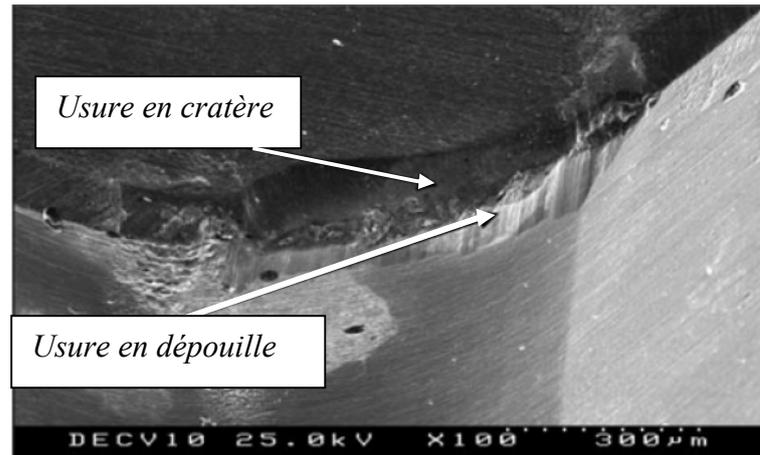


Figure III.23: Photo par MEB de l'usure en cratère et en dépouille d'un outil de coupe pour $V_c=80m/min$; $f=0.10mm/tr$ et $t_c=15min$ [DAV 07].

Gaitonde et d'autres [GAI 09] ont observé des cannelures sur la surface en dépouille de l'outil en céramique à l'aide d'un microscope à balayage électronique (MEB) lors de l'usinage de l'acier AISI D2, avec une profondeur de passe $a_p=0.2mm$ et un temps d'usinage $t=15min$ (figure III.24). Une analyse par rayon X (EDS) (figure III.25) confirme la présence du fer et du chrome (Cr) dans le matériau de l'outil céramique.

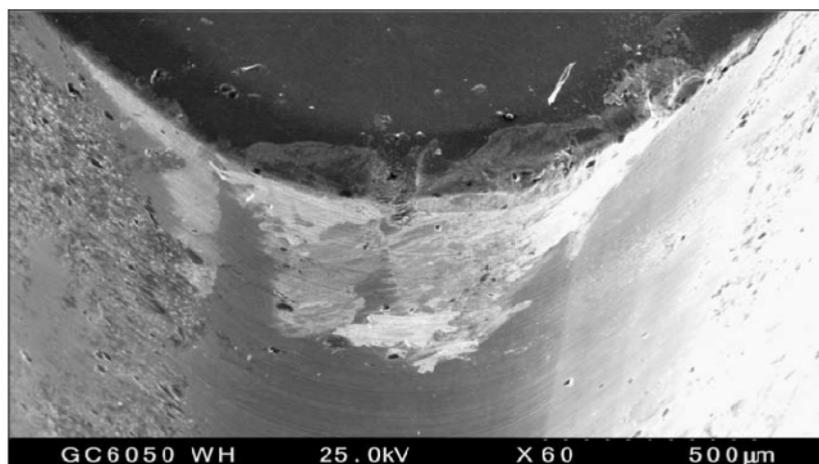


Figure III.24: Photo par (MEB) de l'usure d'un outil en céramique GC6050WH après l'usinage $a_p = 0.2mm$ et $t=15min$ [GAI 09].

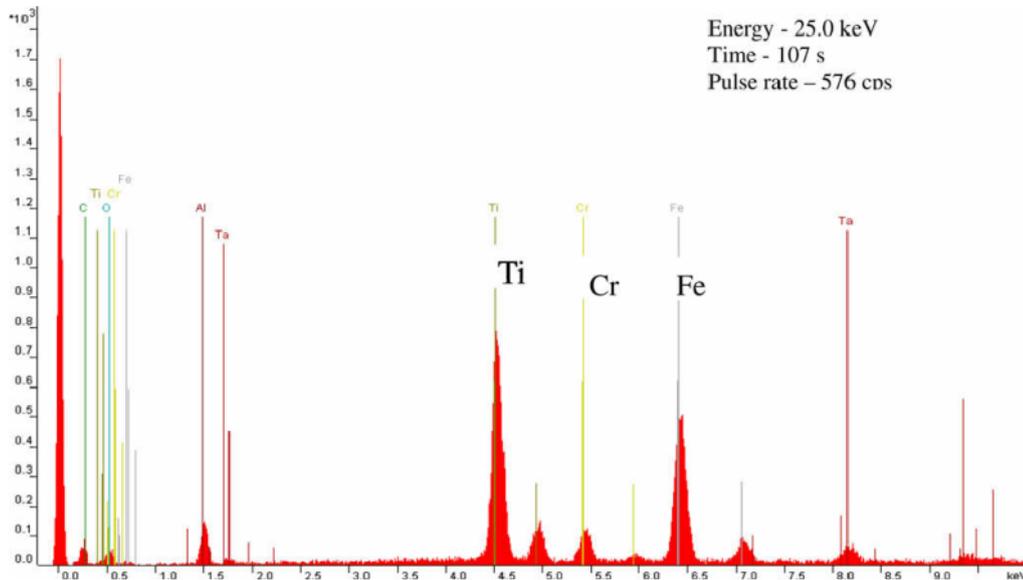


Figure III.25 : Exemple de l'analyse par rayon X sur la surface de dépouille d'un outil de céramique GC6050WH [GAI 09].

Cependant, des études profondes des zones usées prouvent que le phénomène d'usure dû à la diffusion produite avec de grandes vitesses de coupe participe au processus d'usure de la surface d'attaque de l'outil CBN [NAB 01], [ZIM 97] et [CHO 03]. Une fois combinés ces mécanismes d'usure (abrasion, adhérence et diffusion) contribuent à l'accélération du processus d'écaillage des surfaces de l'outil et de la dégradation de l'arête de coupe.

Huang Young [HUA 03] rapporte que durant le tournage dur avec l'outil CBN, l'abrasion, l'adhésion et la diffusion peuvent être généralement considérées comme mécanismes principaux d'usure de l'outil CBN, et que la contribution de chaque mécanisme dépend de la charge mécanique et thermique pendant l'usinage, de la teneur en CBN, de la phase liante, de la stabilité chimique des outils CBN et de la composition des matériaux de la pièce. La bonne compréhension des mécanismes d'usure de l'outil CBN est l'opération indispensable vers une technologie viable de tournage dur.

III.5 Exploitation des résultats de l'usure

Dans ce point nous présentons les résultats de l'impact de l'usure sur la durée de vie de l'outil CBN lors du tournage de l'acier AISI D3 traité à 60 HRC ainsi que la productivité exprimée par la longueur du copeau enlevé.

III.5.1 Impact de l'usure sur la tenue d'outil

La durée de vie (T) d'un outil de coupe est le temps effectif de coupe correspondant au temps d'usinage qui conduit à l'usure limite de l'outil. En général, la tenue d'un outil de coupe est influencée par une série de facteurs notamment la vitesse de coupe.

a) Tenues en fonction de la vitesse de coupe

Le traitement graphique des résultats de l'usure en dépouille (VB) figure (III.12) en fonction du temps pour les différentes vitesses de coupe retenues a permis la détermination des différentes tenues de l'outil CBN. Il est à noter que la tenue (T) a été déterminée en se basant uniquement sur l'usure en dépouille car la vitesse d'accroissement de celle-ci par rapport à celle de l'usure en cratère est nettement plus grande. Les valeurs des tenues trouvées sont résumées dans le tableau (III.1). Ces tenues sont déterminées à partir de deux critères d'usure admissible $[VB] = 0.3 \text{ mm}$ et $[VB] = 0.4 \text{ mm}$.

<i>Vitesse de coupe (m/min)</i>	<i>Usure $[VB]=0.3\text{mm}$</i>	<i>Usure $[VB]=0.4\text{mm}$</i>
85	40	45
115	22	30
150	17	21,2
200	11	14,7
240	9	13
310	3	4

Tableau III.1 : Tenues expérimentales obtenues à différentes vitesses de coupe.

- L'analyse des résultats des tenues du CBN (tableau III.1) montre que pour les vitesses de coupe allant de [85 à 115] m/min et quand le rapport des vitesses est égal à 1.35, la durée de vie de l'outil chute de 45%. On remarque également qu'en travaillant avec les vitesses de coupe appartenant à une plage de vitesses [115 à 150] m/min et que cette dernière varie dans un rapport de 1.30 fois, la durée de vie chute de 23%. Pour les quatre autres plages de vitesses plus élevées [150 à 200], [200 à 240] et [240 à 310] m/min, les vitesses de coupe varient dans les rapports respectifs 1.33, 1.2 et 1.30, les durées de vie correspondantes subissent des réductions de 36 %, 19 %, et 67 %. L'analyse des résultats montre aussi que la durée de vie est très sensible à la variation de la vitesse de coupe. Pour les plages de vitesses plus élevées [240 à 310] m/min, cet effet est encore plus significatif sur la durée de vie, on observe une chute de tenue de 67 %, même si le rapport de vitesse est plus faible 1.3. Cette chute de tenue aux grandes vitesses de coupe s'explique par la présence des températures élevées générées du processus de coupe et qui règnent à la pointe de l'outil, ce qui favorise les différents mécanismes d'usure (abrasion et diffusion) et par conséquent la capacité de coupe de l'outil diminue. Ceci s'explique aussi par le fait que lorsqu'on travaille avec des vitesses de coupe élevées, les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent. Les frottements et les pressions élevées qui s'exerce à l'interface copeau / outil et outil-pièce provoquent l'usure [BOU 97], [HUG 95] et [KON 84].

- Le critère d'usure recommandé par ISO et adopté dans nos expériences est l'usure frontale $[VB]=0.3 \text{ mm}$. Mais lors de la réalisation des essais, nous avons remarqué que lorsque l'outil CBN dépasse la valeur de l'usure admissible $[VB]$ dans l'intervalle [0.3 et 0.4] mm, aucune anomalie d'usinage n'est observé telle que (étincelles, vibrations, états de surface médiocre). Pour cela, on peut dire que, lors des opérations de dégrossissage, les exigences en précision et le fini sont beaucoup plus réduites par rapports à l'usinage de finition, c'est pourquoi, la valeur admissible de l'usure peut être augmentée jusqu'à ce que

l'outil ne perde ses propriétés de coupe. Cela conduit à une tenue de coupe plus grande des plaquettes CBN.

Le tableau (III.2) illustre le gain en tenue lorsqu'on augmente le critère d'usure de $[VB]=0.3$ mm à $[VB]=0.4$ mm.

Vitesse de coupe m/min	Gain %
85	21,5
115	36,36
150	24,7
200	33,63
240	44,44
310	33,33

Tableau III.2 Gain en tenue pour différentes vitesses de coupe.

b) Tenue en fonction de l'avance

Le traitement graphique des résultats de l'usure en dépouille (VB) figure (III.12) en fonction du temps pour deux vitesses à deux avances différentes, a permis la détermination de la tenue du matériau de l'outil testé. Les valeurs des tenues trouvées sont résumées dans le tableau (III.3). Ces tenues sont déterminées à partir de deux critères d'usure admissible $[VB] = 0.3$ mm et $[VB] = 0.4$ mm.

<i>V_c = 85m/min</i>	f = 0.08mm/tr	40	45
	f = 0.14mm/tr	34	42
<i>V_c = 180m/min</i>	f = 0.08mm/tr	12	16
	f = 0.14mm/tr	8	12

Tableau III.3: Tenue de l'outil CBN en fonction de l'avance.

L'analyse des résultats du (tableau III.3), montre que pour la vitesse de 85m/min et quand l'avance augmente de 0.08 à 0.14 mm/tr, la tenue de l'outil CBN chute de 17.64% pour $[VB]= 0.3$ mm. A la vitesse de 180m/min l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.14 mm/tr a pour effet de diminuer la tenue de 50%.

III.5.2 Impact des conditions de coupe sur la productivité

La recherche d'une productivité toujours meilleure est une préoccupation principale dans les différents domaines de l'industrie.

La productivité dans notre cas est exprimée en longueur du copeau enlevé. La longueur de copeau (L) est égale à la vitesse de coupe et du temps de coupe (T) correspondant à chaque vitesse de coupe. Elle est calculée d'après l'expression suivante :

$$L = Vc.T \dots\dots\dots (III.1)$$

Où :

- L : longueur du copeau enlevé (m);
- Vc : la vitesse de coupe (m/min);
- T : la durée de vie de l'outil (min).

Les variations d'une seule de ces conditions et tous les autres restants invariables, donnent lieu à des débits différents dont nous retiendrons pour chaque cas.

Les facteurs susceptibles de modifier la longueur maximale d'un outil se déduisent du mécanisme de la coupe et peuvent se recenser comme suit :

- Comportement de la matière façonnée;
- Comportement de l'outil;
- Mode d'action de l'outil;
- Dispersion de la chaleur résultant de la coupe;
- Dimension du copeau;
- Vitesse de coupe.

Dans ce qui suit, nous étudierons l'influence de ces facteurs sur la longueur du copeau enlevé en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la tenue de l'outil CBN seulement.

a) Productivité en fonction de la vitesse de coupe

La figure (III.26) illustre la longueur du copeau enlevé durant l'usinage de l'acier AISI D3 à différentes vitesses de coupe pour les deux critères d'usure [VB]=0.3 mm et 0.4 mm.

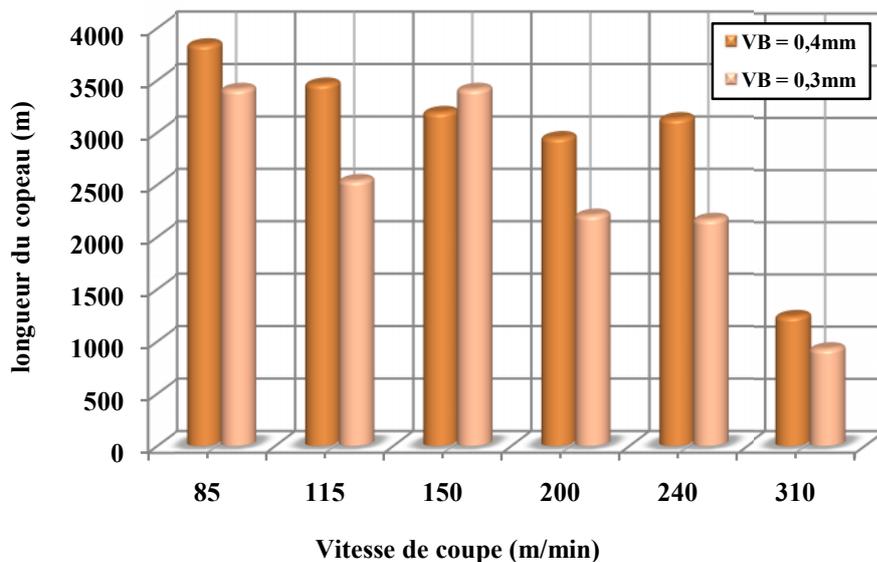


Figure III.26 : longueur du copeau enlevée à différentes vitesses de coupe.

L'analyse des résultats montre que la vitesse de coupe 85m/min conduit à un meilleur rendement $L=3400\text{m}$ pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et $L=3825\text{m}$ pour $[VB]=0.4\text{mm}$. La valeur minimale de la longueur du copeau enlevée est observée à la vitesse de 310 m/min avec $L=930\text{m}$ pour le critère $[VB]=0.3\text{mm}$, et $L=1240\text{m}$ pour $[VB]=0.4\text{mm}$.

b) Productivité en fonction de l'avance

La figure (III.27) illustre la longueur du copeau enlevé pour les deux critères d'usure $[VB]=0.3\text{ mm}$ et 0.4 mm , en fonction de l'avance et à deux vitesses de coupe.

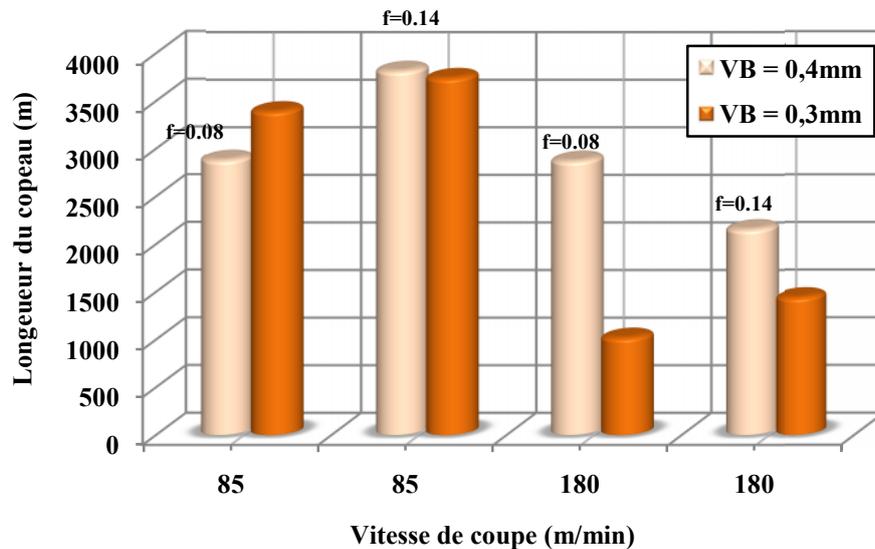


Figure III.27 : Longueur du copeau pour deux avances différentes.

L'analyse des résultats montre que pour la vitesse de 85m/min et quand l'avance augmente de 0.08 à 0.14mm/tr la longueur du copeau augmente de 10.29% pour le critère $[VB]=0.3\text{mm}$ et de 32.35% pour $[VB]=0.4\text{mm}$. A la vitesse de 180m/min et quand l'avance augmente de 0.08 à 0.14 la longueur du copeau augmente de 41.17% pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et de 25% pour $[VB]=0.4\text{mm}$. La valeur maximale du copeau enlevé est observée avec la vitesse minimale 85m/min et l'avance maximale 0.14mm/tr, avec $L=3825\text{m}$ pour $[VB]=0.3\text{mm}$ et $L=3750\text{m}$ pour $[VB]=0.4\text{mm}$.

III.6 Modèles mathématiques déterminée:

Ce point est consacré à la détermination des modèles mathématiques de la tenue en fonction de la vitesse de coupe (modèle de Taylor) et de l'avance (modèle de Gilbert). Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les conditions de coupe (V_c , f , t) et les paramètres technologiques étudiés.

III.6.1 Détermination des modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe (Modèles de Taylor)

Pour déterminer les modèles de Taylor, nous avons utilisé un programme, qui nous donne directement les valeurs des constantes de Taylor (C_v , C_t , n_v et Z), et le coefficient de détermination R^2 .

Le modèle de Taylor se présente sous la forme suivante :

$$T = C_t V^n \dots\dots\dots(III.2)$$

Où :

T : Durée de vie (minutes).

V_c : Vitesse de coupe (m/min).

C_t : Constante dépendante du couple outil/pièce.

n : Exposant de Taylor prenant pour valeur.

Le traitement des résultats par la méthode des moindres carrés des valeurs des tenues, a permis la détermination des modèles de la tenue en fonction de la vitesse de coupe pour $[VB] = 0.3$ et 0.4 mm.

- Modèle de Taylor pour $VB=0.3$ mm

$$T = \exp^{11.667} V^{-1.781} \quad R^2 = 0.986 \dots\dots\dots(III.3)$$

- Modèle de Taylor pour $VB=0.4$ mm

$$T = \exp^{11.296} V^{-1.657} \quad R^2 = 0.986 \dots\dots\dots(III.4)$$

Les modèles mathématiques des équations (III.3 et III.4), montrent la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie de l'outil. Ils permettent donc de déterminer la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe souhaitée. D'après ces modèles, on peut dire que la vitesse de coupe a une influence majeure sur la durée de vie de l'outil. Il est très clair que son augmentation entraîne une diminution de la tenue de l'outil CBN. Il est a noté aussi que ces modèles mathématiques sont un moyen très utile pour l'élaboration des abaques et pour une éventuelle étude d'optimisation de processus de coupe. Les coefficients de détermination des modèles trouvés sont élevés et convergent vers l'unité, ce qui traduit la bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

La figure (III.28) présente les droites de Taylor tracées à partir des modèles mathématiques trouvés, et cela sur une échelle bi-logarithmique et aussi les différents tenues trouvées expérimentalement pour les deux critères d'usure $[VB]=0.3$ et 0.4 mm. L'intérêt économique de ces droites est très important, car elles permettent de déterminer les tenues de l'outil testé lors de l'usinage de l'acier AISI D3 à n'importe quelle vitesse de coupe choisie et cela pour une gamme de vitesses de coupe comprise entre 85 et 310m/min.

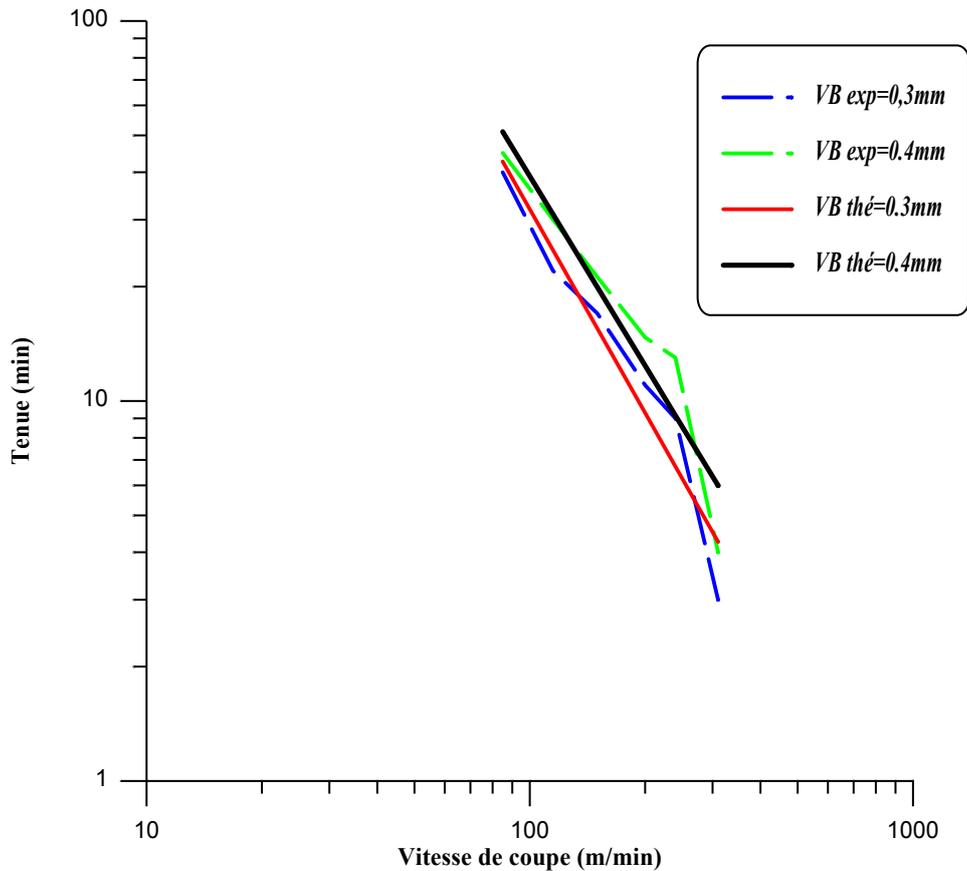


Figure III.28: Droite de Taylor déduit par le modèle pour [VB] = 0.3 et 0.4 mm.

III.6.2 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 :

$$T = C_0 \cdot Vc^{C1} \cdot f^{C2} \cdot a_p^{C3} \dots\dots\dots(III.5)$$

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 :

$$T = C_0 \cdot Vc^{C1} \cdot f^{C2} \dots\dots\dots(III.6)$$

La détermination des constantes C_0, C_1, C_2 a été faite à l'aide d'un programme spécifique. Avec $a_p = \text{const} = 0.5\text{mm}$ et pour $[VB] = 0.3$ et 0.4mm .

Les modèles mathématiques de Gilbert trouvés sont :

Pour $VB=0.3\text{mm}$

$$T = e^{11,115} / V^{1,93} \cdot f^{0,529} \quad R^2=0.988 \dots \dots \dots (III.7)$$

Pour $VB=0.4\text{mm}$

$$T = e^{11,736} / V^{1,917} \cdot f^{0,351} \quad R^2=0.999 \dots \dots \dots (III.8)$$

Ces modèles montrent que la durée de vie est inversement proportionnelle à l'augmentation des deux éléments de régime de coupe ($V_c; f$). 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, f) sur la tenue. L'analyse des différents exposants montre que l'influence de la vitesse de coupe est plus significative que celle de l'avance.

Chapitre IV

*Influence du paramètre de coupe
sur les efforts de coupe, rugosité et
température de coupe*

IV.1 Introduction

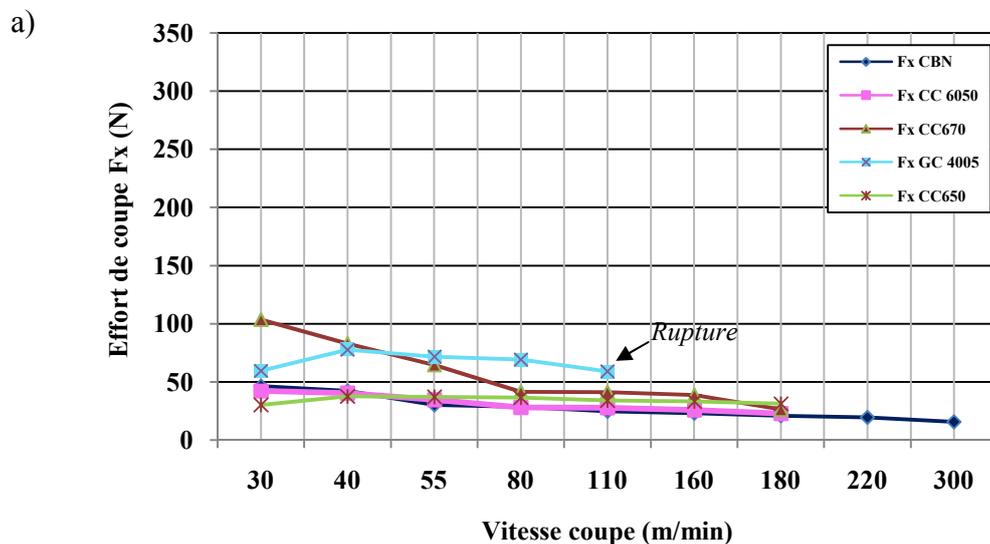
Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe, l'effort spécifique, l'effort résultant, la rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier AISI D3 par cinq matériaux de coupe (CBN, CC6050, CC670, CC650 et GC4005). Nous présentons également les résultats de l'impact de la dureté de la pièce sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe, sur la rugosité et la puissance de coupe lors de l'usinage avec l'outil CBN. En fin, nous présentons aussi les résultats de la température de coupe.

IV. 2 Evolution des efforts de coupe, des efforts spécifiques de coupe et les efforts résultants en fonction des paramètres du régime de coupe

IV.2.1 Evolution des efforts de coupe

➤ Effet de la vitesse de coupe

La figure IV.1 (a, b, c) illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les cinq matériaux de coupe testés. Cette évolution est presque la même pour toutes les nuances testées, d'autant plus on remarque une diminution des efforts de coupe. A la vitesse de 110m/min, on observe un début de stabilisation des efforts de coupe, mais au delà de cette vitesse de coupe, la chute des efforts de coupe est moins importante. Cette diminution est due à l'augmentation de la température dans la zone de coupe, rendant le métal plus malléable et facile à s'écouler sur la surface d'attaque. L'arête de coupe du carbure GC4005 à cette vitesse est endommagée subissant une rupture à cause de l'usure accélérée et des efforts de coupe importants. Sur le plan pratique, l'augmentation de la vitesse de 110 à 180 m/min, conduit à une diminution des trois composantes de l'effort (Fx; Fr; Fz) respectivement de (15.96 ; 19.28 ; 27.98)% pour le CBN, (17.81 ; 24.46 ; 21.91) % pour la céramique revêtue CC6050, (35.99 ; 42.57; 15.19) % pour la céramique composite CC670 et (8.12 ;29.85 ;19.59) % pour la céramique mixte CC650. Lorsqu'on augmente la vitesse de coupe pour le CBN jusqu'à 300 m/min, on enregistre une autre diminution des composantes de l'effort de coupe qui correspond à (24.79 ; 34.15 ; 14.80)%.



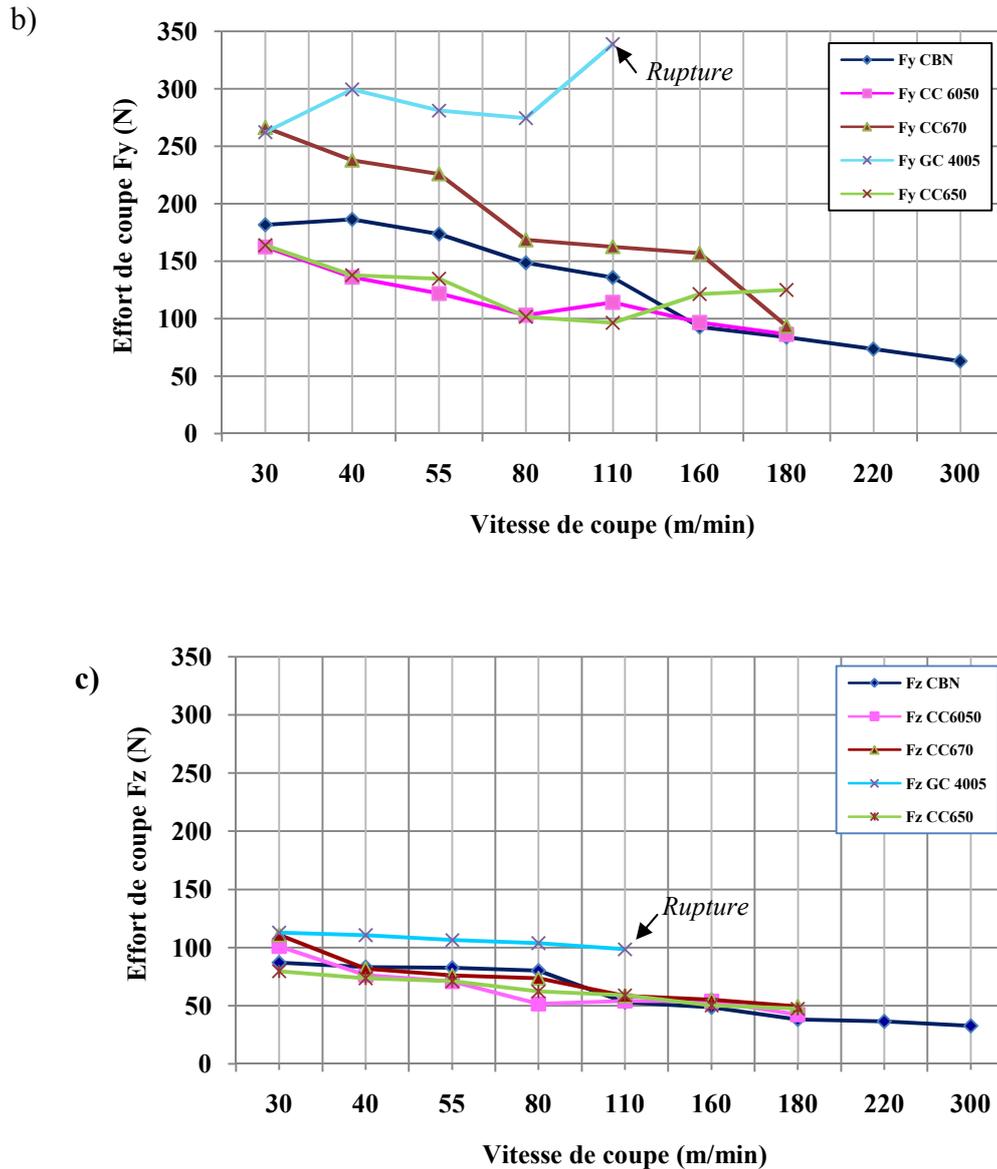


Figure IV.1 : Evolution des trois composantes des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe, a) effort axial ; b) effort radial ; c) effort tangentiel pour $f= 0.08\text{mm/tr}$; $ap= 0.1\text{mm}$.

La figure (IV.2) illustre une comparaison entre les efforts de coupe enregistrés pour les cinq matériaux de coupe testés. L'analyse des résultats montre que le CBN à faible vitesse de coupe $V_c=55\text{m/min}$ engendre un effort radial plus élevé par rapport aux autres nuances (céramique CC6050 et CC650). Aux vitesses de coupe élevées, l'usinage avec l'outil CBN engendre des efforts moins importants que ceux des autres matériaux de coupe testés. Pour les efforts de coupe radiaux enregistrés par le carbure GC4005 aux vitesses (55 et 110m/min), ils sont les plus élevés.

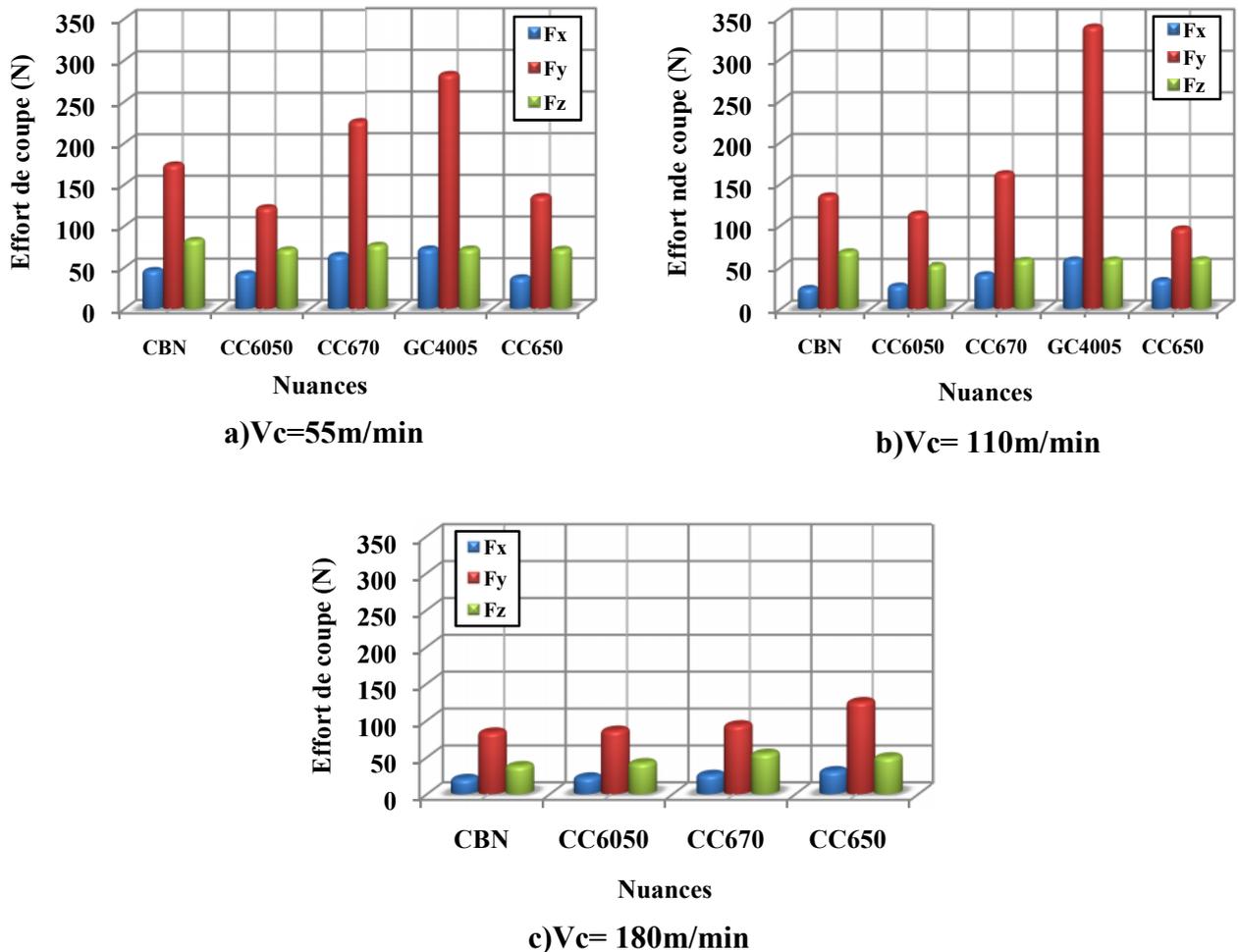


Figure IV.2 : Comparaison entre les efforts enregistrés pour les cinq nuances de coupe pour $f= 0.08\text{mm/tr}$ et $ap= 0.1\text{mm}$.

➤ **Effet de l'avance**

La figure VI.3 (a, b et c) illustre l'influence de l'avance sur les trois composantes de l'effort de coupe et cela pour les cinq matériaux de coupe testés. Avec l'augmentation de l'avance, la section du copeau cisailé accroît et par conséquent la force demandée pour l'enlèvement de la matière s'accroît. L'allure de cette évolution est la même pour toutes les nuances. Pour une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.2 mm/tr, on enregistre une élévation de (88.84 ; 176.05 ; 58.84 ; 170.62 et 90.85) % de l'effort radial, (29.13 ; 22.91 ; 58.05 ; 147.39 et 79.36) % de l'effort axial (38.92 ; 83.23 ; 72.01 ; 132.95 et 118.89) % de l'effort tangentiel respectivement aux différentes matériaux de coupe (CBN, CC6050, CC670, GC4005 et CC650). L'analyse des résultats montre que l'effort radial est prépondérant par rapport à l'effort tangentiel et axial.

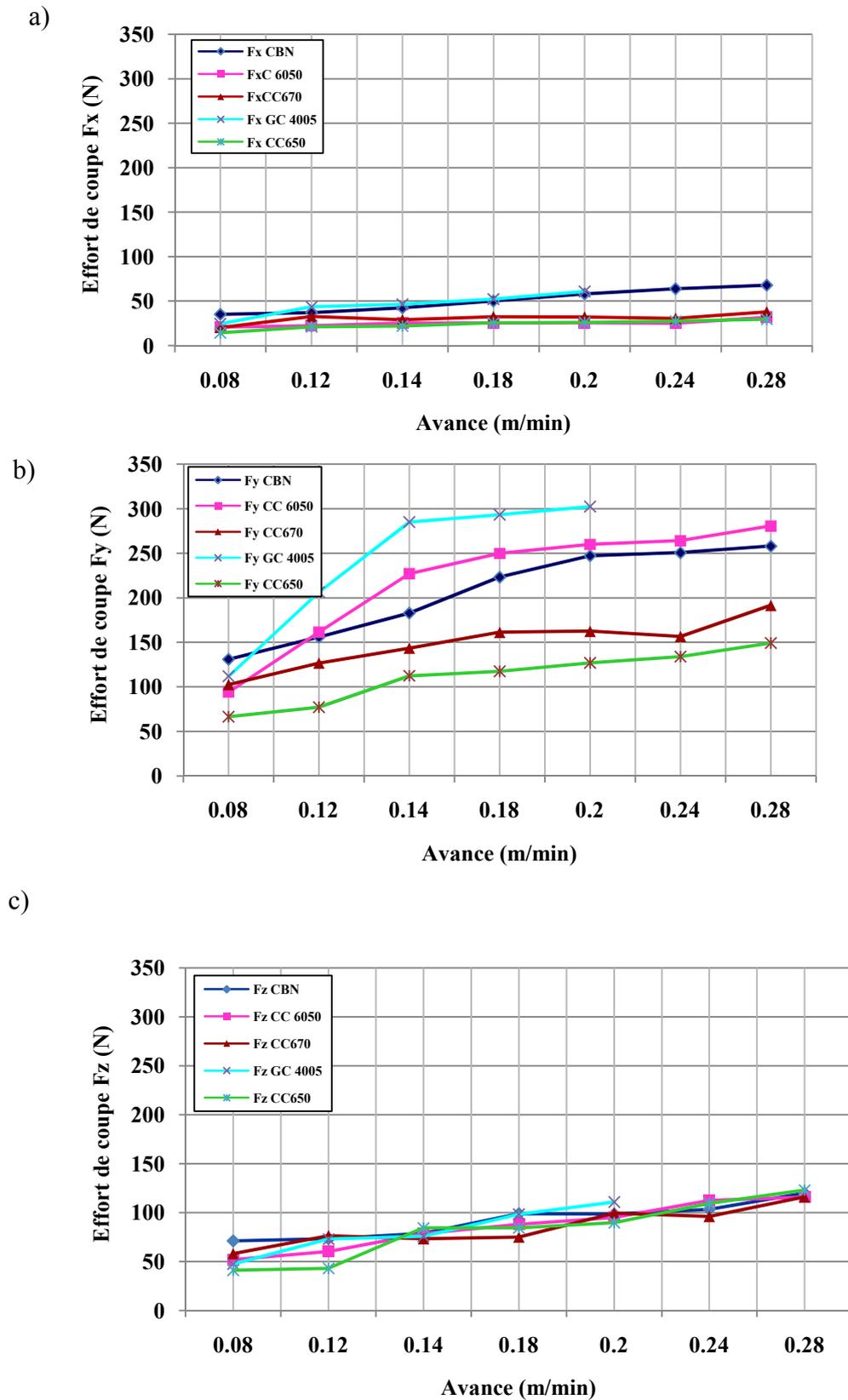
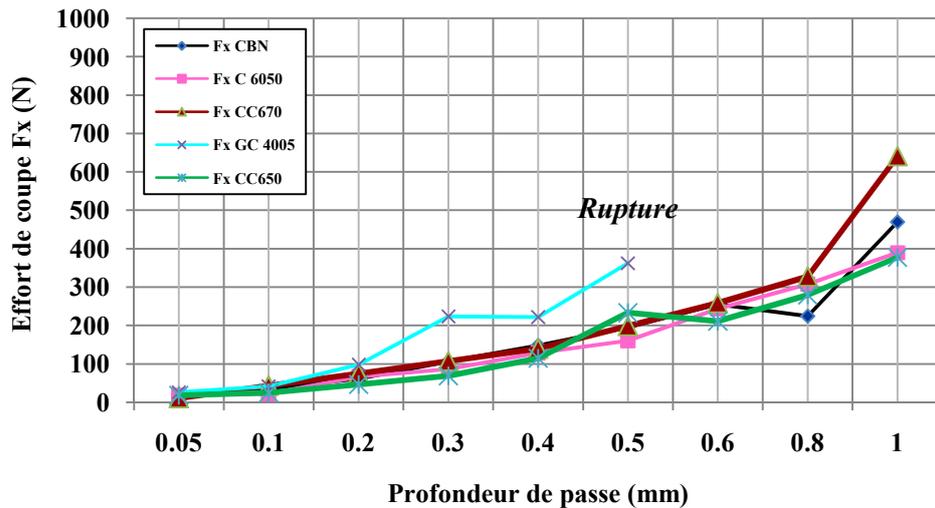


Figure IV.3 : Evolution des trois composantes des efforts de coupe en fonction de l'avance, a) effort axial ; b) effort radial ; c) effort tangentiel pour $V_c = 110 \text{ m/min}$; $a_p = 0.1 \text{ mm}$.

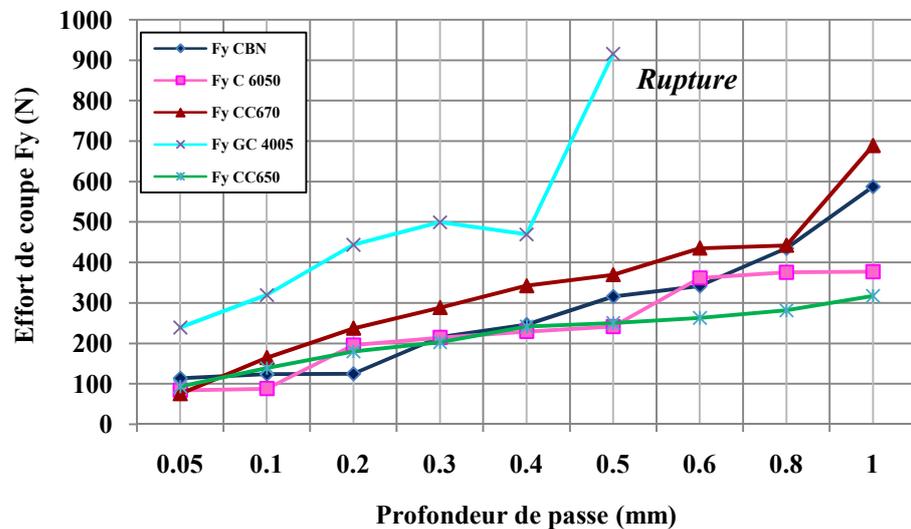
➤ **Effet de la profondeur de passe**

Les résultats présentés dans la figure VI.4 (a, b, et c) montrent la variation des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour les cinq matériaux de coupe testés. Avec l'augmentation de cette dernière, la section du copeau devient très importante conduisant à une augmentation du volume de métal à déformer et nécessitant ainsi des efforts de coupe importants pour l'enlèvement du copeau. Sur le plan pratique, une augmentation de la profondeur de passe de (0.05 à 0.5) mm, on a enregistré un taux d'élévation pour les trois composantes (Fx, Fy, Fz) successivement de (1028.76 ; 178.66 ; 371.03) % pour le CBN, (805.63 ; 187.82 ; 484.18) % pour la céramique revêtue CC6050, (1725 ; 479.80 ; 617.89) % pour la céramique composite CC670, (1254.89 ; 283.22 ; 628.49) % pour le carbure GC4005 et (1195.00 ; 169.83 ; 752.11) % pour la céramique mixte CC650. On a remarqué que pour la profondeur de passe $a_p = 0.5\text{mm}$, le carbure subit une rupture à cause de l'usure accélérée et du volume de métal à enlever par l'arête de coupe. Une élévation de la profondeur de passe de 0.5 à 1 mm, conduit à une augmentation de (140.76 ; 142.87 ; 222.97 ; 61.77)% pour l'effort axial, (86.10 ; 56.40 ; 58.28 ; 26.84) % pour l'effort radial, (102.64 ; 63.01 ; 100.54 ; 75.58) de l'effort tangentiel respectivement aux différentes nuances de coupe (CBN ; CC6050 ; CC670 et CC650).

a)



b)



c)

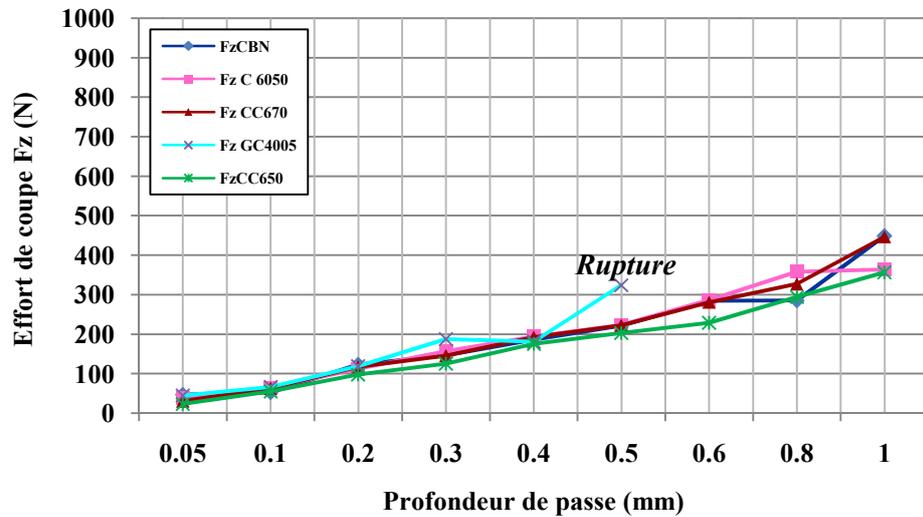


Figure IV.4 : Evolution des trois composantes des efforts de coupe en fonction de profondeur de passe, a) effort axial ; b) effort radial ; c) effort tangentiel pour $V_c = 110 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$.

La figure (IV.5) montre une comparaison entre les efforts de coupe pour les cinq nuances de coupe. Les valeurs des effort (F_x ; F_y ; F_z) à ($V_c = 110 \text{ m/mn}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.1 \text{ mm}$) sont de l'ordre de (35.89 ; 123.6 ; 52.67) N pour le CBN, (22.44 ; 87.84 ; 64.23) N pour CC6050, (42.96 ; 164.58 ; 62.96) N pour CC670, (41.18 ; 319.41 ; 66.42) N pour GC4005 et (25.16 ; 138.16 ; 55.05) N pour CC650. L'analyse de cette figure montre que les deux outils de coupe (la céramique mixte CC6050 et le CBN) donnent des efforts de coupe moindres par rapport aux autres matériaux de coupe et par conséquent un système usinant plus stable. Ces performances peuvent aussi être partiellement expliquées par la haute rigidité du CBN et la tenue exceptionnelle de ses arêtes de coupe ainsi que sa stabilité chimique à des températures élevées [PAS 96].

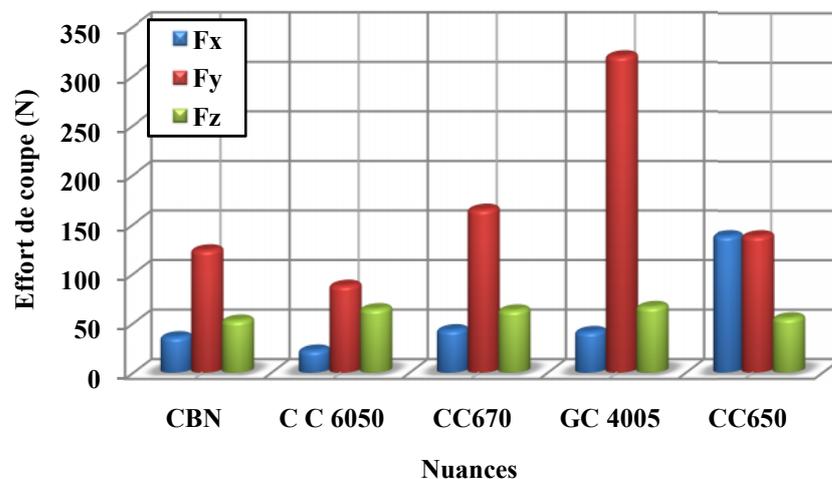


Figure IV.5: Comparaison entre les efforts enregistrés pour les cinq nuances de coupe pour $V_c = 110 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p 0.1 \text{ mm}$.

IV.2.2 Evolution des efforts spécifiques et résultants en fonction du régime de coupe

➤ Effet de la vitesse de coupe

La vitesse de coupe est le paramètre qui contrôle majoritairement l'énergie fournie au système et qui endommage l'outil de coupe. Le choix non adéquat de la vitesse de coupe lors de l'usinage des conséquences graves sur les résultats escomptés. Le bon contrôle de cette plage de vitesse de coupe permet donc une meilleure maîtrise de processus de coupe. La figure (IV.6) montre la variation des efforts (pressions) spécifiques en fonction de la vitesse de coupe (V_c) pour les cinq nuances testées. Il ressort que l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution des pressions de coupe. A cet effet, on distingue deux périodes d'évolution différentes:

- La première période (**zone I**) [$V_c= 30$ à 110] m/min est caractérisée par une diminution importante de l'effort spécifique qui correspond à un chargement important de l'arête de coupe. Les pressions enregistrées dans cette zone (**I**) sont élevées. A titre d'exemple, à $V_c=30$ m/min, on enregistre une pression (K_{cz}) de (18645 ; 9927,5 ; 13841,25 ; 11498,75 et 9946,25) N/mm^2 respectivement aux différentes nuances de coupe (CBN ; CC6050 ; CC670 ; GC4005 ; CC650). La fin de cette période (**zone I**) conduit à la détermination de la vitesse minimale du domaine d'utilisation du couple outil-matière.

- La deuxième période (**zone II**) [$V_c= 110$ à 180] m/min est caractérisée par une plage où la pression de coupe K_{cz} se stabilise un peu (chute moins importante) et où le décrochage se fait à partir de $V_c=110$ m/min. En pratique cette zone constitue la plage optimale d'utilisation de l'arête de coupe, qui se termine par la détermination de la vitesse de coupe maximale. A $V_c=180$ m/min, la pression spécifique est à son bas niveau, ce qui est préférable à l'outil. On enregistre une pression de 4777.5 N/mm^2 pour le CBN, 5277,5 N/mm^2 pour la céramique revêtue CC6050; 6187,5 N/mm^2 pour la céramique composite CC670 et 5940 N/mm^2 pour la céramique mixte CC650. Cela a pour effet de minimiser les contraintes qui provoquent la rupture brusque de l'arête de coupe. Mais à ce stade, il faut faire un compromis entre les pressions basses à grande vitesse de coupe et aussi l'usure de l'outil aux vitesses de coupe élevées.

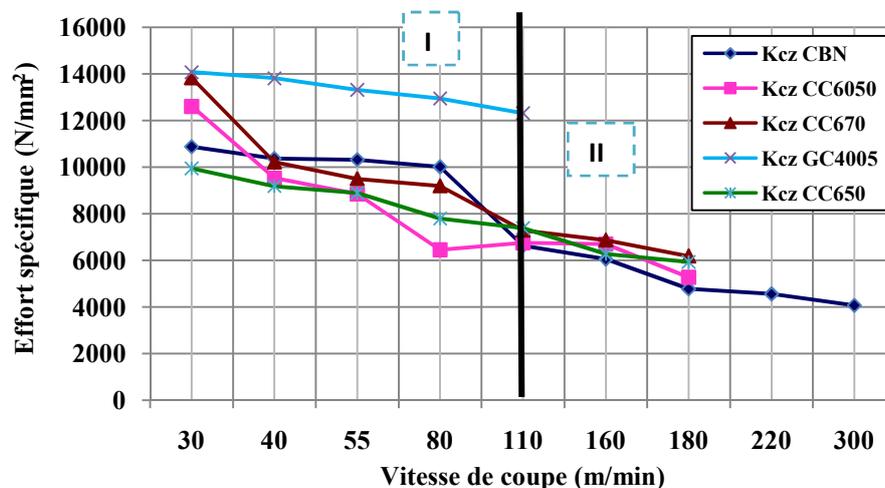


Figure IV.6 : Evolution des pressions spécifiques en fonction de la vitesse de coupe $f=0.08mm/tr$, $ap=0.1mm$.

La figure (IV.7) présente l'évolution de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe. L'analyse des résultats montre une décroissance de l'effort résultant avec l'augmentation de vitesse de coupe. A la vitesse $V_c=30$ m/min l'effort résultant est à son maximum et prend les valeurs (206.73 ; 196.00 ; 306.48 ; 291.47 ; 184.60) N respectivement aux différentes nuances de coupe (CBN ; CC6050 ; CC670 ; GC4005 ; CC650). A la vitesse 180m/min, les efforts résultants sont à leur bas niveaux prenant ainsi les valeurs (98.155; 98.68 ; 109.03 ; 137.34) N.

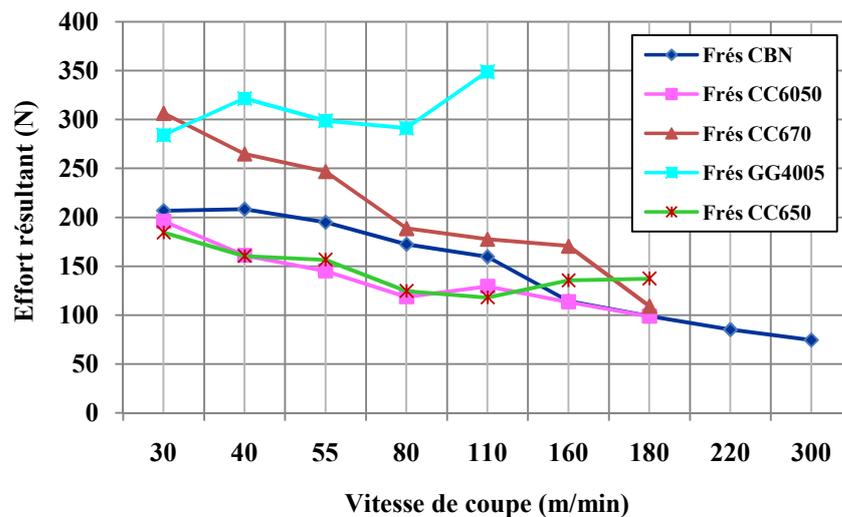


Figure IV.7: Evolution de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe pour $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.1$ mm.

➤ Effet de l'avance

La figure (IV.8) présente l'évolution de la pression de coupe K_{cz} en fonction de l'avance (f). On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance la pression de coupe a un comportement décroissant similaire à celui de la vitesse de coupe. Pour les faibles avances, on enregistre des pressions extrêmement élevées. Avec une avance de 0,08 mm/tr, les pressions de coupe (K_{cz}) sont de l'ordre de (8873.75 ; 6472.5 ; 7226.25 ; 5940 et 5115) N/mm² respectivement pour (CBN ; CC6050 ; CC670 ; GC4005 ; CC650). Avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0,28 mm/tr, la pression chute successivement de 51.74% ; 36.09% ; 42.73 ; 29.26% et 14.12%. Ici, un compromis reste à faire entre la diminution de la pression de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance.

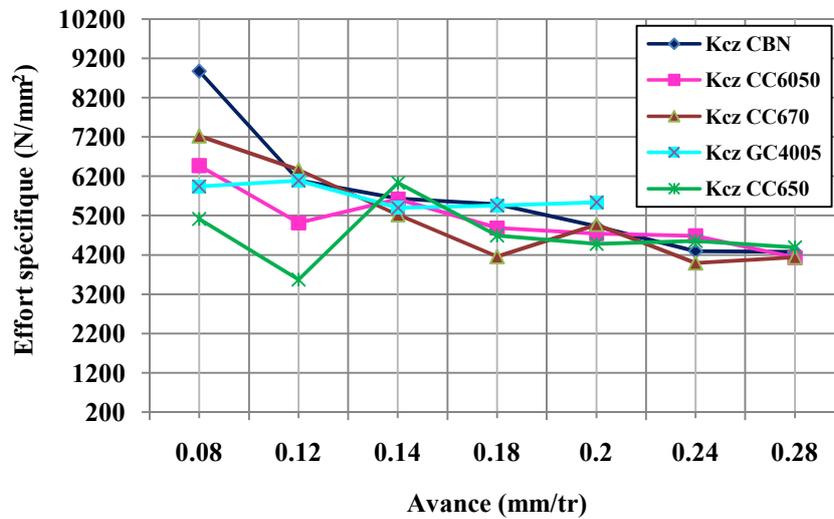


Figure IV.8 : Evolution des pressions spécifiques en fonction de l'avance pour $V_c=110m/min$, $a_p=0.1mm$.

Les résultats présentés sur la figure (IV.9) illustre l'évolution de l'effort résultant en fonction de l'avance. On remarque que l'augmentation de l'avance induit une augmentation de l'effort résultant. Les conséquences sur le plan pratique sont comme suit : pour une avance de 0.08mm/tr, les efforts résultants sont de (153.03 ; 109.37 ; 119.45 ; 123.87 ; 79.38) N respectivement pour (CBN ; CC6050 ; CC670 ; GC4005 ; CC650). L'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.28mm/tr, conduit à une élévation de l'effort de coupe résultant de (91.13 ; 179.10 ; 90.02 ; 146.37)% respectivement pour (CBN ; CC6050 ; CC670 ; GC4005 ; CC650).

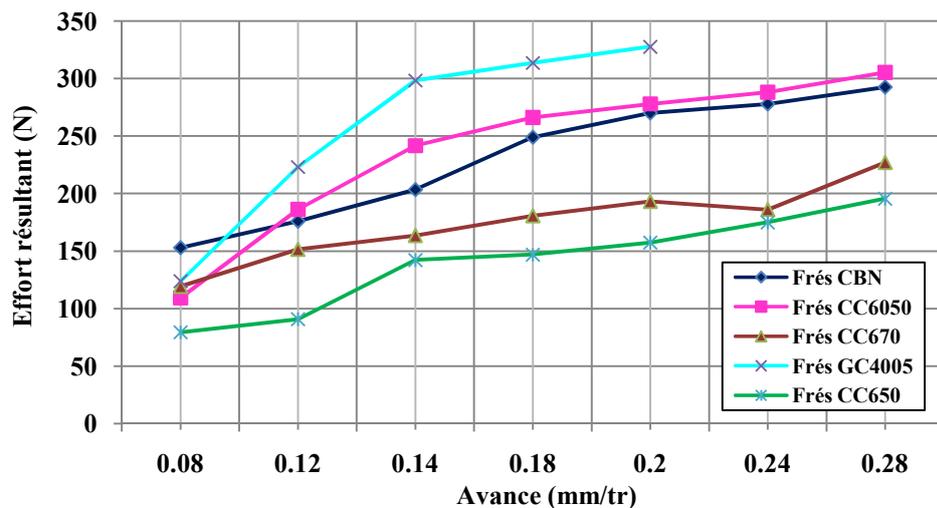


Figure IV.9: Evolution de l'effort résultant en fonction de l'avance pour $V_c=110m/min$, $a_p=0.1mm$.

➤ **Effet de la profondeur de passe**

La figure (IV.10) présente l'évolution de la pression de coupe en fonction de la profondeur de passe. Il ressort de cette figure que l'augmentation de la profondeur de passe a pour effet de diminuer la pression de coupe. Pour une $a_p = 0,05$ mm, les pressions sont à leur maximum. On enregistre une pression (K_{cz}) de l'ordre de (11757.5 ; 9562.5 ; 7755 ; 11142.5 et 5982.5) N/mm^2 pour (CBN ; CC6050 ; CC670 ; GC4005 et CC650). Par conséquent, il est déconseillé de travailler avec cette faible profondeur de passe, car la pression engendrée est extrêmement élevée pouvant ainsi endommager l'arête de coupe. Dans l'intervalle (0,05 à 0,2) mm, la pression (K_{cz}) chute respectivement de 34.49% pour CBN; 26.43% pour CC6050 ; 5.27% pour CC670 ; 33.41% pour GC4005 et 2.77% pour CC650. De 0,2 à 1,0 mm, la pression est à son bas niveau, on enregistre des chutes de (27.14 ; 35.27 ; 24 et 27.53)%. Là aussi un compromis doit se faire entre les pressions basses aux grandes valeurs de a_p et l'usure de l'outil lors du travail avec des profondeurs de passe élevées.

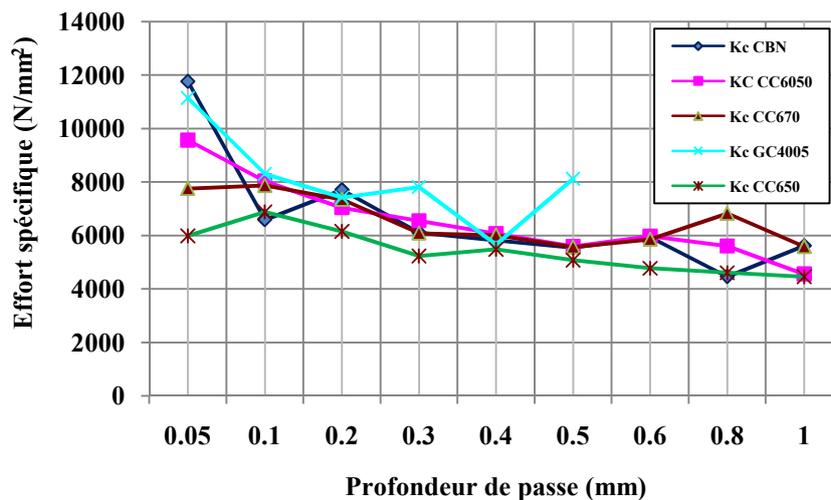


Figure IV.10 : Evolution des efforts spécifiques en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=110m/min, f=0.08mm/tr$.

La figure (IV.11) présente l'évolution de l'effort résultant ($F_{rés}$) en fonction de la vitesse de coupe. L'analyse des résultats montre une croissance de l'effort résultant pour toutes les nuances testées. Pour une augmentation de la profondeur de passe de 0.05 à 0.5mm, on enregistre une élévation de l'effort résultant de 248.99% pour le CBN, 290.11% pour la CC6050, 451.79% pour la CC670, 324.09% pour le carbure GC4005 et de 308.44% pour la céramique mixte CC650. La variation de la profondeur de passe de 0.05 à 1mm conduit à une augmentation de l'effort résultant de (607.23 ; 596.90 ; 1137.82 et 524.82)% respectivement aux différents matériaux de coupe (CBN ; CC6050 ; CC670 et CC650). Cette augmentation est presque linéaire surtout à partir de 0.05 à 0.8mm.

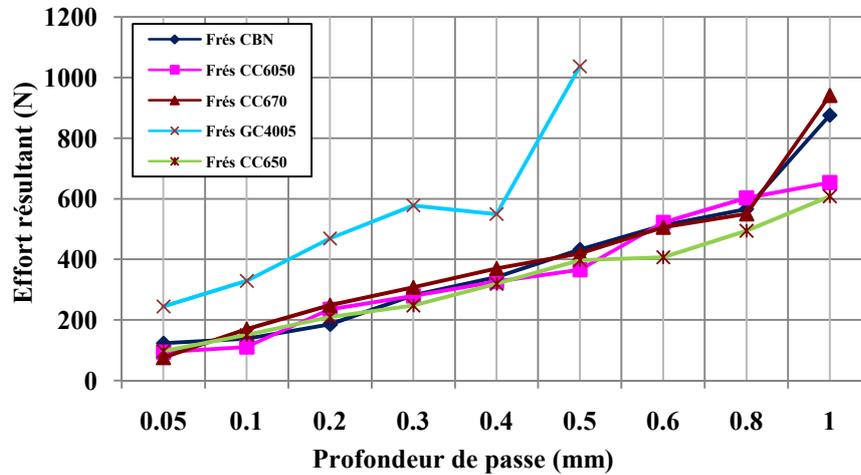
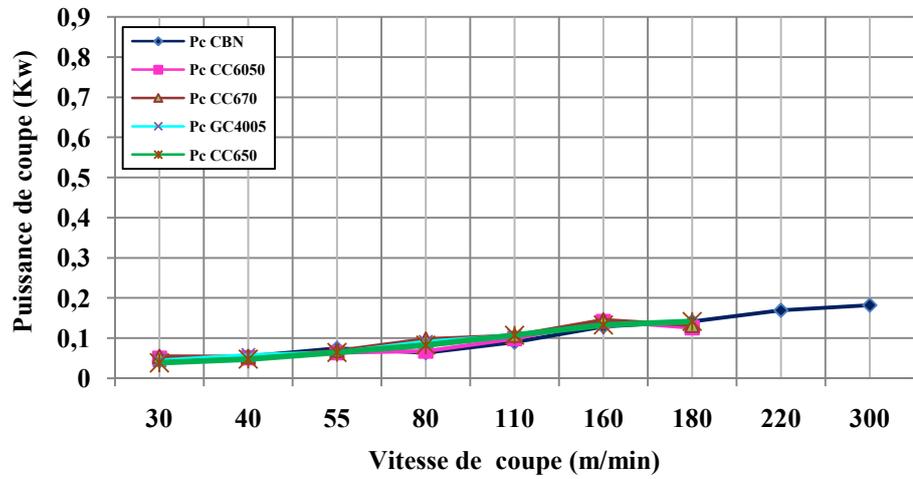


Figure IV.11 : Evolution de l'effort résultant en fonction de la profondeur de passe pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.1\text{mm}$

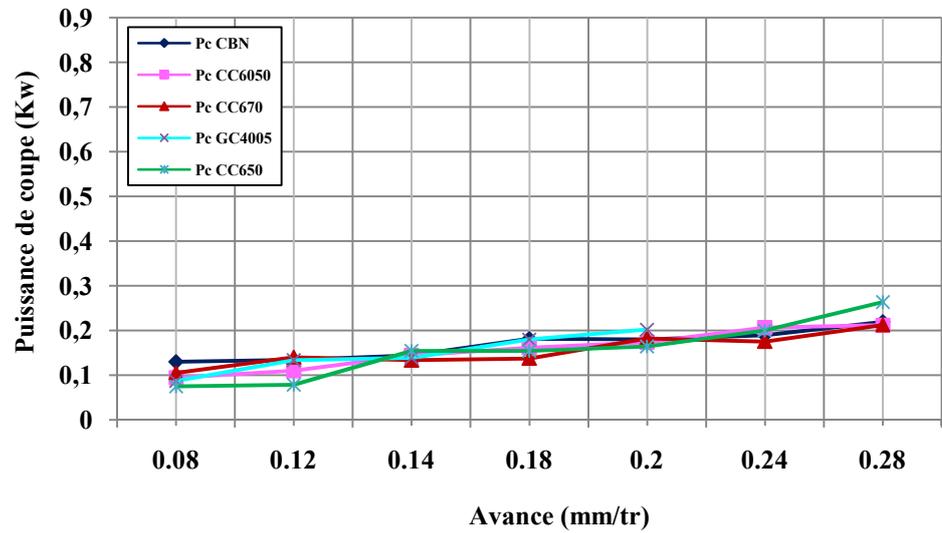
IV.3 Evolution de la puissance de coupe en fonction des conditions de coupe

L'étude et l'évaluation des forces de coupe générées en usinage permet principalement de dimensionner les outils et les éléments de la machine - outil (porte-pièce, etc) et aussi pour évaluer la puissance de coupe et permettre le choix rationnel de la machine. La figure (IV.12) (a, b et c) montre l'évolution de la puissance en fonction des paramètres d'usinage (V_c , f , a_p) pour les cinq matériaux. L'analyse de cette figure montre une nette augmentation de la puissance de coupe avec l'augmentation de la vitesse de coupe V_c , de l'avance et de la profondeur de passe. Une élévation de la vitesse de coupe de 30 à 180m/min (figure IV.12a) conduit à une élévation de la puissance pour les quatre matériaux de coupe (CBN, CC6050, CC670 et CC650) de (230.23 ; 152 ; 140 et 264.10)% successivement. Alors une augmentation de V_c de 180 à 300m/min, conduit une élévation de la puissance du CBN de 28.16%. De la même manière l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.28mm/tr, conduit à une élévation de la puissance de coupe pour les matériaux (CBN, CC6050, CC670 et CC650) successivement de (68.46; 125.53; 101.90 et 250.66)% (figure IV.12b). Aussi, l'élévation de la profondeur de passe de 0.05 à 1mm conduit à une élévation de la puissance de coupe pour les matériaux (CBN, CC6050, CC670 et CC650) successivement de (856.97; 852.85; 1328.57 et 1418.60)% (figure IV.12c).

a)



b)



c)

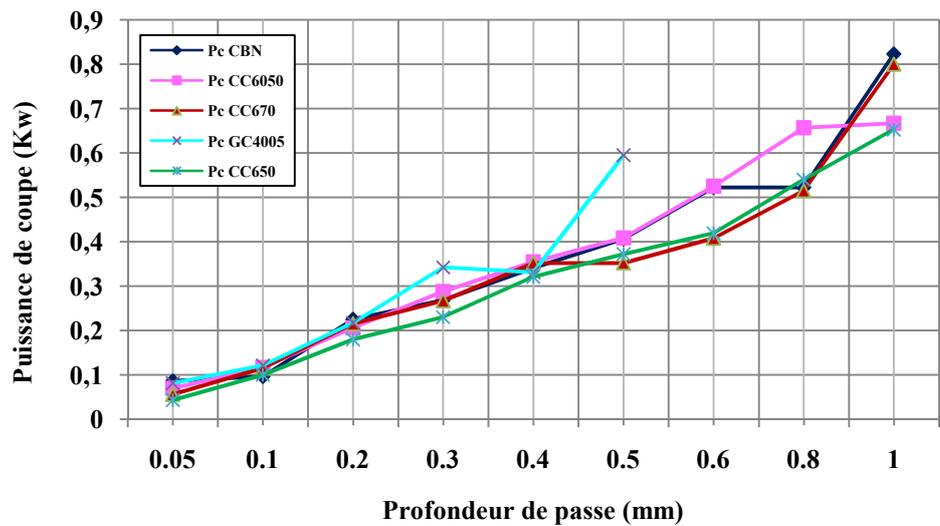
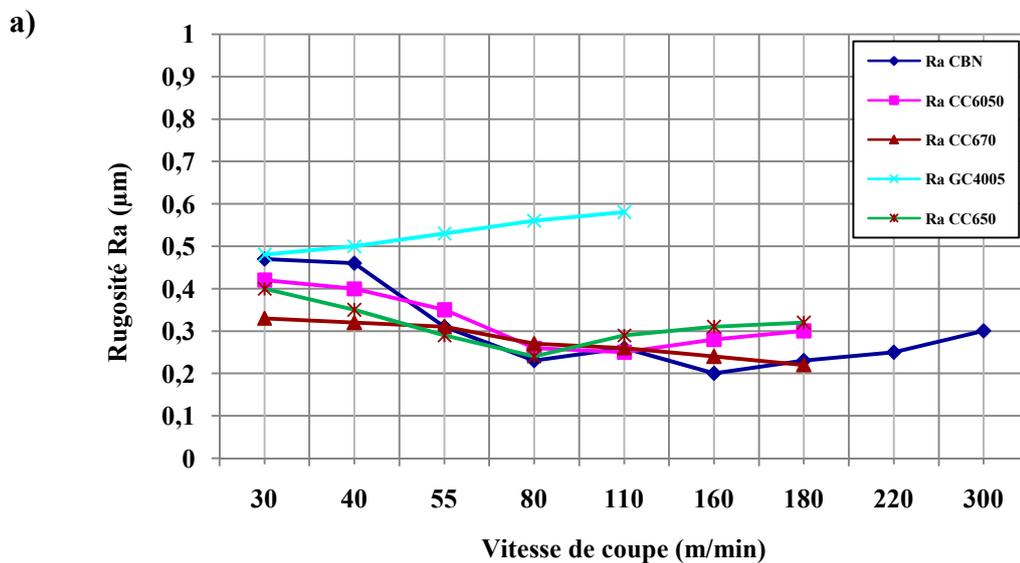


Figure IV.12 : Evolution de la puissance de coupe en fonction des conditions de coupe, a) en fonction de V_c , b) en fonction de f , c) en fonction de a_p .

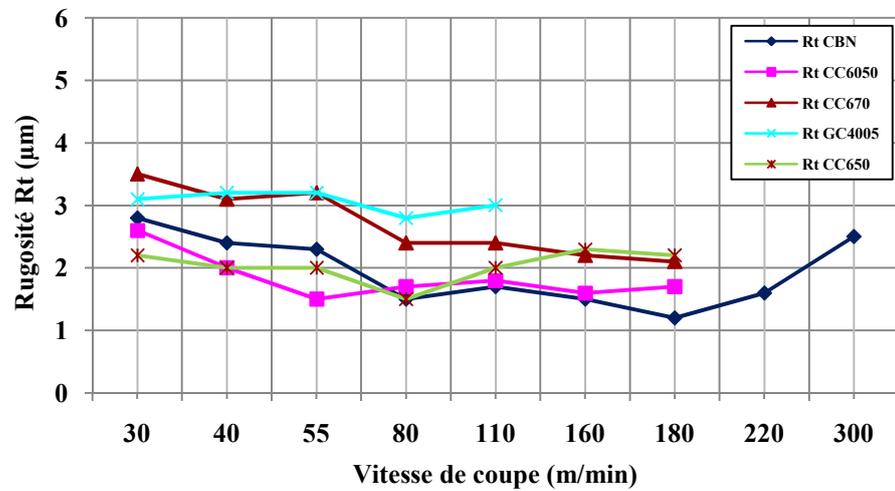
IV.4 Evolution de la rugosité en fonction des conditions de coupe

➤ Effet de la vitesse de coupe

La caractérisation de la qualité de la surface usinée a été limitée aux critères de rugosité totale (Rt), moyenne arithmétique (Ra) et moyenne des hauteurs des irrégularités (Rz) [ENA 72]. La figure (IV.13) illustre l'influence de la vitesse de coupe sur les différents critères de la rugosité lors de l'usinage de l'acier AISI D3. L'analyse de ces courbes montre que pendant l'usinage, la rugosité de l'acier trempé diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Pour les deux nuances de coupe (la céramique composite CC670 et la céramique mixte CC650), on a remarqué que l'état de surface s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à la limite de 80 m/min. Au-delà de cette valeur on a enregistré une augmentation de la rugosité pour la nuance CC650 et une diminution pour CC670. Concernant le carbure GC4005, cette nuance n'est pas capable d'usiner à des vitesses supérieures à 110 m/min. Pour le CBN, on distingue deux zones, une entre (30 et 80) m/min où la rugosité chute brusquement de (0.47 à 0.23 ; 2.8 à 1.8 ; 1.5 à 1.2) μm . Au-delà de la vitesse 80m/min, les valeurs de la rugosité se stabilise avec une légère diminution. Lorsque la vitesse augmente de 180 à 300m/min, on enregistre une augmentation des valeurs de rugosité de (30.43% pour Ra, 66.66% pour Rt et 50% pour Rz). Pour la nuance CC6050, on remarque que l'augmentation de la vitesse de 30 à 180m/min conduit à une diminution des trois critères de l'état de surface de (28.57; 34.61; 100)% respectivement de (Ra, Rt, Rz).



b)



c)

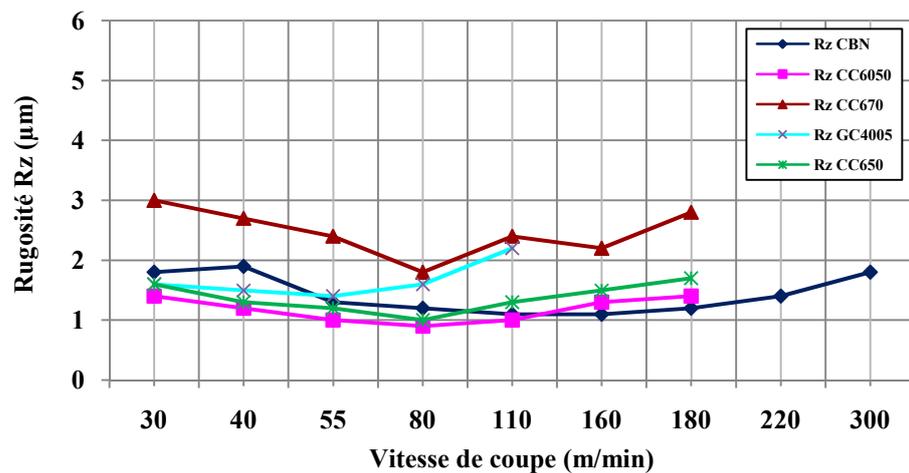


Figure IV.13 : Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.1\text{mm}$.

La figure (IV.14) illustre que la céramique revêtue CC6050 et la céramique mixte CC650 donnent des bonnes qualités de surface à des faibles vitesses ($V_c=40\text{m/min}$). Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, l'usure s'accélère surtout pour le carbure GC4005 ce qui affecte la qualité de surface usinée. A la vitesse de coupe 180m/min , on a remarqué que le CBN résiste bien aux frottements exercés sur l'outil à cause de ses performances, ce qui lui permet de générer des meilleurs états de surface sur la pièce.

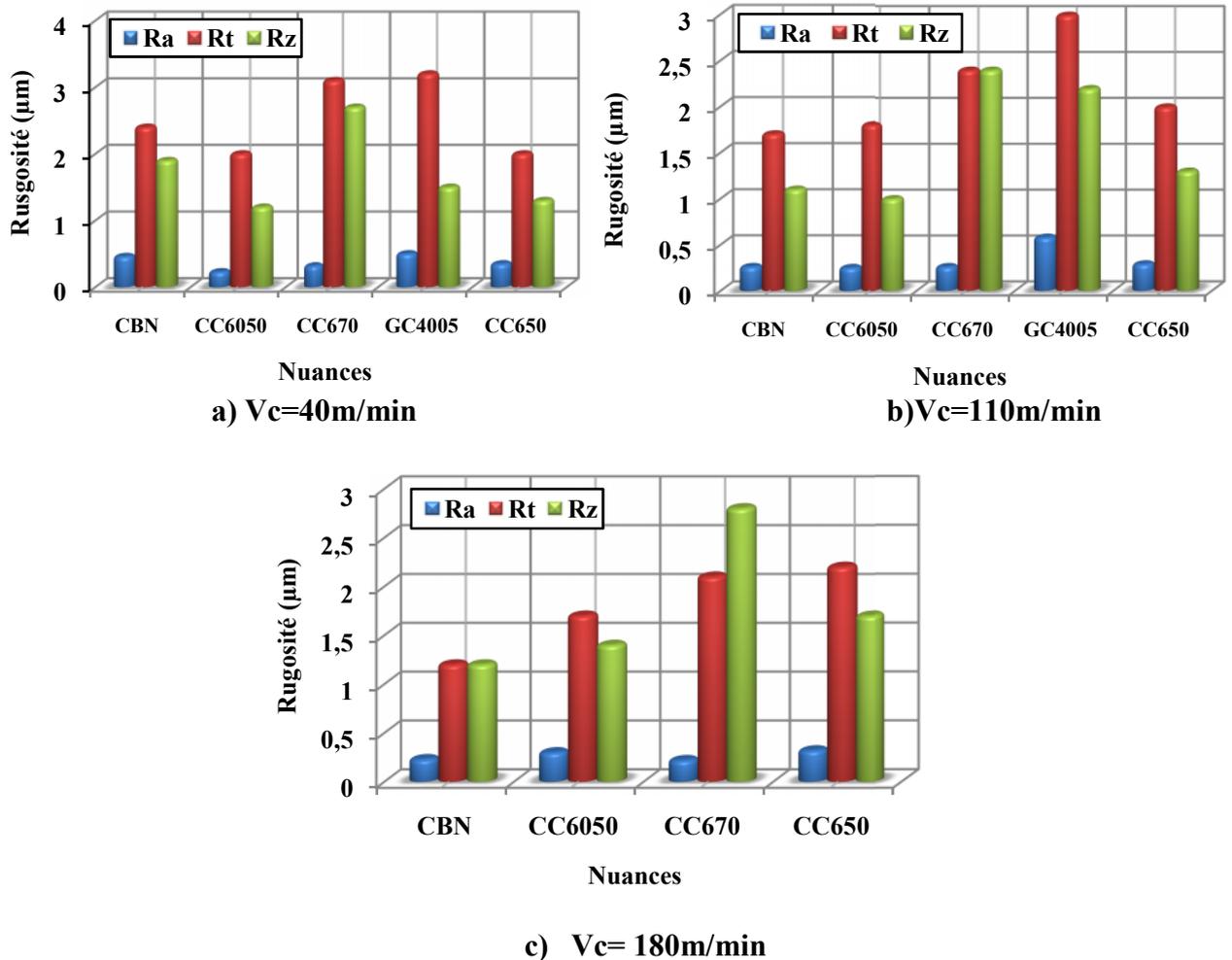


Figure IV.14 : comparaison entre les cinq nuances pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $ap=0.1\text{mm}$.

➤ **Effet de l'avance**

La figure (IV.15) montre que l'avance a une influence très significative, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Plus l'avance est élevée, plus profonds et plus larges ces sillons. En pratique, les conséquences de l'influence de l'avance sur la rugosité sont comme suit : l'augmentation de l'avance de (0.08 à 0.2) mm/tr, conduit à une augmentation des critères de rugosité (Ra, Rt et Rz) successivement de (176.74 ; 140 et 210)% pour le CBN, (392 ;393.57 et 20)% pour la céramique revêtue CC6050, (211.36 ; 151.42 et 55)% pour la céramique composite CC670, (237.31 ; 278.12 et 226.66)% pour le carbure GC4005, (181.08 ; 124 et 253.84)% pour la céramique mixte CC650. À 0.2mm/tr l'arête du carbure est endommagée totalement. Pour une augmentation de (0.2 à 0.28) mm/tr, on enregistre une augmentation des critères de rugosité de (42 ; 67.63 ; 78.83 et 121.13)% pour Ra, de (13.88 ; 43.27 ; 57.95 et 112.5)% pour Rt et enfin de (4.83; 133.33 ; 64.91 et 73.91)% pour Rz respectivement pour les différents matériaux (CBN; CC60 50 ; CC670 et CC650). On remarque que le critère Ra est le plus affecté par l'avance.

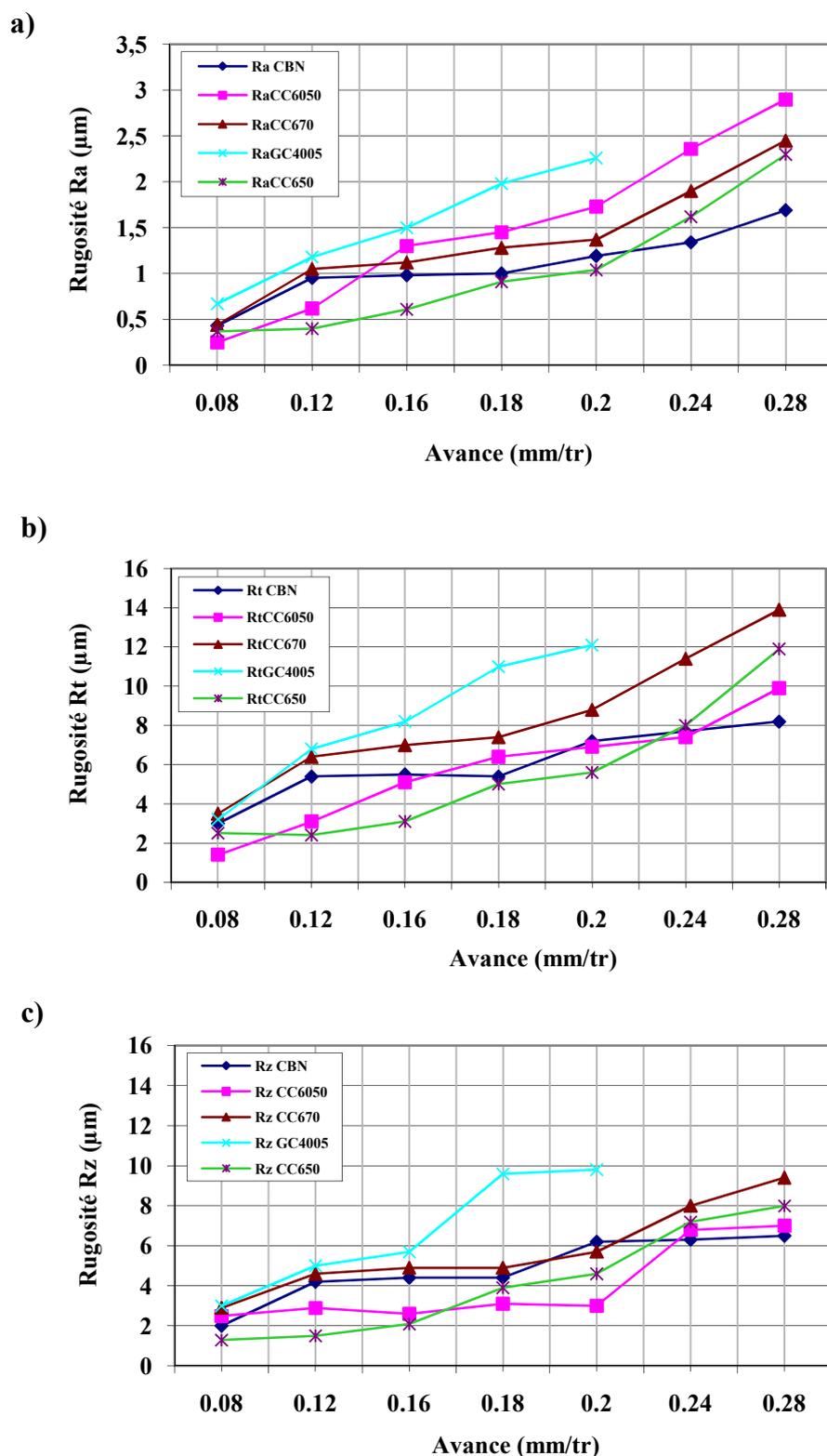
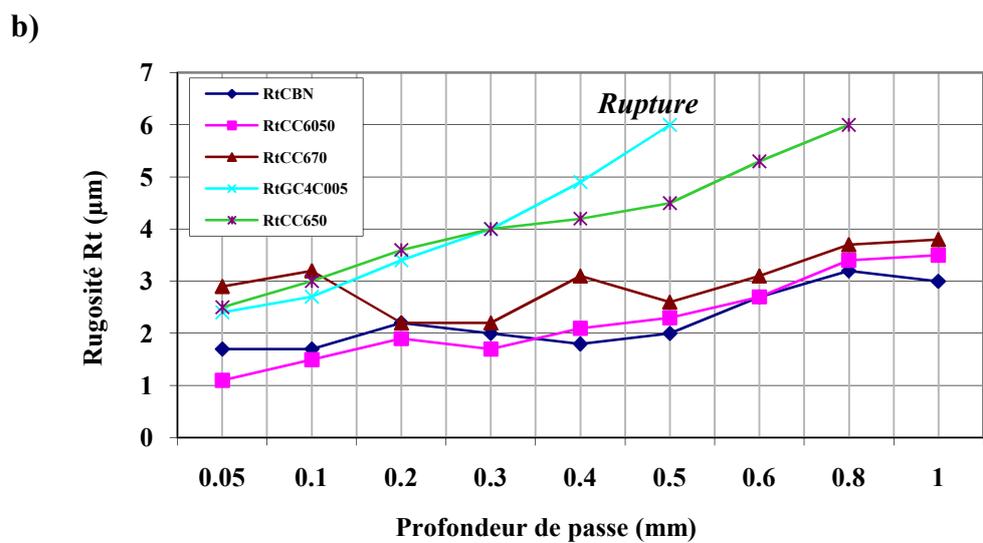
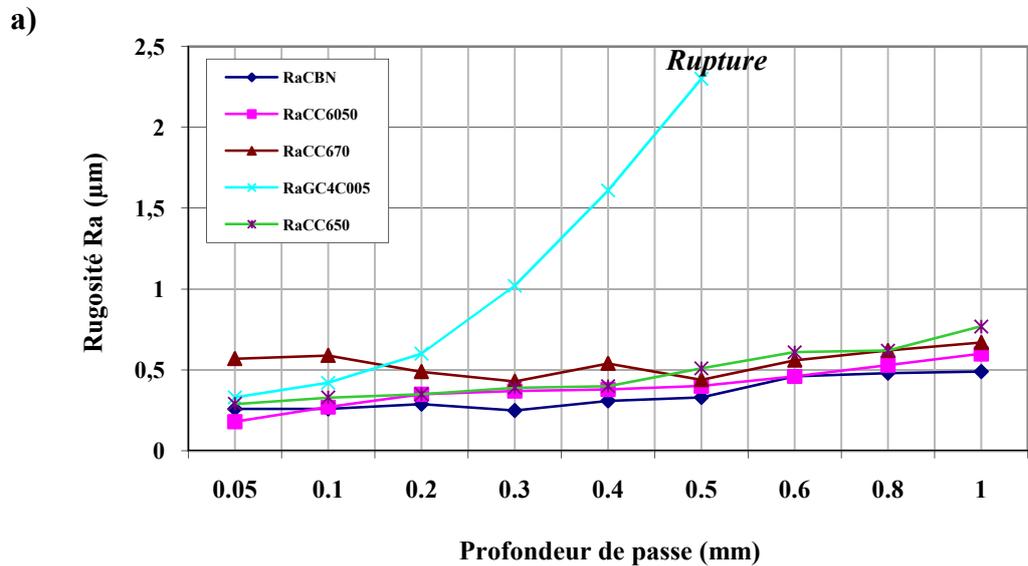


Figure IV.15 : Evolution de la rugosité en fonction de l'avance pour $V_c=110m/min$, $a_p=0.1mm$.

➤ **Effet de la profondeur de passe**

Figure (IV.16) présente l'évolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe. L'analyse des résultats montre que ce paramètre est moins important que l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la largeur de contact entre l'outil et la pièce. Ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe. Pour les valeurs de profondeur de passe prises de 0.05 à 0.5mm, on enregistre une augmentation des critères de rugosité de (26.2 ; 17.64 et 90) % pour le CBN, (122.22 ; 109.09 et 25)% pour la CC6050, (22.80 ; 10.34 et 4)% pour la CC670, (22.80 ; 10.34 et 105.55)% pour le GC4005, (596.96, 50.80 et 100)% pour la CC650, et à cette valeur de la profondeur de passe l'usure du carbure est à son maximum.



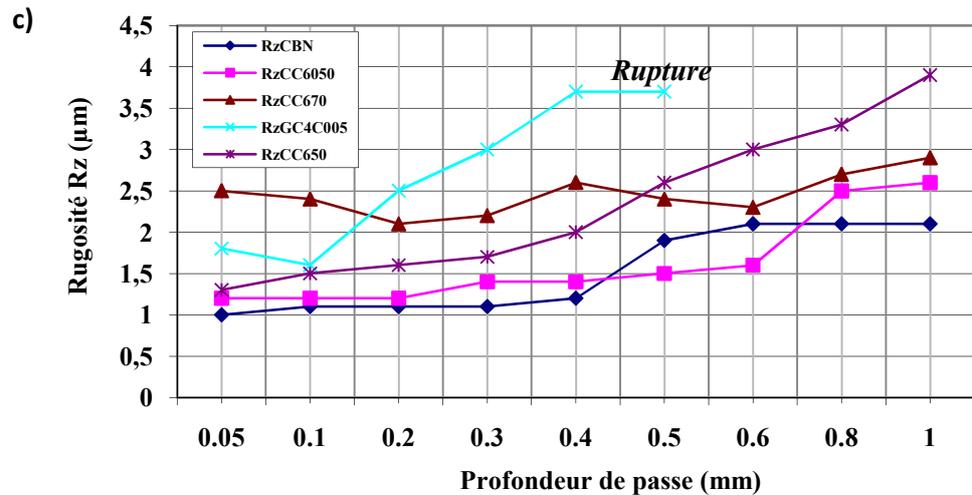


Figure IV16 : Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=110m/min$, $f=0.08mm/tr$.

Ce constat permet de recommander qu'il est toujours préférable d'augmenter la profondeur de passe au lieu de l'avance, si l'on veut augmenter le débit de copeau tout en gardant presque la même valeur de la rugosité [POU 99]. En comparant les valeurs des rugosités obtenues par les cinq matériaux de coupe utilisés, on remarque clairement que le CBN7020 est plus performant que les trois nuances de céramiques (CC6050, CC650, CC670). En effet aux mêmes conditions de coupe ($V_c=110m/min$, $a_p=0,1mm$ et $f=0,08mm/tr$) le ratio Ra_{CC6050}/Ra_{CBN} est de 1.03, le ratio Ra_{CC650}/Ra_{CBN} est de 1.26, le ratio Ra_{GC4005}/Ra_{CBN} est de 1.61 et le ratio Ra_{CC670}/Ra_{CBN} est de 2.26.

Globalement, les quatre outils de coupe considérés donnent lieu à des rugosités comparables à celles de la rectification ce qui permet de réduire les temps opératoires et les erreurs de reprise [BOU 97].

IV.5 Influence de la dureté sur l'effort de coupe, spécifique, résultant et la puissance de coupe

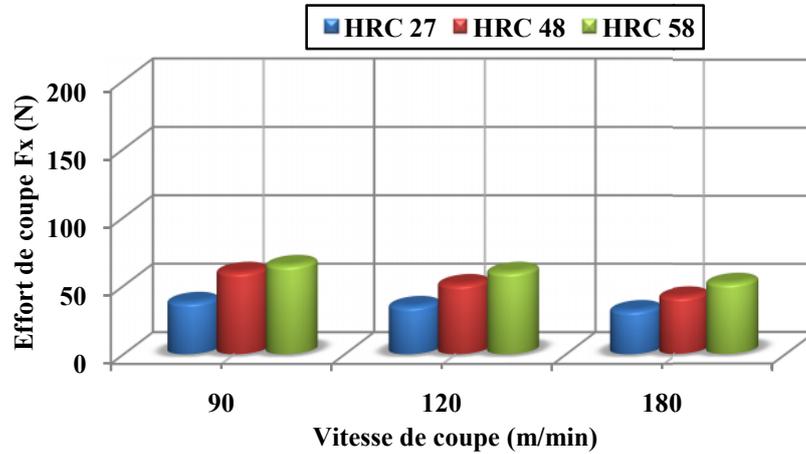
IV.5.1 Influence de la dureté sur les efforts de coupe

a) Effet de la vitesse de coupe

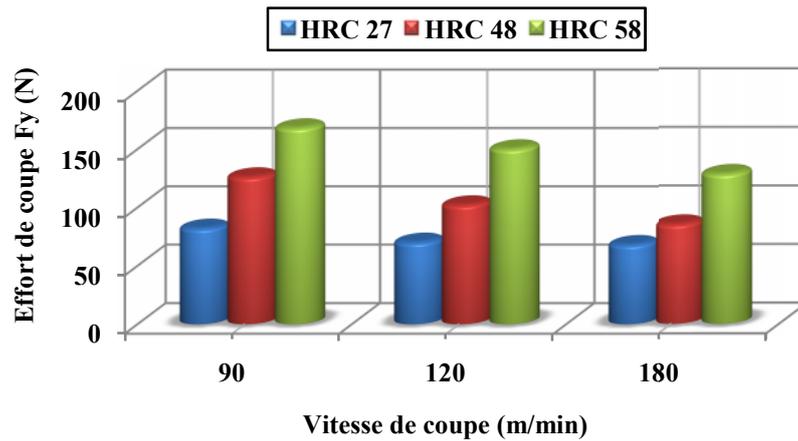
La figure IV.17 (a, b, c) illustre l'effet de la dureté de la pièce usinée pour trois vitesses de coupe sur les efforts de coupe. Avec l'augmentation de la dureté de la pièce usinée de (27 à 58) HRC, les trois composantes de l'effort de coupe augmentent. Par contre l'augmentation de la vitesse de coupe induit une diminution des trois composantes de l'effort de coupe. Cette diminution est expliquée par les effets de la température générée à l'interface outil-copeau. L'élévation de la vitesse coupe à $V_c=180m/min$ augmente la température d'interface outil-copeau ce qui adoucit le matériau usiné et réduit par conséquent les efforts de coupe. Pour l'effort axial F_x à $V_c=90m/min$, l'augmentation de la dureté de (27 à 58) HRC induit une élévation de F_x 71.05%. De la même manière, pour l'effort radial à $V_c=90m/min$,

l'augmentation de la dureté de 27 à 58HRC conduit une élévation de F_y de 104.87%. En dernier lieu, pour l'effort tangentiel F_z à $V_c=90\text{m/min}$, l'augmentation de la dureté de (27 à 58) HRC induit une élévation de F_z de 41.86%.

a)



b)



c)

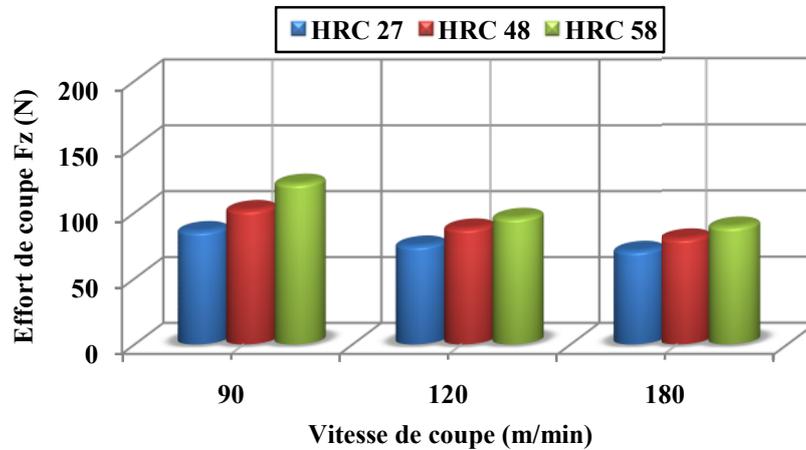
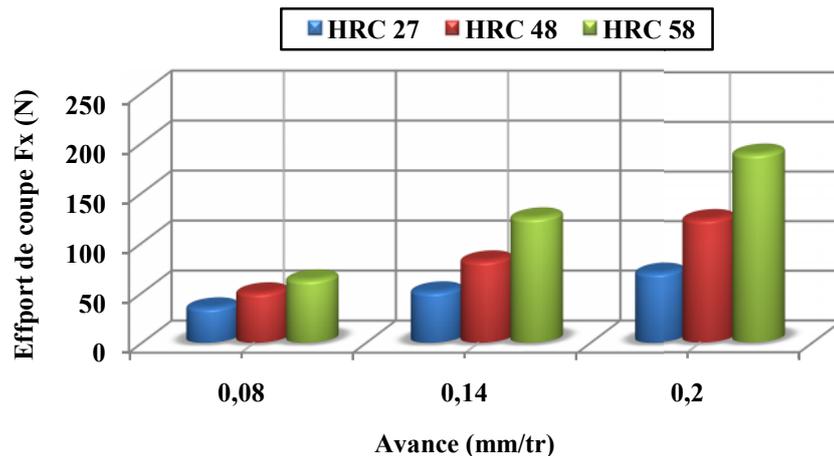


Figure IV.17: Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et de la vitesse de coupe pour $f=0.08\text{ mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{ mm}$.

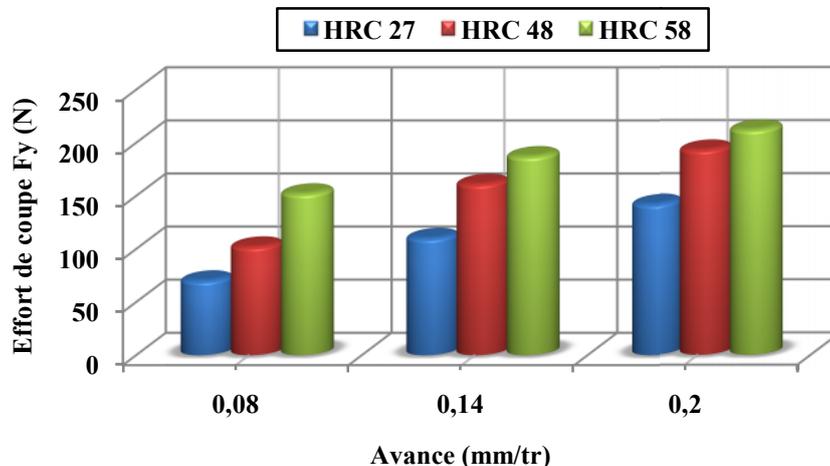
Effet de l'avance

La figure IV.18 (a, b, c) illustre l'effet de la dureté de la pièce usinée sur les composantes de l'effort de coupe pour trois avances. Avec l'augmentation de la dureté de la pièce usinée de 27 à 58 HRC et de l'avance de 0.08 à 0.2 mm/tr, les composantes de l'effort de coupe, principalement l'effort de pénétration, augmentent. Ceci peut être expliqué, par l'augmentation de la limite d'élasticité du matériau usinée due à l'augmentation de sa dureté. Pour une avance de 0.08mm/tr et lorsque la dureté passe de 27HRC à 58HRC, cela induit une augmentation des composantes (F_x , F_y , F_z) successivement de (80%, 117.14%, 30.66%). Pour l'avance $f=0.2$ mm/tr et l'augmentation de la dureté de 27HRC à 58HRC, cela entraîne une augmentation des trois composantes (F_x , F_y , F_z) les composantes de l'effort de coupe augmentent successivement de (171.42%, 49.29%, 27.27%).

a)



b)



c)

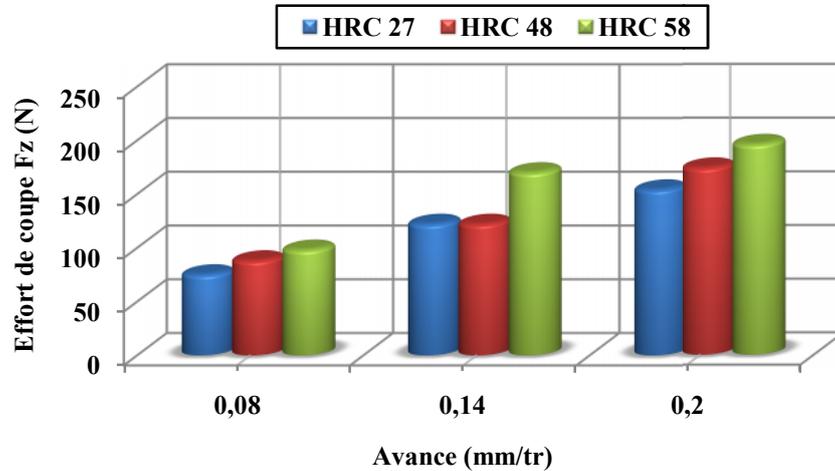
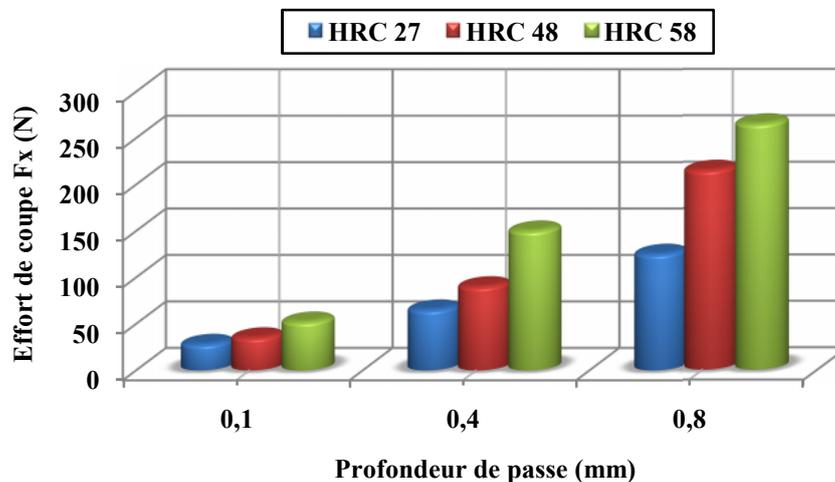


Figure IV.18 : Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et de l'avance pour $V_c=120$ m/min et $a_p=0.2$ mm.

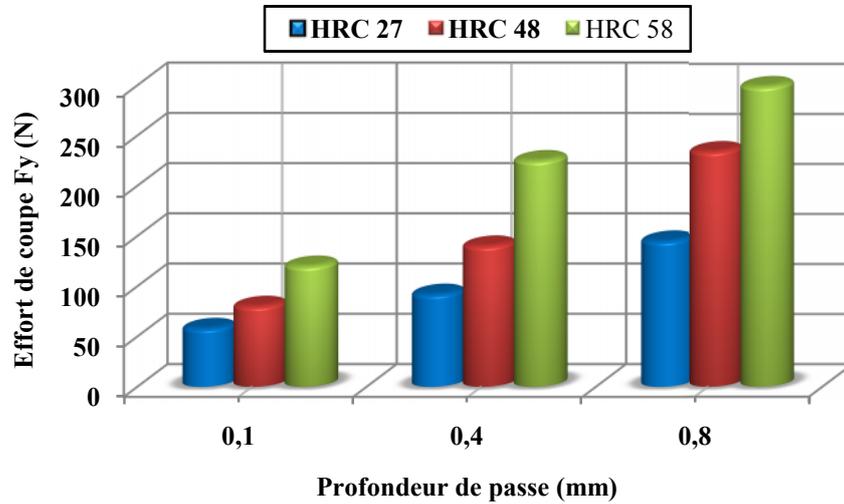
a) Effet de la profondeur de passe

La figure IV.19 (a, b, c) illustre l'effet de la dureté de la pièce usinée pour trois profondeurs de passe sur les composantes de l'effort de coupe. L'analyse des résultats montre qu'avec l'augmentation de la dureté de la pièce usinée et de la profondeur de coupe, les trois composantes de l'effort de coupe augmentent. Une élévation de la dureté de 27 à 58 HRC conduit à une augmentation des trois composantes (F_x , F_y , F_z) respectivement (85.71; 106.89 ; 29.03)% pour une profondeur de passe $a_p=0.1$ mm, de (130.76 ; 144.56 ; 76.19)% pour une profondeur de passe $a_p=0.4$ mm et (112 ; 110.34 ; 55.26)% pour $a_p=0.8$ mm.

a)



b)



c)

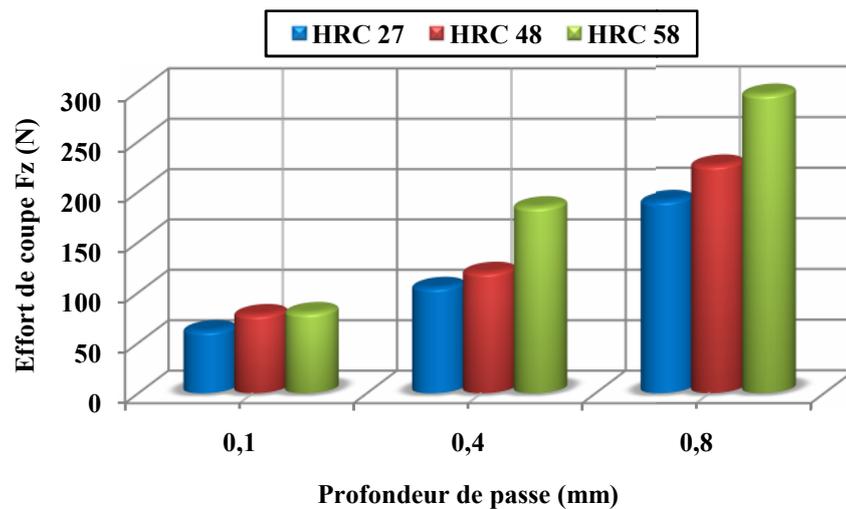


Figure IV.19: Evolution des efforts de coupe en fonction de la dureté et de la profondeur de passe pour $V_c=120 \text{ m/min}$ et $f=0.08\text{mm/tr}$.

IV.5.2 Influence de la dureté sur l'effort spécifique et résultant

a) Effet de la vitesse de coupe

La figure (IV.20) présente l'évolution de l'effort résultant en fonction de la dureté pour trois vitesses de coupe. L'analyse des résultats montre une décroissance de l'effort résultant avec l'augmentation de la vitesse de coupe, par contre l'augmentation de la dureté de 27 à 58 HRC conduit à une augmentation des efforts de coupe. A la vitesse $V_c=90 \text{ m/min}$ l'effort

résultant est de (124.75; 172.85; 217.56) N respectivement aux différentes duretés (27; 48; 58) HRC. L'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à 180m/min conduit à une diminution de l'effort résultant de (103.38 ; 124.05 ; 164.34) N. De la même manière, l'augmentation de la dureté induit une augmentation de l'effort résultant pour les trois vitesses testées. La figure (IV.21) montre l'élévation de l'effort spécifique en fonction de l'augmentation de la dureté. Avec l'augmentation de la dureté les composantes de l'effort spécifique augmentent. Mais, en même temps l'élévation de la vitesse de coupe conduit à une diminution des efforts spécifiques.

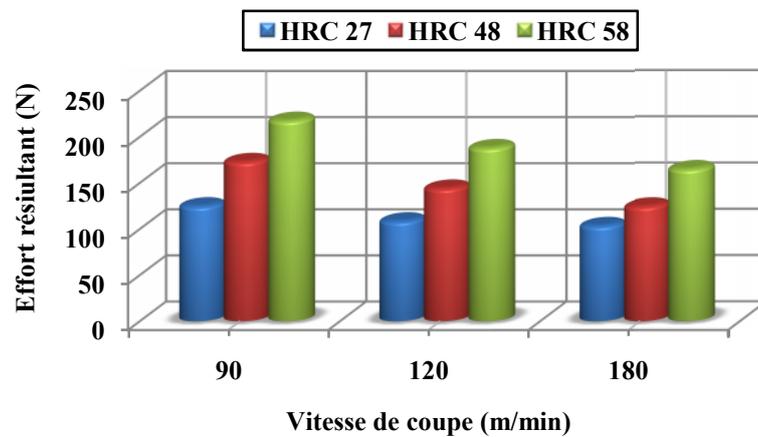


Figure IV.20: Evolution de l'effort résultant en fonction de la dureté et de la vitesse de coupe pour $f=0.2 \text{ mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.

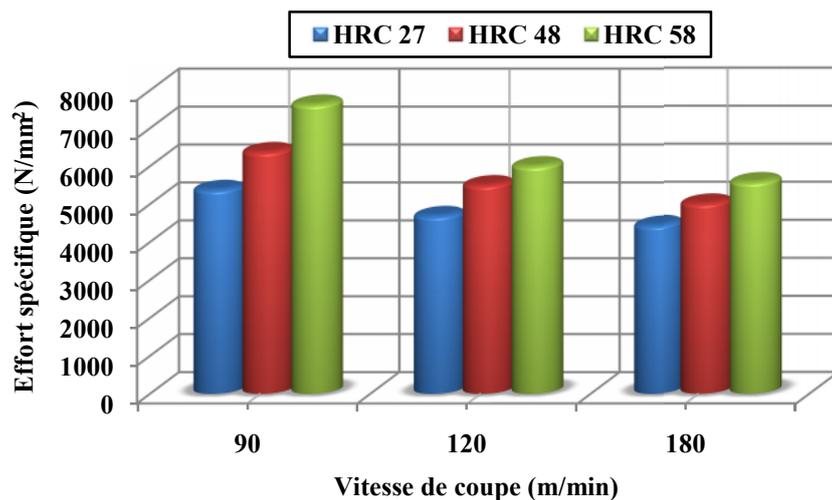


Figure IV.21: Evolution de l'effort spécifique en fonction de la dureté et de la vitesse de coupe pour $f=0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.

b) Effet de l'avance

La figure (IV.22) présente l'évolution de l'effort résultant en fonction de la dureté pour trois avances. L'analyse des résultats montre une croissance de l'effort résultant avec l'augmentation de l'avance. Pour l'avance $f=0.08\text{mm/tr}$, l'effort résultant est de (108.39; 143.69; 191.51) N respectivement aux différentes duretés (27; 48; 58) HRC. Pour une augmentation de l'avance de (0.08 à 0.2) mm/tr, on a enregistré un taux d'élévation pour l'effort résultant (103.79 ; 100.37 ; 80.43)% respectivement pour (27 ; 48 ; 58) HRC. De la même façon, l'augmentation de dureté entraîne une augmentation des composantes de l'effort résultant pour les trois avances testées.

La figure (IV.23) montre l'évolution de l'effort spécifique en fonction de la dureté pour trois avances. Avec l'augmentation de l'avance les composantes de l'effort spécifique diminuent. Pour une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.2 mm/tr, on a une diminution de l'effort spécifique de (17.86 ; 20.90 ; 20) %. Par contre avec l'augmentation de la dureté de 27HRC à 58 HRC à $f=0.08\text{mm/tr}$, l'effort spécifique augmente de (30.66%).

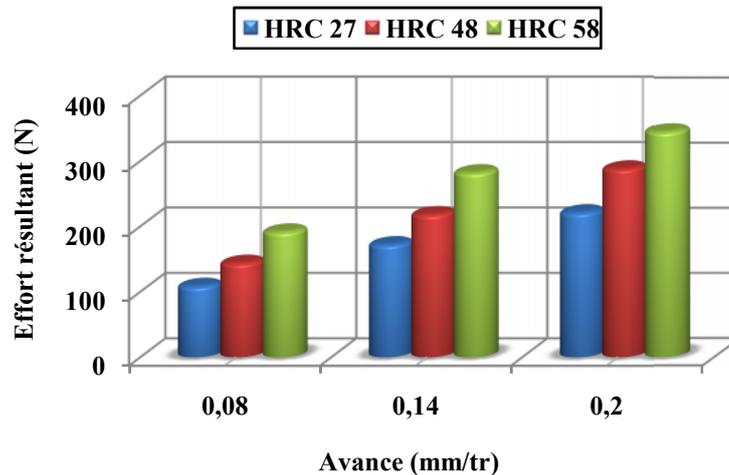


Figure IV. 22: Evolution de l'effort résultant en fonction de la dureté et de l'avance pour $V_c=120\text{ m/min}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.

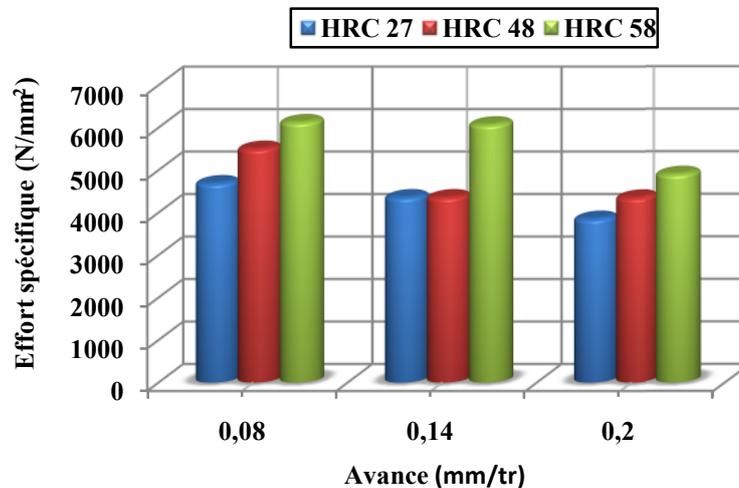


Figure IV.23: Evolution de l'effort spécifique en fonction de la dureté et de l'avance pour $V_c=120\text{ m/min}$ et $a_p=0.2\text{mm}$.

c) Effet de la profondeur de passe

La figure (IV.24) présente l'évolution de l'effort résultant en fonction de la dureté pour trois profondeurs de passe. L'analyse des résultats montre avec l'augmentation de la profondeur de passe et de la dureté l'effort résultant augmente.

La figure (IV.25) montre l'évolution de l'effort spécifique en fonction de la dureté pour trois profondeurs de passe. Avec l'augmentation de la profondeur de passe de 0.1 à 0.8 mm l'effort spécifique diminue de (61.69 ; 63.94 ; 53.90) % respectivement pour (27 ; 48 ; 58) HRC. Tout fois, l'augmentation de la dureté de la pièce de (27 à 58) HRC induit une augmentation de l'effort spécifique de 29.03% pour la profondeur de passe $a_p=0.1\text{mm}$. De la même manière l'augmentation de la dureté de (27 à 58) HRC conduit une augmentation de l'effort spécifique de 55.26% pour $a_p=0.8\text{mm}$.

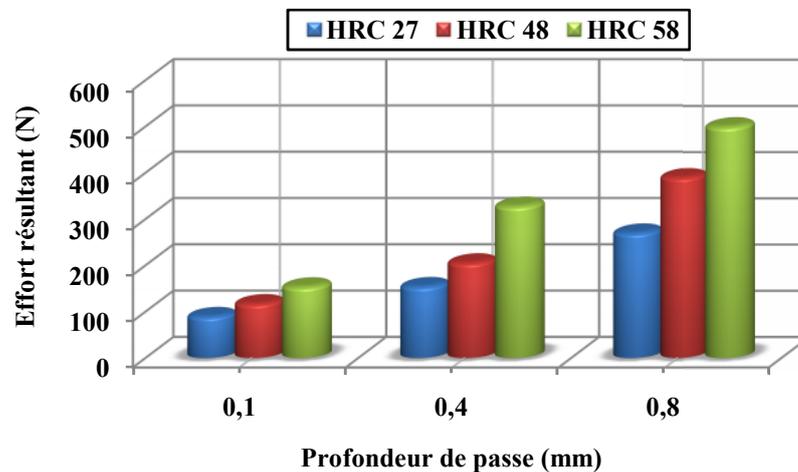


Figure IV.24: Evolution de l'effort résultant en fonction de la dureté et de la profondeur de passe pour $V_c= 120\text{ m/min}$ et $f=0.08\text{mm/tr}$.

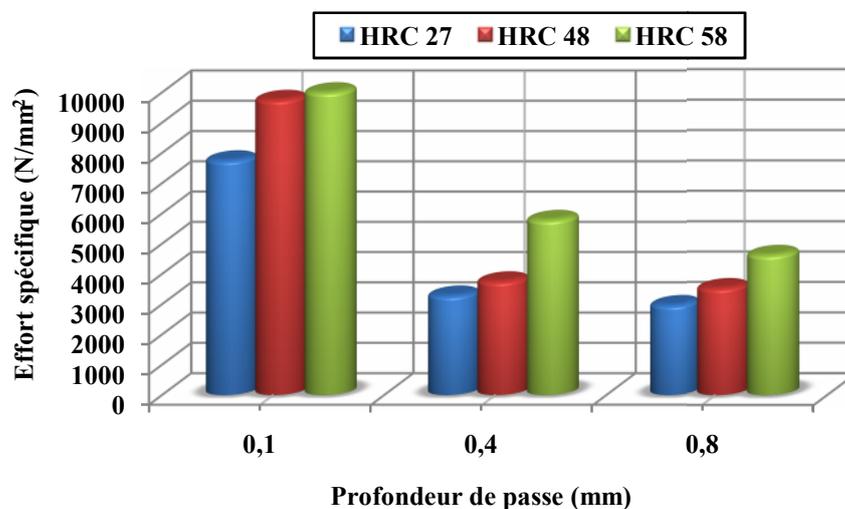
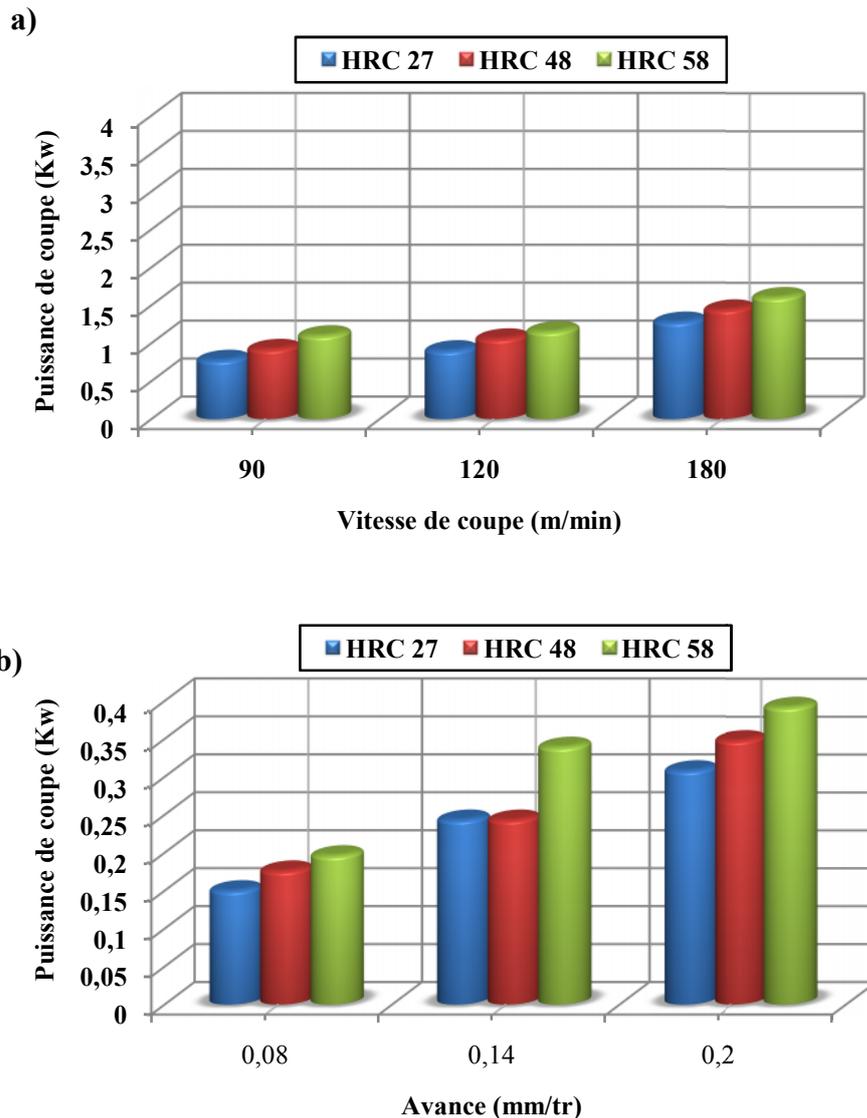


Figure IV.25: Evolution de l'effort spécifique en fonction de la dureté et de la profondeur de passe pour $V_c= 120\text{ m/min}$ et $f=0.08\text{mm/tr}$.

IV.5.3 Influence de la dureté sur la puissance de coupe

La figure IV.26 (a, b, c) présente l'évolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , a_p et H). L'analyse des résultats montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe de (90 à 180) m/min, l'avance de (0.08 à 0.2) mm/tr, la profondeur de passe de (0.1 à 0.8) mm et de la dureté de (27 à 58) HRC, la puissance de coupe augmente respectivement de (64.41%; 45.90%) pour la vitesse de coupe, de (105.33% ; 100%) pour l'avance et de (206.45% ; 180.95%) pour la profondeur de passe.



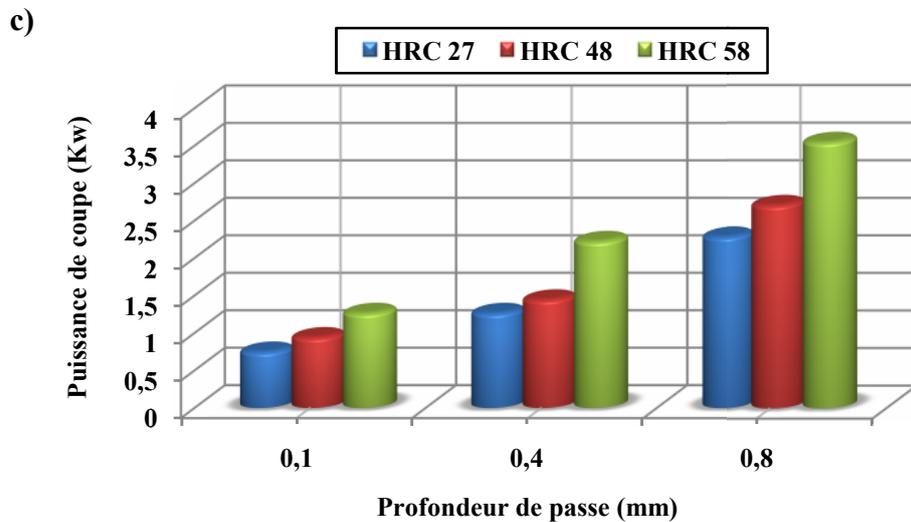
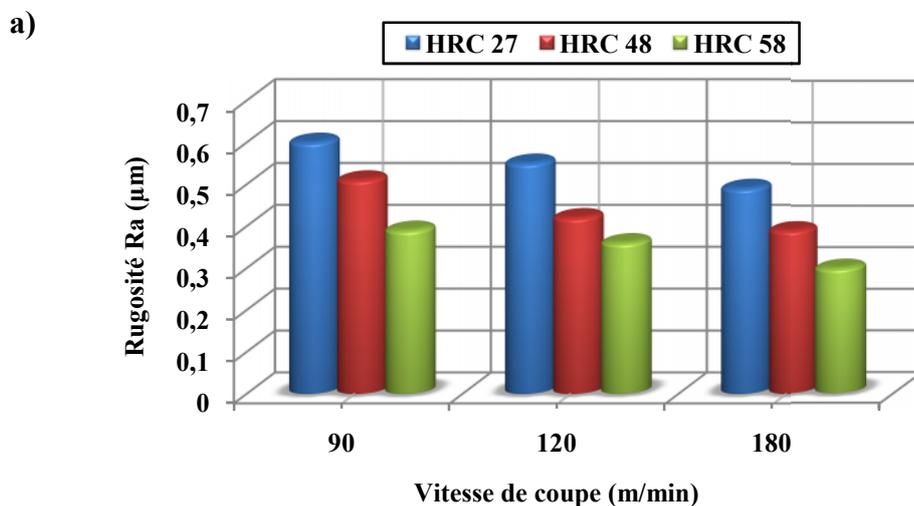


Figure IV.26: Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe et de la dureté : a) en fonction de la vitesse de coupe, b) en fonction de l'avance, c) en fonction de la profondeur de passe.

IV.6 Influence de la dureté de la pièce sur la rugosité

a) Effet de la vitesse de coupe

La figure IV.27 (*a, b, c*) présente l'effet simultané de la dureté et de la vitesse de coupe sur la rugosité. L'analyse des résultats montre que les valeurs des trois critères de la rugosité diminuent avec l'augmentation de la dureté et de la vitesse de coupe. A la vitesse de 90m/min le ratio (Ra_{27HRC}/Ra_{48HRC}) est de 1.17, avec l'augmentation de la dureté le ratio (Ra_{27HRC}/Ra_{58HRC}) passe à 1.53. De la même manière à la vitesse 180m/min avec l'augmentation de la dureté le ratio (Ra_{27HRC}/Ra_{48HRC}) est égale à 1.25, avec l'augmentation de la dureté le ratio (Ra_{27HRC}/Ra_{58HRC}) passe à 1.63.



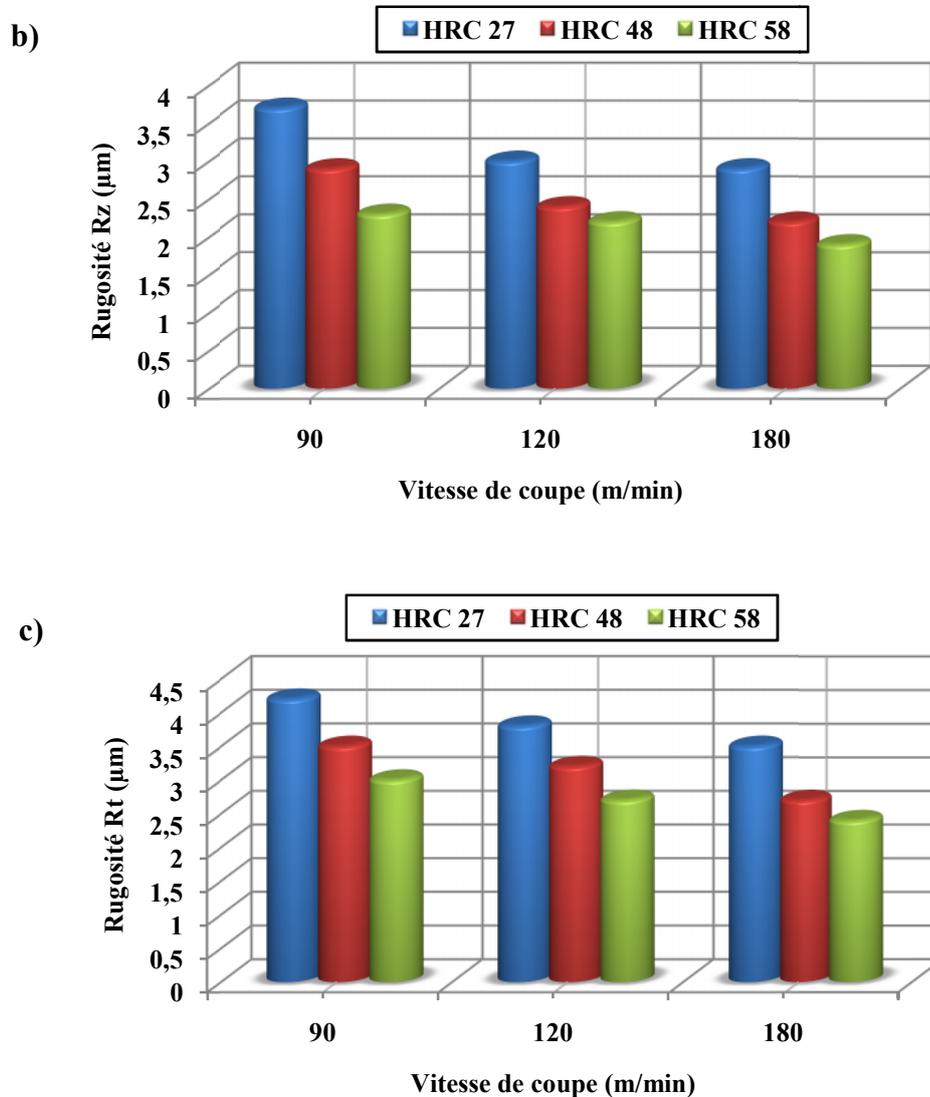
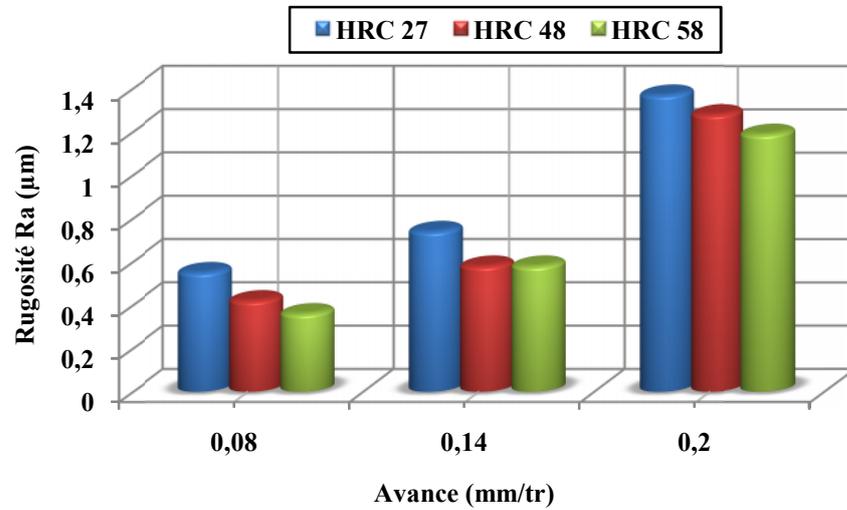


Figure IV.27: Impact simultané de la dureté et de la vitesse de coupe sur la rugosité pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$.

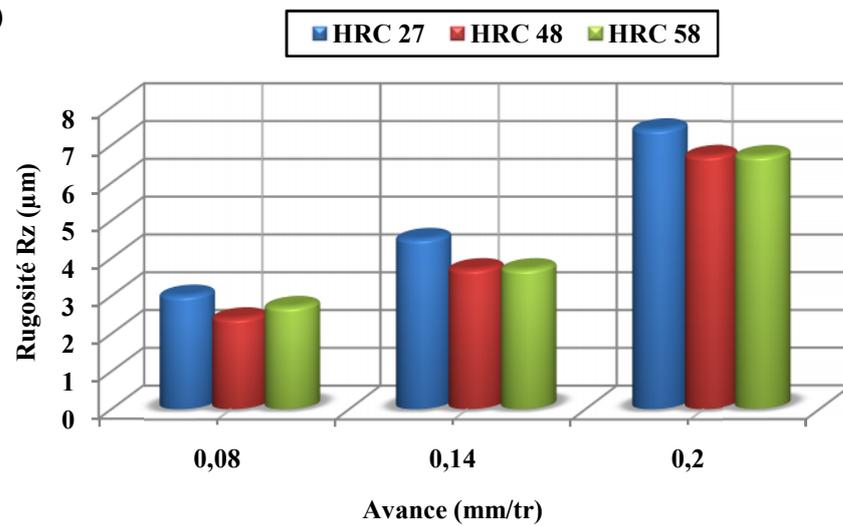
b) Effet de l'avance

La figure IV.28 (a, b, c) présente l'effet de la dureté de la pièce sur les différents critères de rugosité et cela pour trois avances choisies. L'analyse des résultats montre que la rugosité augmente avec l'augmentation de l'avance mais avec l'augmentation de la dureté les valeurs des trois critères (Ra, Rz, Rt) de la rugosité diminuent. Pour une valeur de l'avance $f=0.14\text{mm/tr}$, l'augmentation de la dureté de 27 à 58 HRC entraîne une diminution de (21.62, 17.7, 37.73)% respectivement pour (Ra, Rz, Rt). Avec une avance de 0,08 mm/tr, la rugosité est de (0.55 ; 3 ; 3.8) μm pour (Ra, Rz, Rt). Avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0,2 mm/tr, la rugosité augmente successivement de 149.09% ; 146.66% et 166.84%.

a)



b)



c)

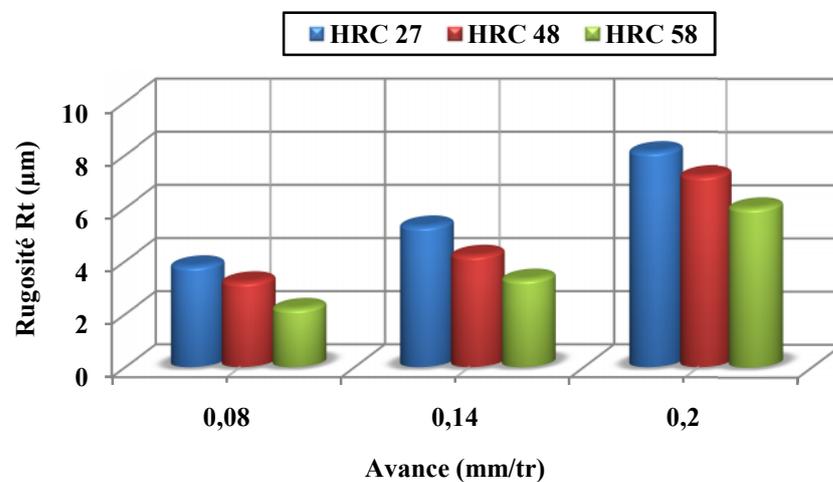
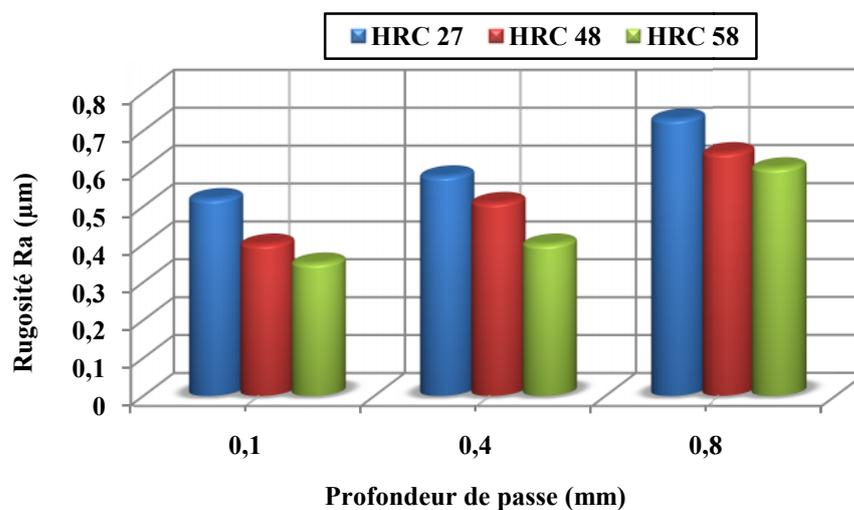


Figure IV.28: Impact simultané de la dureté et de l'avance sur la rugosité pour $V_c=120m/min$, $a_p=0.2mm$.

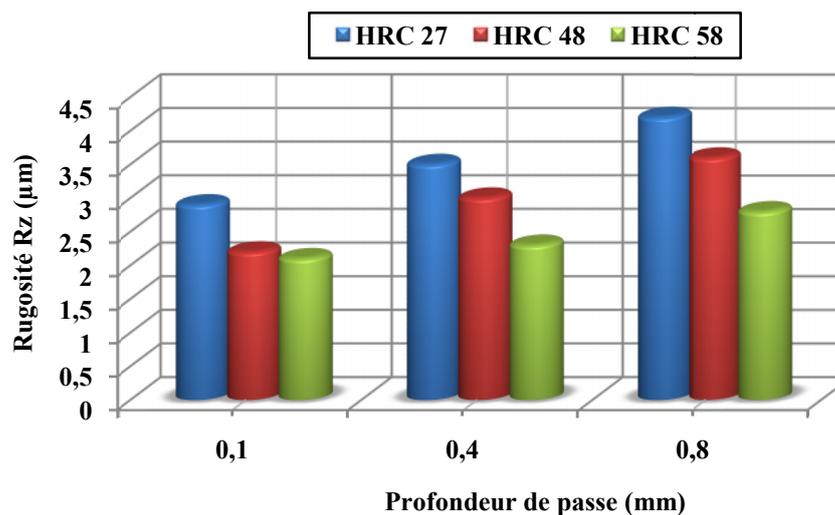
c) Effet de la profondeur de passe

La figure IV.29 (a, b, c) présente l'évolution de la rugosité en fonction de la dureté de la pièce pour trois profondeurs de passe. D'après cette figure on remarque qu'avec l'augmentation de la profondeur de passe la rugosité se dégrade, mais s'améliore avec l'augmentation de la dureté.

a)



b)



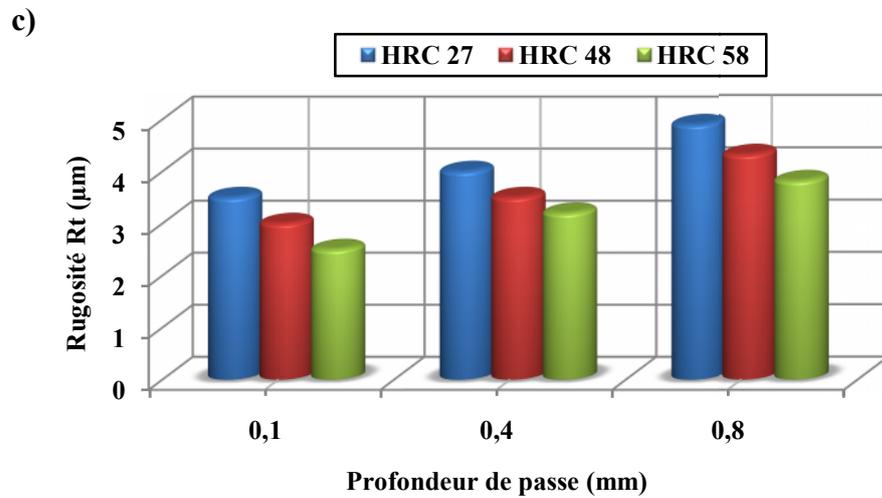


Figure IV.29: Impact simultané de la dureté et de la profondeur de passe sur la rugosité pour $V_c=120m/min$, $f=0.08mm/tr$.

Pour conclure ce point, on peut dire que l'augmentation de la dureté de la pièce montre clairement une diminution de la rugosité de surface. Cette conclusion est valable pour tous les essais réalisés (différentes avances, vitesses de coupe et profondeurs de passe).

IV.7 Modélisation des paramètres technologiques de la coupe

IV.7.1 Modélisation des efforts de coupe

Les essais relatifs à l'étude de l'influence des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (*vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et dureté de la pièce*) ensemble sur les efforts de coupe et pressions spécifiques, ont permis l'obtention des résultats reportés sur le tableau (IV.1).

N° Essai	f (mm/tr)	a_p (mm)	V_c (m/min)	H (HRC)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	K_{cx} (N/mm ²)	K_{cy} (N/mm ²)	K_{cz} (N/mm ²)
1	0.08	0.2	90	48	60	100	80	3750	6250	5000
2	0.2	0.2	90	48	100	190	150	2500	4750	3750
3	0.08	0.6	90	48	175	140	200	1875	3645.8	4166.6
4	0.2	0.6	90	48	230	300	255	1916.6	2500	2125
5	0.08	0.2	180	48	55	85	75	23427.5	5312.5	4687.5
6	0.2	0.2	180	48	100	160	140	2500	4000	3500
7	0.08	0.6	180	48	155	215	180	3229.1	4375	3750
8	0.2	0.6	180	48	210	285	230	1500	2375	1916.6
9	0.08	0.2	90	58	90	200	110	5625	12500	6875
10	0.2	0.2	90	58	140	245	180	3500	5000	4500
11	0.08	0.6	90	58	200	380	230	4166.6	7916.6	4791.6
12	0.2	0.6	90	58	260	320	275	2166.6	2666.6	2291.6
13	0.08	0.2	180	58	80	180	100	5000	6875	6250
14	0.2	0.2	180	58	110	230	170	2750	5750	4250
15	0.08	0.6	180	58	170	240	200	3541.6	500	4166.6
16	0.2	0.6	180	58	220	280	245	1833.3	2333.3	2041.6

Tableau IV.1 : Résultats des efforts de coupe et les pressions spécifiques en fonction des conditions de coupe pour un plan 2⁴.

Les résultats du tableau (IV.1) sont nécessaires pour la détermination des modèles mathématiques des efforts de coupe et des pressions spécifiques en fonction des conditions de coupe. Le modèle proposé a la forme de l'équation suivante:

$$F_i = C_1 \cdot f^{K1} \cdot a_p^{K2} \cdot V_c^{K3} \cdot H^{K4} \dots\dots\dots(IV.1)$$

Où :

K_1, K_2, K_3, K_4 sont des coefficients qui indiquent le degré d'influence de chaque facteur examiné sur les efforts de coupe et les pressions de coupe.

C_1 : constante qui tient compte des paramètres qui ne figurent pas dans l'équation.

Le traitement des résultats par la méthode de moindre carrée nous a permis de déterminer les différents modèles mathématiques des efforts de coupe et des pressions spécifiques en fonction des paramètres du régime de coupe et de la dureté de la pièce (Tableau IV.1).

paramètres coupe	facteurs variables	Modèles mathématiques	Coefficient de détermination R2
Effort de coupe	f	$F_x = e^{4.61978} \cdot f^{0.40464} \cdot ap^{0.74479} \cdot Vc^{-0.17815} \cdot H^{0.69824}$	$R^2=0.9604$
	ap	$F_y = e^{3.00187} \cdot f^{0.30145} \cdot ap^{0.48138} \cdot Vc^{-0.22673} \cdot H^{1.16316}$	$R^2=0.8531$
	Vc	$F_z = e^{4.90557} \cdot f^{0.42912} \cdot ap^{0.57332} \cdot Vc^{-0.13522} \cdot H^{0.59372}$	$R^2=0.9975$
efforts spécifiques (pressions spécifique)	f	$K_{cx} = e^{4.61978} \cdot f^{0.40464} \cdot ap^{0.74479} \cdot Vc^{-0.17815} \cdot H^{0.69824}$	$R^2=0.9504$
	ap	$K_{cy} = e^{3.00187} \cdot f^{0.30145} \cdot ap^{0.48138} \cdot Vc^{-0.22673} \cdot H^{1.16316}$	$R^2=0.8978$
	Vc	$K_{cz} = e^{4.90557} \cdot f^{0.42912} \cdot ap^{0.57332} \cdot Vc^{-0.13522} \cdot H^{0.59372}$	$R^2=0.9571$

Tableau IV.2: Modèles mathématiques des efforts de coupe et des pressions spécifiques.

L'analyse des modèles mathématiques (tableau IV.2), permet de définir avec plus de précision les tendances ainsi que les degrés d'influence des différents facteurs du régime de coupe (Vc, f, a_p et H), sur les trois composantes de l'effort de coupe et les pressions spécifiques. A cet effet, l'analyse des exposants des différents modèles trouvés avec le CBN 7020 lors de l'usinage de l'acier AISI D3, fait sortir que l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à la diminution des efforts de coupe, alors que l'augmentation de la section du copeau ($f \times a_p$) et de la dureté de la pièce contribuent à l'accroissement des efforts de coupe. D'autre part, le classement des exposants des différents modèles trouvés en valeur absolue exprime le degré d'influence de chaque facteur des éléments du régime de coupe sur les efforts de coupe. Par conséquent, la plus grande influence est réservée à la dureté et la profondeur de passe suivie par l'avance. Par contre la vitesse de coupe a une influence relativement faible. Les coefficients de détermination des différents modèles sont élevés et convergent vers l'unité. Ceci indique qu'ils sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux. L'intérêt industriel des modèles mathématiques trouvés est de taille, car ils permettent la détermination des conditions de coupe optimales et donnent des renseignements précieux sur le processus de coupe.

IV.7.2 Modélisation de la rugosité

Pour étudier l'impact des conditions de coupe (V_c , f , a_p et H) sur la rugosité de la surface usinée, nous avons dressé un plan factoriel de 4 facteurs, chaque facteur varie à deux niveaux. Les résultats obtenus des différents critères de la rugosité sont présentés au tableau IV.3.

N° Essai	f (mm/tr)	a_p (mm)	V_c (m/min)	H (HRC)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)
1	0.08	0.2	90	48	0.51	2.9	3.5
2	0.2	0.2	90	48	1.46	6.9	7.5
3	0.08	0.6	90	48	0.56	3.1	3.9
4	0.2	0.6	90	48	1.49	7.1	7.8
5	0.08	0.2	180	48	0.45	2.5	3.2
6	0.2	0.2	180	48	1.33	6.6	7.2
7	0.08	0.6	180	48	0.48	2.7	3.4
8	0.2	0.6	180	48	1.40	6.8	7.5
9	0.08	0.2	90	58	0.39	2.2	3.2
10	0.2	0.2	90	58	1.26	6	6.9
11	0.08	0.6	90	58	0.44	2.5	3.5
12	0.2	0.6	90	58	1.32	6.2	7.5
13	0.08	0.2	180	58	0.3	1.9	2.5
14	0.2	0.2	180	58	1.15	6.3	6.8
15	0.08	0.6	180	58	1.36	2.1	2.7
16	0.2	0.6	180	58	1.2	6.5	7

Tableau IV.3: Résultats de la rugosité en fonction des différentes combinaisons du régime de coupe pour un plan 2^4 .

L'analyse des résultats du tableau IV.3 montre que la rugosité minimale est obtenue avec le régime 13 avec une vitesse de coupe maxi, une avance mini, une profondeur de passe mini et en dernier lieu une dureté maximale. Le traitement des résultats expérimentaux obtenus aux tableaux IV-3 par la méthode des moindres carrées, nous a permis de déterminer des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre les différents critères de rugosité et les conditions de coupe (tableau IV.4).

paramètres coupe	Facteurs variables	Modèles mathématiques	Coefficient de détermination R ²
Rugosité	f	$Ra=e^{3.1417} \cdot f^{1.0469} \cdot ap^{0.222} \cdot Vc^{0.0441} \cdot H^{-0.2916}$	R ² =0.771
	ap	$Rz=e^{6.6874} \cdot f^{0.8923} \cdot ap^{0.0601} \cdot Vc^{-0.1617} \cdot H^{-0.6103}$	R ² =0.984
	Vc	$Rt=e^{7.8060} \cdot f^{1.0682} \cdot ap^{0.0562} \cdot Vc^{-0.1080} \cdot H^{-0.9142}$	R ² =0.985

Tableau IV.4: Modèles mathématiques de la rugosité.

L'analyse des modèles mathématiques (tableau IV.4), montre clairement que l'augmentation de la vitesse de coupe et de la dureté de la pièce entraîne une diminution de la rugosité, alors que l'avance et la profondeur de passe entraîne une augmentation de la rugosité. L'analyse des exposants des différents facteurs montre que l'avance est le facteur qui influe sur la rugosité suivi par la dureté de la pièce et en dernier lieu la vitesse de coupe et la profondeur de passe.

IV.8 Température de coupe

En tournage dur de l'acier AISI D3, l'usinage est caractérisé par un écoulement de copeau très chaud, de couleur rouge surtout aux vitesses de coupe élevées. La quantité de chaleur dégagée est le résultat des frottements, des déformations plastiques intenses et des cisaillements. La figure (IV.30) présente les valeurs des températures (outil, copeau et pièce) enregistrées après un temps de coupe de 1.5 min. Les mesures des températures par pyromètre infrarouge indiquent qu'à la vitesse de 320 m/min, la température du copeau est de 580°C, sur la surface d'attaque de l'outil est de 70°C et elle ne dépasse pas 40°C sur la pièce. Il est conclu que la majeure partie de la chaleur générée du processus de coupe est évacuée à travers le copeau. Ceci s'explique par le fait qu'en plus du frottement, le copeau subit des déformations plastiques très intenses pour un volume plus faible par rapport à celui de la pièce et de l'outil, cela est confirmé par d'autres études [O'SU 01] et [BAC 99].

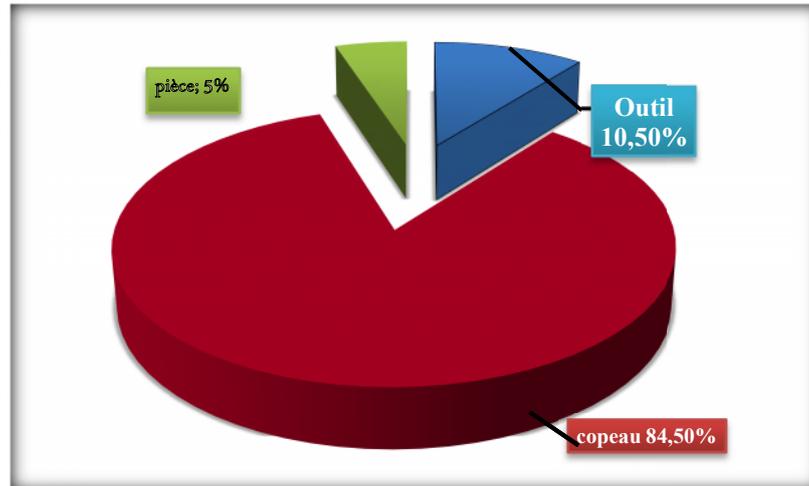
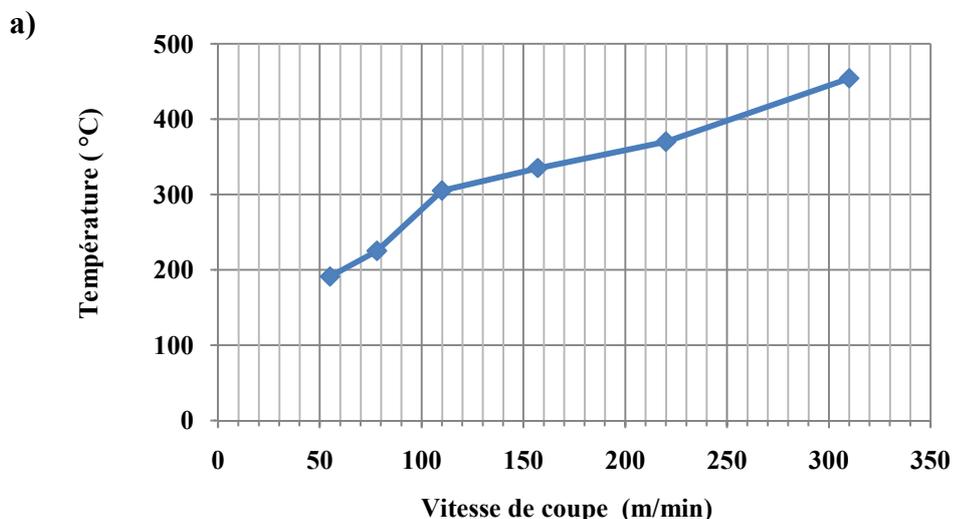


Figure IV.30: Température de coupe mesurée pendant un temps 1.5min d'usinage pour $V_c=320\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.5\text{mm}$.

La figure IV.31 (*a, b, c*) illustre l'évolution de la t° maximale enregistrée dans la zone de coupe en fonction de la variation des paramètres de coupe (V_c, f et a_p) [BOU06]. L'analyse des résultats montre une nette augmentation de la t° de coupe lorsque l'un des paramètres de coupe (V_c, f, a_p) augmente. Cette augmentation de la t° de coupe est attribuée aux frottements et aux déformations générés par le processus de coupe et qui s'établissent dans le voisinage de la pointe de l'outil CBN. En pratique, les conséquences de l'influence des paramètres de coupe sur la t° de coupe obtenue lors de l'usinage avec le CBN peuvent être résumées comme suit : l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.22 mm/tr et celle de la profondeur de passe de 0.05 à 0.8 mm font accroître respectivement la t° de coupe de 1.17 et 2.85 fois, alors que l'accroissement de la vitesse de coupe de 60 à 310 m/min la fait augmenter de 2.37 fois



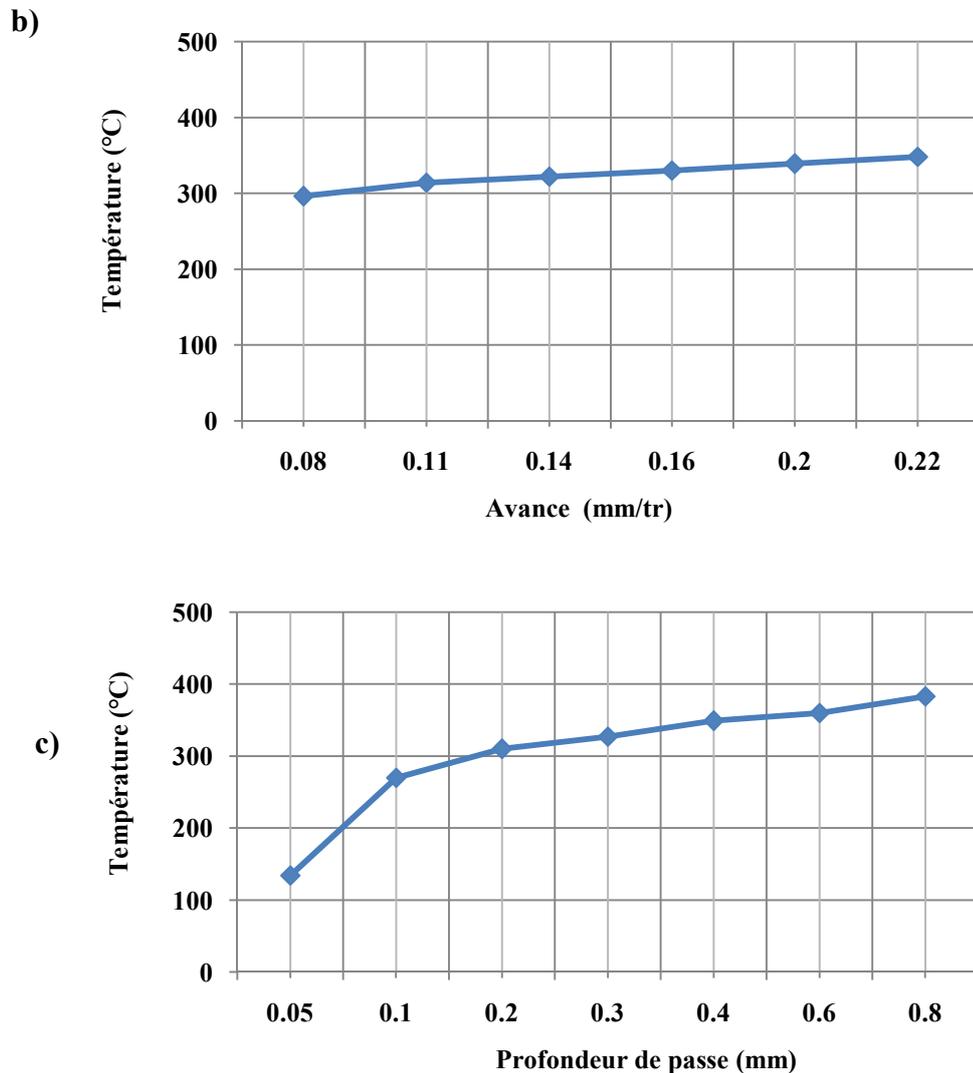


Figure IV.31: Evolution de la température de coupe en fonction des conditions de coupe pour: (a) $a_p = 0.2 \text{ mm}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$. (b) $V_c = 110 \text{ m/min}$; $a_p = 0.2 \text{ mm}$. (c) $V_c = 110 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$.

La figure IV.32 (a, b, c) illustre les résultats de l'évolution de la t° en fonction de l'évolution de l'usure VB. L'analyse des résultats montre qu'avec le temps d'usinage, les frottements et l'usure augmentent et par conséquent la t° générée dans la zone de coupe s'accroît. A 4 min d'usinage, l'usure VB atteint 0.14mm, la t° maxi enregistrée est égale à 548°C. Pour un temps d'usinage de 12 min la surface de contact entre la pièce et outil augmente à cause de l'augmentation de l'usure (VB=0.25mm) et par conséquent il en résulte des frottements et une élévation de la chaleur qui altère les arêtes de coupe par des phénomènes physico-chimique [KOP 01]. L'usure admissible est atteinte après 16min d'usinage et on remarque à ce stade d'usure un léger effondrement du bec de l'outil CBN, la t° max enregistrée est importante, elle atteint 597°C. Finalement, à un stade avancé de l'usure (VB=0.43mm) et après un temps de 20min [THI 99], [NAB 01], la t° maxi enregistrée est de 615 °C et l'outil perd ses qualités de

coupe par fatigue thermique. En fin, on peut dire que les trois paramètres (frottement, t° et usure) sont étroitement liés entre eux et influencent mutuellement l'un l'autre. L'augmentation des frottements provoque une élévation de la t° et la diffusion de la chaleur dans l'outil diminue ses caractéristiques mécaniques et accélère son usure, par conséquent la tenue de l'outil sera affectée. De nombreux chercheurs [AMR 87], [WEI 71], [GEI 99] pensent que le suivi de la température, peut fournir de précieux renseignements sur l'importance des effets thermiques sur la tenue de l'outil.

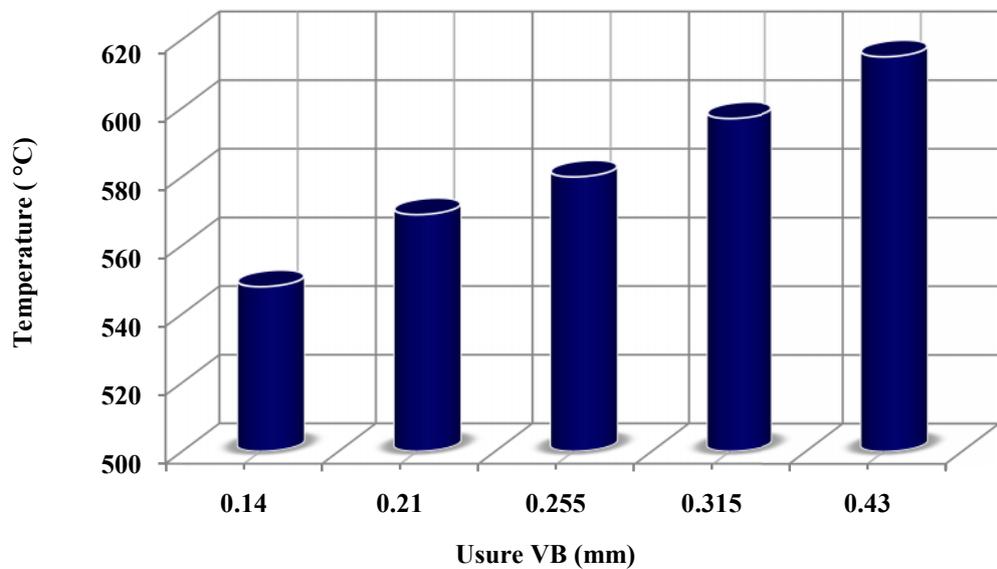


Figure IV.32 : Température maximale enregistrée dans la zone de coupe en fonction de l'usure VB pour $V_c = 160m/min$; $f = 0.08mm/tr$; $a_p = 0.2mm$.

Chapitre V

*Application de la méthodologie
de surface de réponse pour la
prédiction des modèles
mathématiques*

V. Modélisation de la rugosité, effort de coupe et température de coupe en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RMS).

V.1 introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et rayon du bec de l'outil) et les paramètres technologiques étudiés (effort de coupe, rugosité et température de coupe) lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D3 avec un outil en CBN 7020 et la 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 ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés.

V.2 Résultats avec l'outil CBN

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe (V_c , f , a_p et r_ϵ) sur la rugosité de la surface, les efforts de coupe et température de coupe, nous avons dressé un plan factoriel de 4 facteurs, chaque facteur varie à deux niveaux (2^4), ce qui nous donne un total de 16 essais. Le traitement des résultats expérimentaux obtenus au tableau (V.1) nous permet de déterminer des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre (les différents critères de la rugosité, les composantes de l'effort de coupe et la température de coupe) et les paramètres du régime de coupe (V_c , f , a_p et r_ϵ).

N° ESSAI	f (mm/tr)	a_p (mm)	V_c (m/min)	r_ϵ (mm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)	F_y (N)	F_x (N)	F_z (N)	t° (C°)
1	0.08	0.1	95	0.8	0.54	2.25	3.02	129.9	34.2	82.7	429
2	0.16	0.1	95	0.8	1.05	5.53	5.88	143.2	37.1	96.2	505
3	0.08	0.4	95	0.8	0.61	3.08	3.50	224.3	129.6	153.1	552
4	0.16	0.4	95	0.8	1.32	5.90	6.12	228.4	159.4	288.1	611
5	0.08	0.1	190	0.8	0.43	2.20	2.8	99.7	26.5	62.7	571
6	0.16	0.1	190	0.8	0.97	5.25	5.57	125.7	32.4	90.3	635
7	0.08	0.4	190	0.8	0.51	2.71	3.02	187.7	119.3	164.4	650
8	0.16	0.4	190	0.8	1.12	5.48	6.03	275.8	146.5	234.5	666
9	0.08	0.1	95	1.2	0.48	2.59	2.92	132.3	35.1	74.1	416
10	0.16	0.1	95	1.2	0.89	5.26	5.67	168.3	47.7	117.6	431
11	0.08	0.4	95	1.2	0.52	2.84	3.16	224.7	154.2	181.2	483
12	0.16	0.4	95	1.2	1.06	5.62	5.82	330.5	285.4	182.3	499
13	0.08	0.1	190	1.2	0.35	2.22	2.56	103.8	34.8	68.4	499
14	0.16	0.1	190	1.2	0.89	5.16	5.48	173.3	50.0	94.6	639
15	0.08	0.4	190	1.2	0.44	2.58	2.88	195.3	108.6	187.5	664
16	0.16	0.4	190	1.2	1.0	5.44	5.96	325.9	169.1	271.3	694

Tableau V.1 : Résultats de la rugosité, effort de coupe et température en fonction du plan expérimental 2^4 .

V.2.1 Modèles mathématiques de la rugosité

a) Critère de rugosité Ra

Les résultats présentés dans le tableau (V.2) sont analysés par le logiciel **MINITAB**. En appliquant l'analyse de la variance (**ANOVA**), nous considérons un intervalle de confiance de 95% ($\alpha=0.05$), on constate que les facteurs de basse (f, ap, Vc et r) et l'interaction l'avance avec la profondeur de passe ont un impact significatif sur Ra, par contre les autres interactions n'ont pas un impact 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 87.11%.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
f (mm/tr)	1	1,22103	1,22103	746,80	<0,000	87,118
ap (mm)	1	0,06003	0,06003	36,71	0,002	4,283
Vc (m/min)	1	0,03610	0,03610	22,08	0,005	2,575
r (mm)	1	0,05290	0,05290	32,35	0,002	3,774
f*ap	1	0,01103	0,01103	6,74	0,048	0,028
f*Vc	1	0,00040	0,00040	0,24	0,642	0,456
f*r	1	0,00640	0,00640	3,91	0,105	0,064
ap*Vc	1	0,00090	0,00090	0,55	0,491	0,114
ap*r	1	0,00160	0,00160	0,98	0,368	0,215
Vc*r	1	0,00302	0,00302	1,85	0,232	0,582
Erreur	5	0,00817	0,00163			
Total	15	1,40158				

Tableau V.2 : Résultats de l'analyse de variance pour Ra.

L'équation (V.1) exprime le modèle de la rugosité Ra avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$\mathbf{Ra=0,22208+7,937f+0,366ap-0,0025Vc-0,1104r+4,375f*ap+0,0026f*Vc - 2,5000 f*r- 0,0010 ap*Vc- 0,3333ap*r+0,0014 Vc*r} \dots\dots\dots(\mathbf{V.1})$$

$$\mathbf{R^2 = 99,42\%}$$

En introduisant seulement les termes significatifs dans le modèle, nous obtenons l'équation de régression suivante :

Modèle réduit :

$$\mathbf{Ra= 0,39167+ 5,8125f+ 0,116ap -0,0010Vc - 0,2875r+4, 3750 f*ap} \dots\dots\dots(\mathbf{V.2})$$

$$\mathbf{R^2 = 98,54\%}$$

La présentation en 3D figure (V-1) 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 la rugosité Ra.

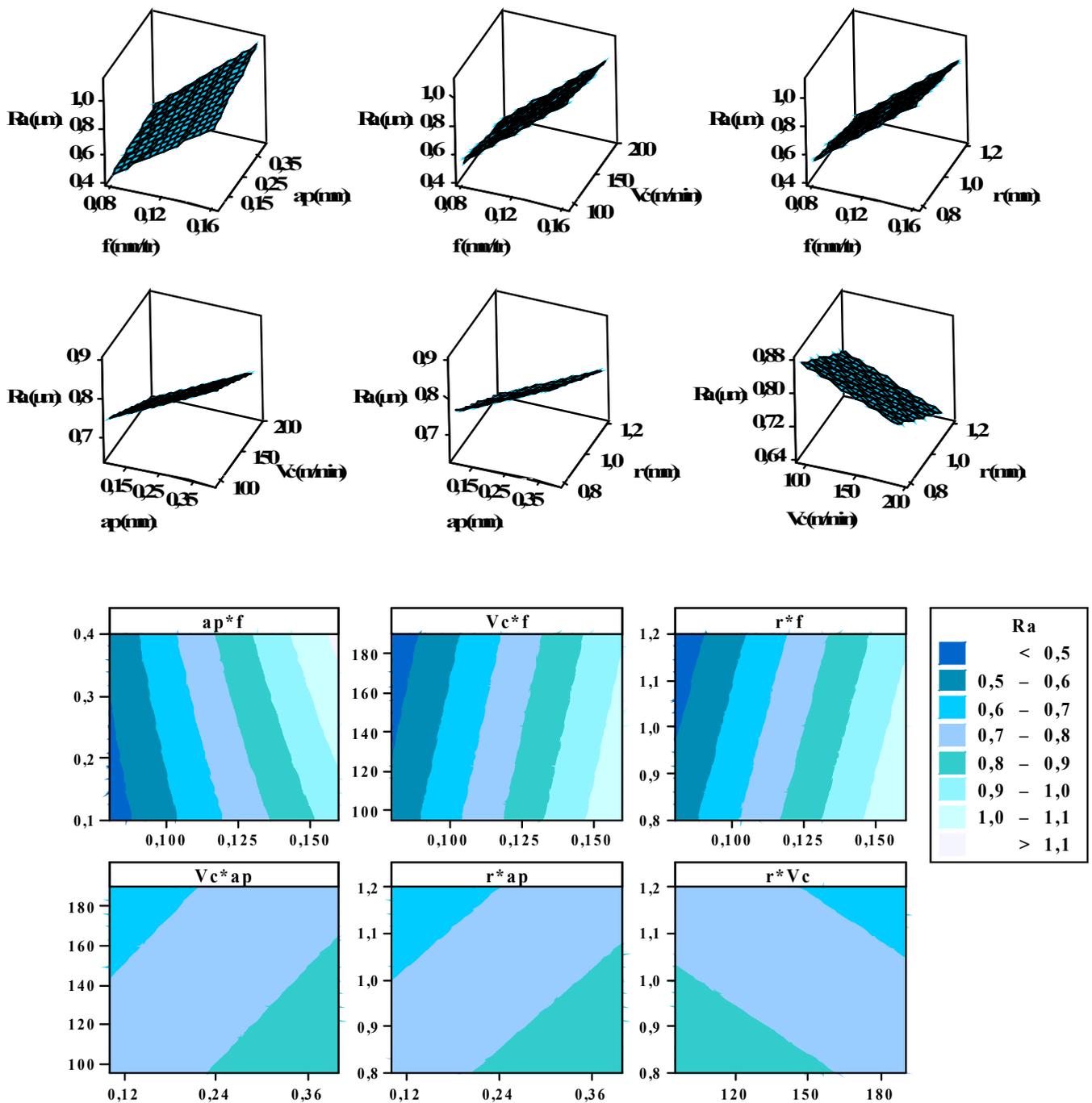


Figure V.1 : Surface de réponse de la rugosité de la surface (Ra) en fonction de Vc , f , ap , r et graphes de contour.

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 Ra) et quatre 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.

La figure (V.2) illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité de surface Ra. On remarque que l'augmentation de la vitesse de coupe et le rayon du bec de l'outil diminue la rugosité Ra. Mais par contre l'avance est le facteur le plus influent sur la rugosité Ra.

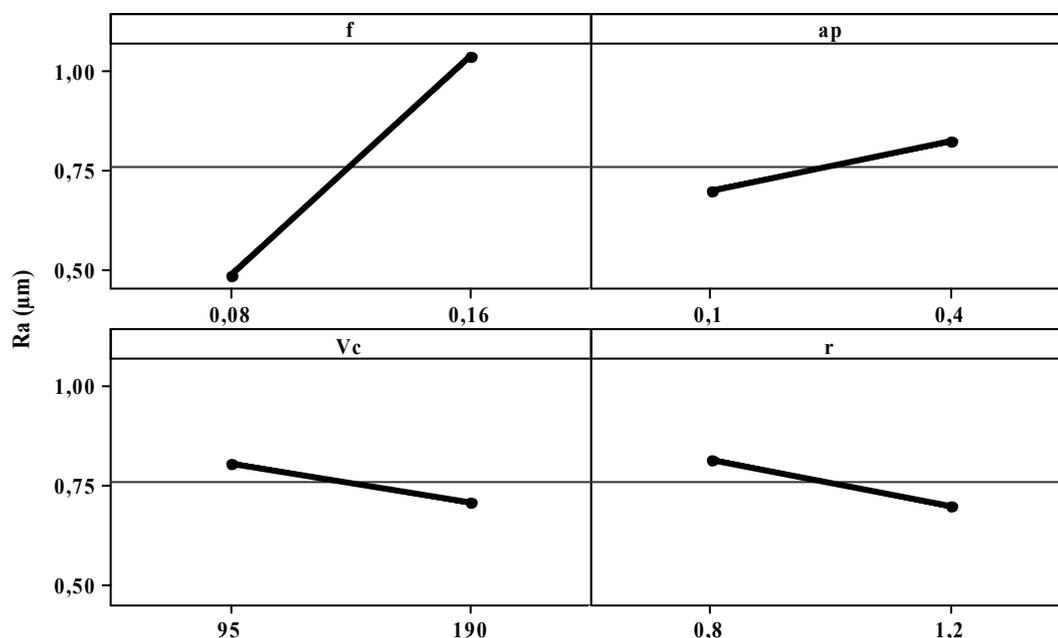


Figure V.2 : Graphe des effets de f , V_c , a_p et r sur Ra.

b) Critère de rugosité Rz

L'analyse de variance ANOVA présentée au tableau (V.3) montre que le rayon du bec de l'outil n'a pas un effet significatif sur la variation des critères de la rugosité Rz, car sa valeur trouvée de P est supérieure à 5%. Par contre la valeur de l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de passe est inférieure à 0.05. On remarque aussi que les différentes interactions n'ont pas d'effet significatif. En revanche l'avance a un effet très important, elle présente un pourcentage de contribution de 96,79%.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
f (mm/tr)	1	33,551	33,5531	1963,5	<0,000	96,79
a_p (mm)	1	0,6360	0,6360	37,22	0,002	1,8300
V_c (m/min)	1	0,2576	0,2576	15,07	0,012	0,7400
r (mm)	1	0,0298	0,298	1,74	0,244	0,0800
$f \cdot a_p$	1	0,0315	0,0315	1,84	0,233	0,0009
$f \cdot V_c$	1	0,0003	0,0003	0,02	0,899	0,1499
$f \cdot r$	1	0,0281	0,0281	1,64	0,256	0,0810
$a_p \cdot V_c$	1	0,0116	0,0116	0,68	0,448	0,0261
$a_p \cdot r$	1	0,0298	0,0298	1,74	0,244	0,0085
$V_c \cdot r$	1	0,0028	0,0028	0,16	0,705	0,1660
Erreur	5	0,0850	0,0171			
Total	15	34,667				

Tableau V.3 : Résultats de l'analyse de variance pour Rz.

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

Modèle complet

$$Rz = -1,1810 + 42,9583f + 4,1917 ap - 0,0034 Vc + 0,5750r - 7,3958 f*ap + 0,0023f*Vc - 5,2344 f*r - 0,0038 ap*Vc - 1,4375 ap*r + 0,0014 Vc*r \dots\dots\dots (V.3)$$

$$R^2 = 99,75\%$$

Par contre l'équation (V.4) est exprimée seulement avec les termes qui ont un effet significatif.

Modèle réduit

$$Rz = -0,2892 + 36,2031f + 1,3292 ap - 0,0027 Vc \dots\dots\dots (V.4)$$

$$R^2 = 99,37\%$$

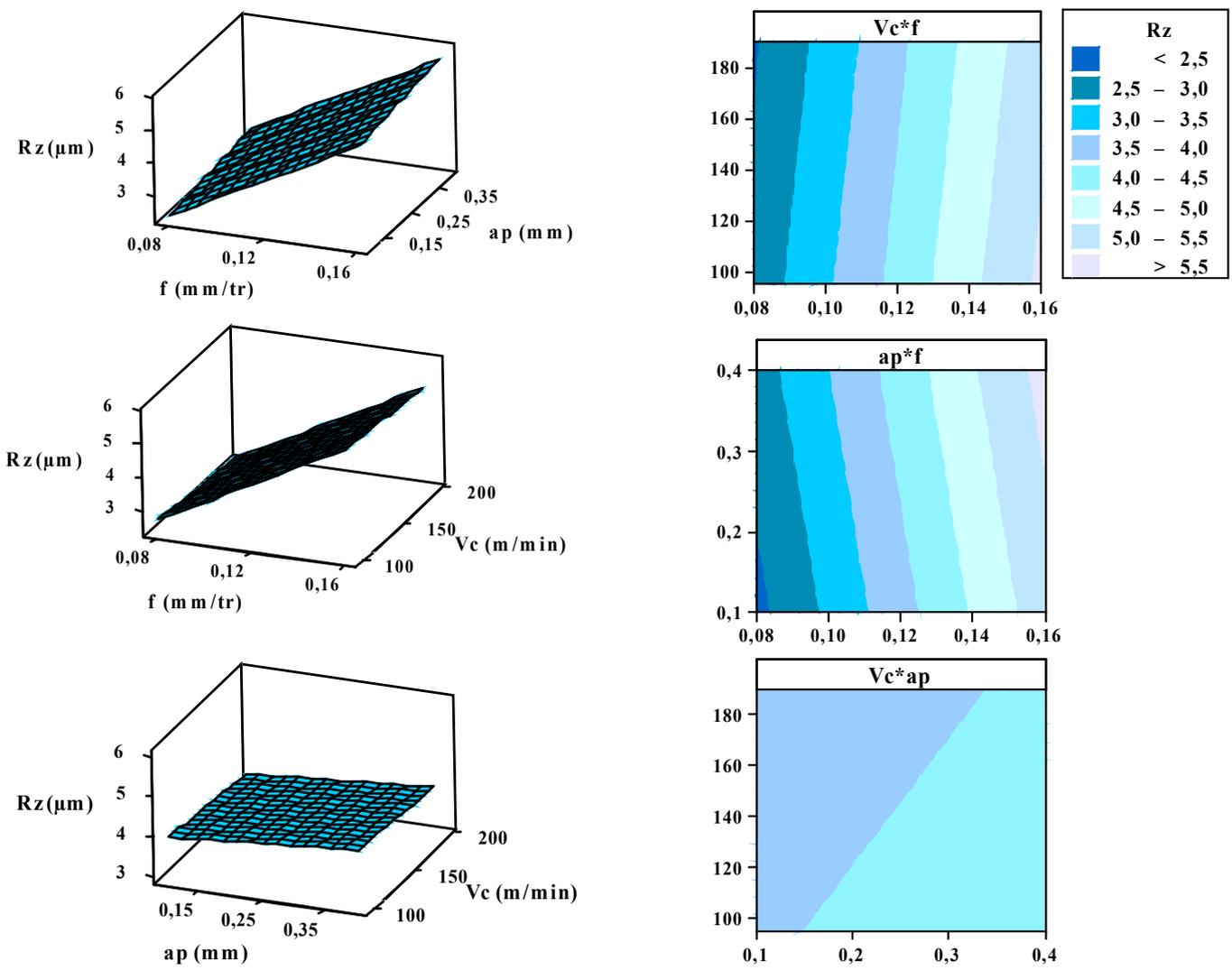


Figure V.3 : Surface de réponse de la rugosité de la surface (Rz) en fonction de Vc, f, ap et graphes de contour.

La figure (V.3) montre que la pente de l'avance est supérieur par rapport aux autres pentes ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité Rz. Mais avec

l'augmentation de la profondeur de passe la rugosité Rz s'élève légèrement. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas Rz) 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.

Les graphes des effets moyens de Rz en fonction des paramètres du régime de coupe figure (V.4), montrent que la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un effet négligeable sur Rz.

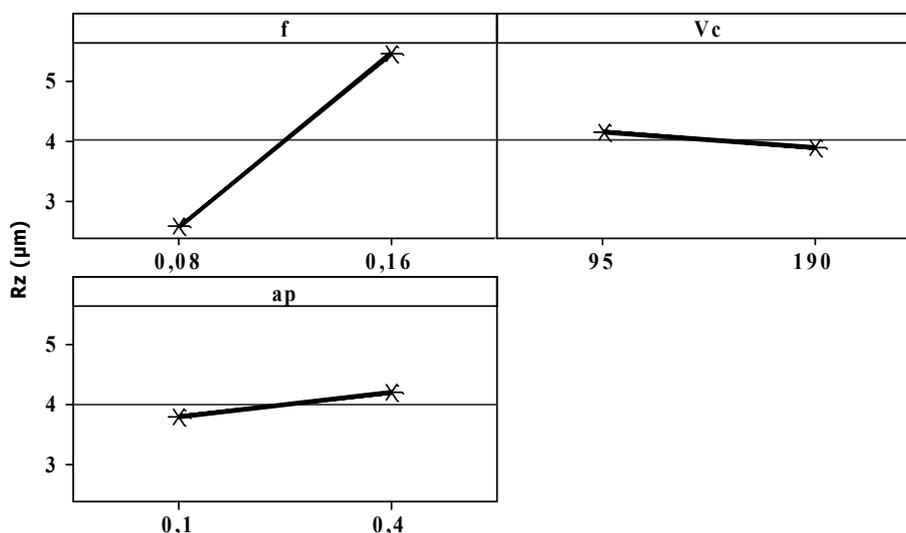


Figure V.4: Graphe des effets de f , Vc et ap sur.

V.2.1.3 Critère de rugosité Rt

Le tableau (V.4) présente l'analyse de variance ANOVA pour le critère Rt. On remarque que l'avance, la profondeur de passe, la vitesse de coupe et le rayon du bec de l'outil ont un impact significatif. Par contre leurs interactions n'ont pas un effet significatif puisque la valeur de probabilité P est supérieure à 0.05. Toujours l'avance est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est 97,31%.

Source	SC	CM	F	P	Contribution%
f (mm/tr)	32,1206	32,1206	2929,04	<0,000	97,31
ap (mm)	0,4193	0,4193	38,23	0,002	1,270
Vc (m/min)	0,2003	0,2003	18,26	0,008	0,606
r (mm)	0,1388	0,1388	12,65	0,016	0,420
f*ap	0,0003	0,0003	0,03	0,874	0,0009
f*Vc	0,0495	0,0495	4,51	0,087	0,149
ap*Vc	0,0014	0,0014	0,13	0,735	0,004
f*r	0,0086	0,0086	0,78	0,418	0,020
ap*r	0,0028	0,0028	0,25	0,637	0,008
Vc*r	0,0105	0,0105	0,96	0,373	0,031
Erreur	0,0548	0,0110			0,166
Total	33,0067				

Tableau V.4: Résultats de l'analyse de variance pour Rt.

L'équation de régression de R_t est exprimée dans l'équation (V.5) avec tous les facteurs qui ont un effet significatif.

Modèle complet :

$$R_t = 1,7340 + 29,8958f + 0,9667ap - 0,0094Vc - 0,8812r + 0,7292f*ap + 0,0293f*Vc + 1,1719f*r + 0,0032ap*Vc - 0,4375ap*r + 0,0027 Vc*r \dots \dots \dots (V.5)$$

$R^2 = 99,83\%$

En introduisant seulement les termes significatifs dans le modèle, nous obtenons l'équation de régression suivante :

Modèle réduit :

$$R_t = 0,4844 + 35,4219f + 1,0792ap - 0,0024Vc - 0,4656r \dots \dots \dots (V.6)$$

$R^2 = 99,61\%$

La surface de réponse présentée sur la figure (V.5) ainsi que les effets moyens figure (V-6) montre que le critère de rugosité R_t est plus affecté par l'augmentation de l'avance, ceci est clair par la pente qui est supérieure à celle de la profondeur de passe.

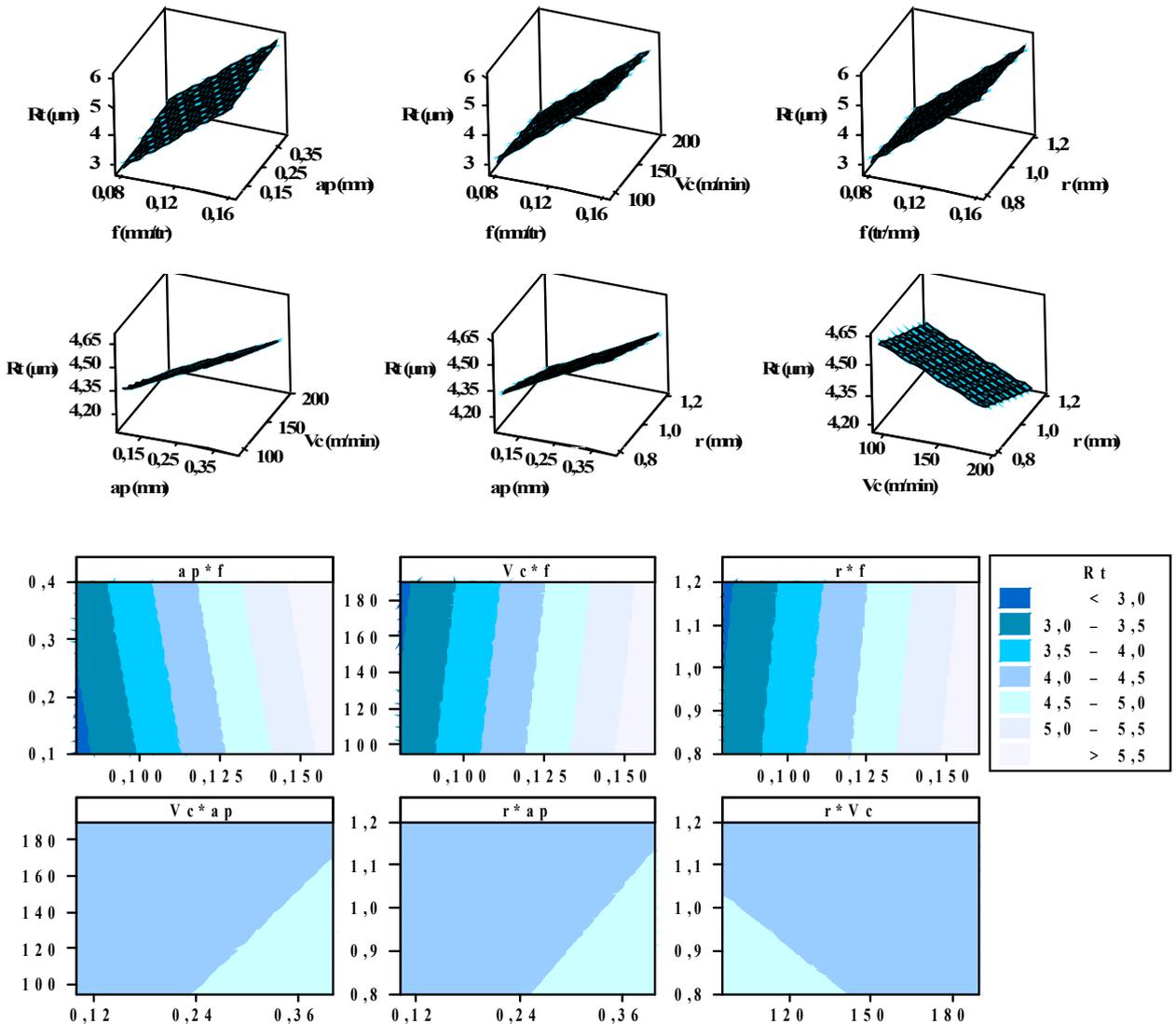


Figure V.5 : Surface de réponse de la rugosité de la surface (R_t) en fonction de V_c , f , ap , r et graphes de contour.

La figure (V.6) est obtenue pour illustrer les effets moyens des paramètres de l'avance, la vitesse de coupe, la profondeur de passe et le rayon du bec de l'outil sur la rugosité R_t . Cette figure indique qu'une légère élévation des valeurs de rugosité est due à l'usure de l'outil. On a remarqué aussi que la profondeur de passe a un effet négligeable sur R_t .

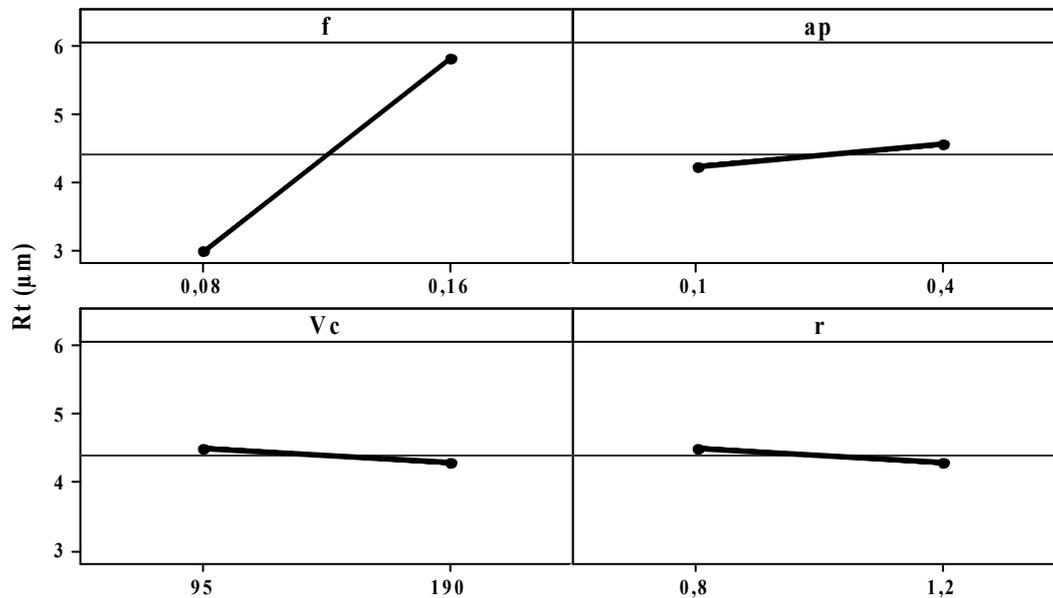


Figure V.6: Graphe des effets moyens de f , V_c , a_p et r sur R_t .

V.2.2 Modèles mathématiques de l'effort de coupe

a) Analyse de l'effort axial F_x

Le tableau (V.5) montre l'analyse ANOVA de la composante axiale (F_x). Les valeurs de la probabilité P indiquent la contribution des facteurs et les interactions. Dans ce cas on remarque que l'avance et la profondeur de passe ont un impact significatif parce que la valeur de probabilité est inférieure à 0.05. La profondeur de passe est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 73,25%.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
f (mm/tr)	1	5087,3	5087,3	7,78	0,038	0,2807
a_p (mm)	1	59328,8	59328,8	90,70	<0,000	73,2466
V_c (m/min)	1	2388,8	2388,8	3,65	0,114	2,9491
r (mm)	1	2497,5	2497,5	3,82	0,108	3,0833
$f \cdot a_p$	1	2811,7	2811,7	4,30	0,093	3,4712
$f \cdot V_c$	1	286,5	286,5	0,44	0,537	0,3537
$f \cdot r$	1	1476,5	1476,5	2,26	0,193	1,8228
$a_p \cdot V_c$	1	1907,5	1907,5	2,92	0,148	2,3549
$a_p \cdot r$	1	978,1	978,1	1,50	0,276	1,2075
$V_c \cdot r$	1	965,7	965,7	1,48	0,279	1,1922
Erreur	5	3270,4	654,1			
Total	15	80998,6				

Tableau V.5: Résultats de l'analyse de variance pour F_x .

L'équation (V.7) de régression qui suit, exprime le modèle de l'effort axial F_x avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Modèle complet :

$$F_x = -16,35 - 990,00f + 98,58 ap + 1,21Vc - 30,25r + 2209,38f*ap - 2,23f*Vc + 1200,78f*r - 1,53ap*Vc + 260,62ap*r - 0,82Vc*r \dots\dots\dots (V.7)$$

$$R^2 = 95,96\%$$

Le modèle qui décrit la variation de l'effort F_x en fonction des facteurs significatif, peut être écrit de la façon suivante :

Modèle réduit :

$$F_x = - 56,86 + 445,78f + 405,96 ap \dots\dots\dots (V. 8)$$

$$R^2 = 79,53\%$$

La figure (V.7) montre l'effet de la variation de l'avance et la profondeur de passe sur l'effort axial F_x . Elle illustre d'une manière générale l'effet significatif des deux paramètres. Donc avec l'augmentation de l'avance et la profondeur de passe l'effort axial augmente. Le graphe de contour permet de visualiser la surface de réponse.

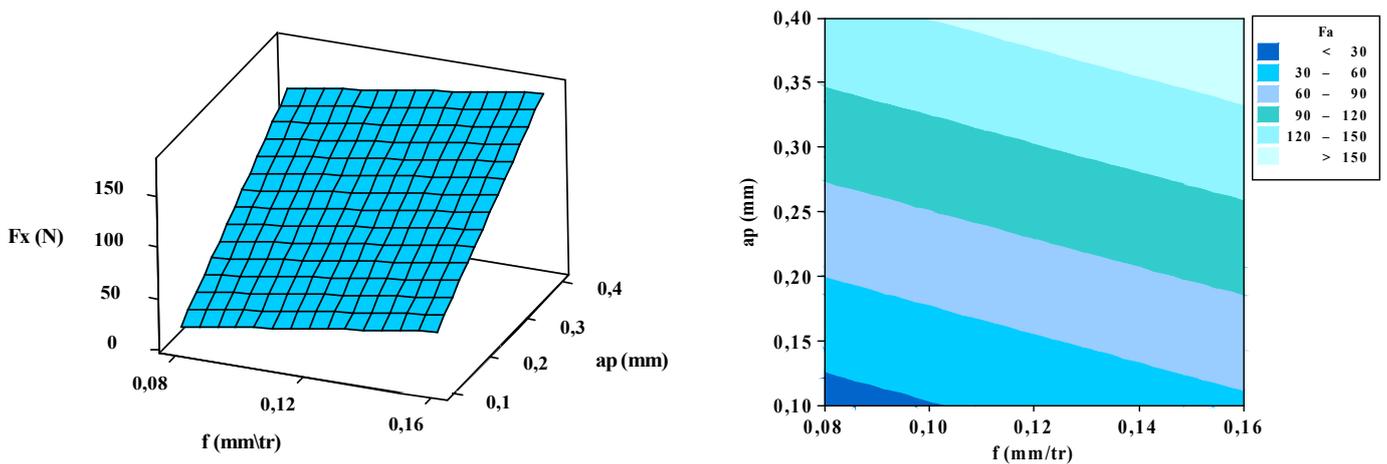


Figure V.7: Surface de réponse de l'effort de coupe (F_x) en fonction de f , ap et graphe de contour.

La figure (V.8) illustre les effets moyens 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.

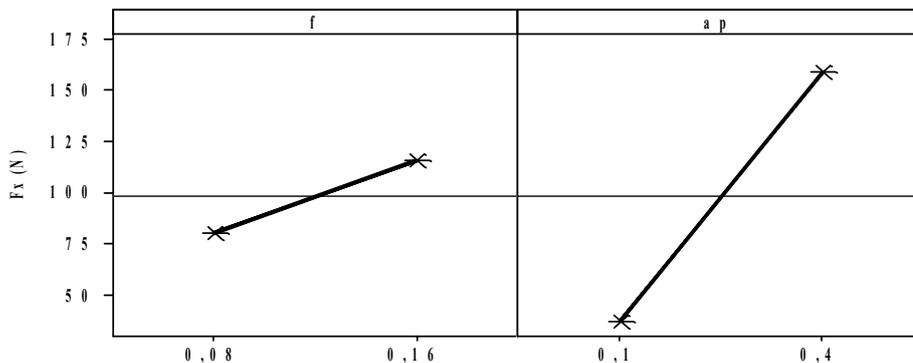


Figure V.8: Graphe des effets de f et ap sur F_x .

b) Analyse de l'effort radial F_y

Le tableau (V.6) présente l'analyse de la variance ANOVA pour la composante radiale (F_y). On remarque que l'avance, la profondeur de passe, le rayon du bec de l'outil et leurs interactions ont un impact significatif puisque la valeur de probabilité P est inférieure à 0.05.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
f (mm/tr)	1	14006,7	14006,7	49,50	0,001	17,72
ap (mm)	1	52486,8	52486,8	185,48	<0,000	66,43
Vc (m/min)	1	557,0	557,0	1,97	0,220	0,70
r (mm)	1	3582,0	3582,0	12,66	0,016	04,53
f*ap	1	2111,4	2111,4	7,46	0,041	02,67
f*Vc	1	1501,6	1501,6	5,31	0,069	01,90
f*r	1	2766,8	2766,8	9,78	0,026	03,50
ap*Vc	1	144,0	144,0	0,51	0,508	00,18
ap*r	1	410,1	410,1	1,45	0,283	00,03
Vc*r	1	26,5	26,5	0,09	0,772	00,01
Erreur	5	1414,9	283,0			
Total	15	79007,7				

Tableau V.6: Résultats de l'analyse de variance pour F_y .

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

Modèle complet :

$$F_y = 330,22 - 2109,27f - 76,67ap - 0,71Vc - 145,31r + 1914,6 f*ap + 1643,7 f*r + 5,10f*Vc + 0,42ap*Vc + 168,75ap*r - 0,14Vc*r \dots \dots \dots (V.9)$$

$$R^2 = 98,21 \%$$

On introduisant seulement les facteurs suivant un effet significatif, le modèle s'écrit :

Modèle réduit :

$$F_y = 187,5 - 1382,7f - 152,1ap - 122,45r + 1914,6 f*ap + 1643,7 f*r \dots \dots \dots (V.10)$$

$$R^2 = 94,87 \%$$

La surface de réponse présentée sur la figure (V.9) ainsi que les effets moyens figure (V.10) montre que l'effort radial est plus affecté par l'augmentation de la profondeur de passe, ceci est clair par la pente qui est supérieure à celle de l'avance et le rayon du bec de l'outil. Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (F_y) et les conditions d'exploitation souhaitables

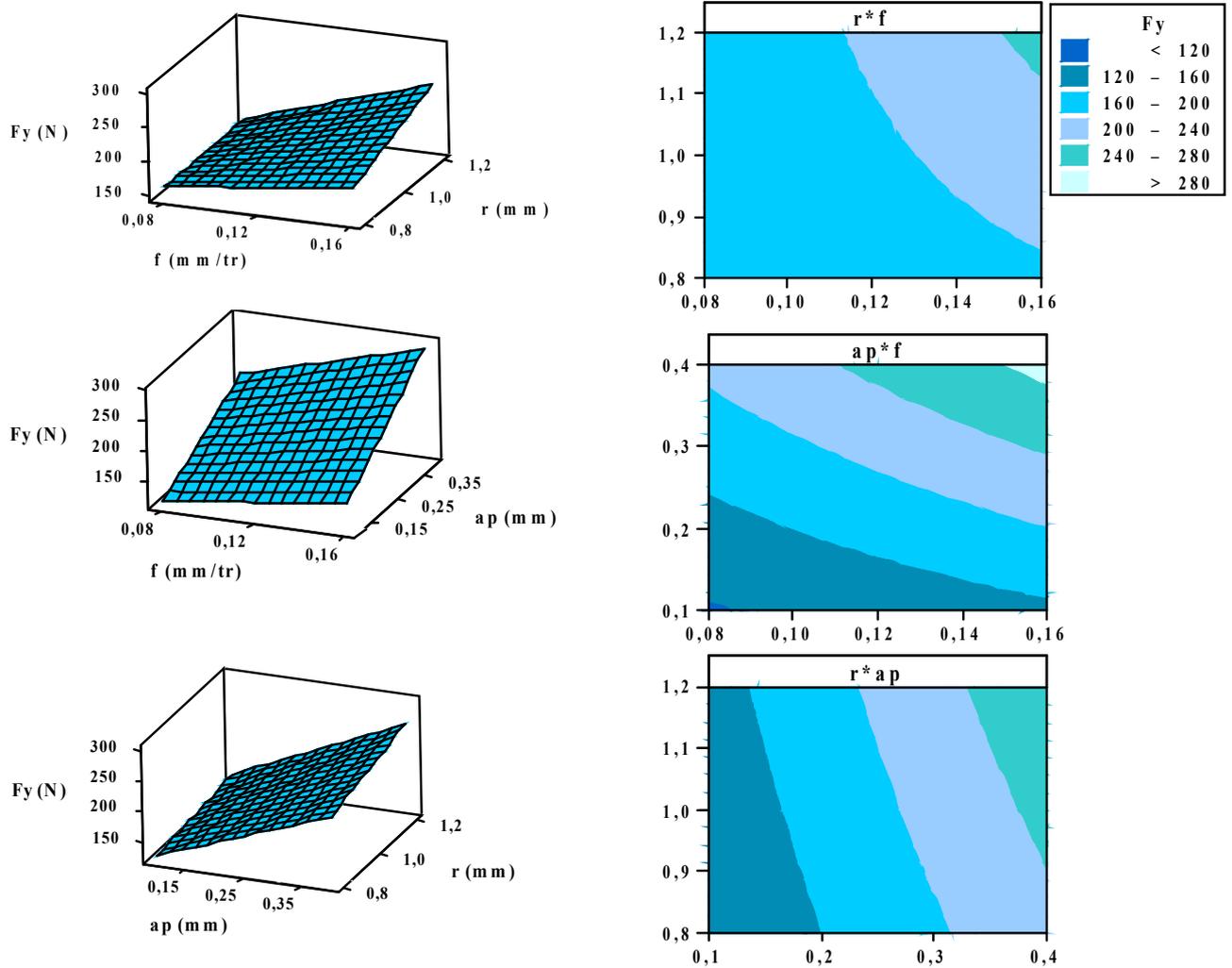


Figure V.9: Surface de réponse de l'effort de coupe (F_y) en fonction de f , ap , r et les graphes de contour.

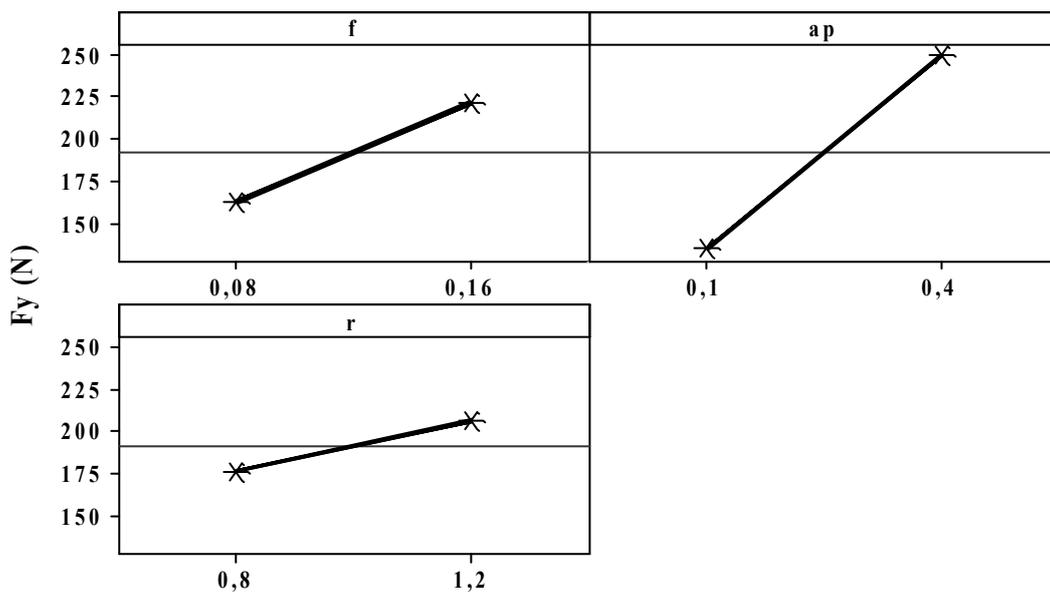


Figure V.10: Graphe des effets de f , ap et r sur F_y .0

c) Analyse de l'effort tangentiel Fz

Le tableau (V.7) présente l'analyse de variance ANOVA pour la composante tangentielle (Fz). On remarque que l'avance et la profondeur de passe ont un impact significatif. Par contre la vitesse de coupe, le rayon du bec et les interactions n'ont pas un effet significatif sur l'effort tangentiel puisque la valeur de P est supérieur à 0.05. La profondeur de passe est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 74,81%, suivie par l'avance de 12,62 %.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
f (mm/tr)	1	10040	10040	9,14	0,029	12,6209
ap (mm)	1	59512	59512	54,2	<0,001	74,8108
Vc (m/min)	1	0,001	0,001	0,00	0,991	0,0001
r (mm)	1	2	2	0,00	0,971	0,0025
f*ap	1	2007	2007	1,83	0,234	2,5229
f*Vc	1	13	13	0,01	0,917	0,1634
f*r	1	524	524	0,48	0,520	0,6587
ap*Vc	1	724	724	0,66	0,454	0,9109
ap*r	1	103	103	0,09	0,772	0,2940
Vc*r	1	1136	1136	1,03	0,356	1,4280
Erreur	5	5490	1098			
Total	15	79550				

Tableau V.7: Résultats de l'analyse de variance pour Fz.

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

Modèle complet :

$$Fz = 85,95 + 806,77f + 132,67 ap + 1,18Vc - 17,79r - 1866,67f*ap - 0,48f*Vc - 715,62f*r + 0,94ap*Vc - 84,58ap*r + 0,89Vc*r \dots \dots \dots (V.11)$$

$R^2 = 93,10\%$

On introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, le modèle s'écrit :

Modèle réduit

$$Fz = 29,98 + 626,25f + 406,50 ap \dots \dots \dots (V.12)$$

$R^2 = 87,43\%$

La figure (V.11) montre que la composante tangentielle est affectée par la profondeur de passe car la pente est grande comparativement par l'effet de l'avance, la figure (V.12) confirme cette observation. Le graphe de contour montre la relation entre une variable de réponse (Fz) et deux facteurs à partir d'un modèle d'équation.

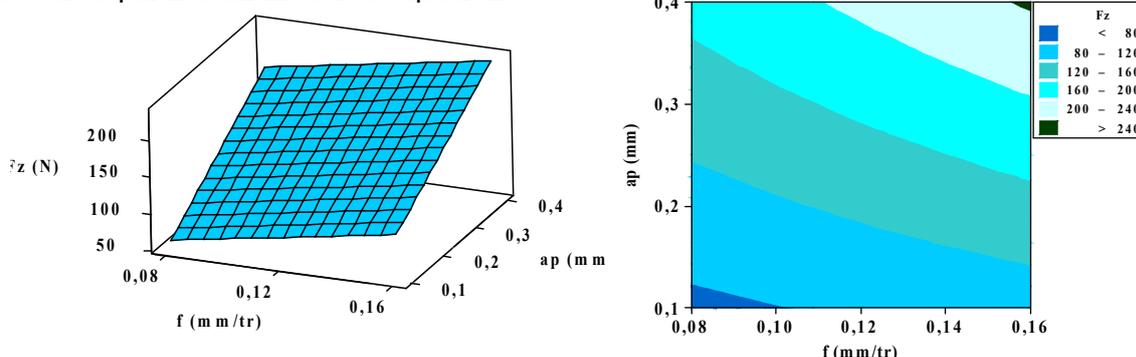


Figure V.11: Surface de réponse de l'effort (Fz) en fonction de Vc, f, ap et graphe de contour.

La figure (V.12) illustre les effets moyens de l'avance et de la profondeur de passe sur l'effort tangentiel. D'après cette figure on constate que l'effort augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe, parce que quand l'avance et la profondeur de passe augmente, la zone de l'interface outil/copeau augmente ce qui ramène à l'augmentation de la composante de l'effort (F_z).

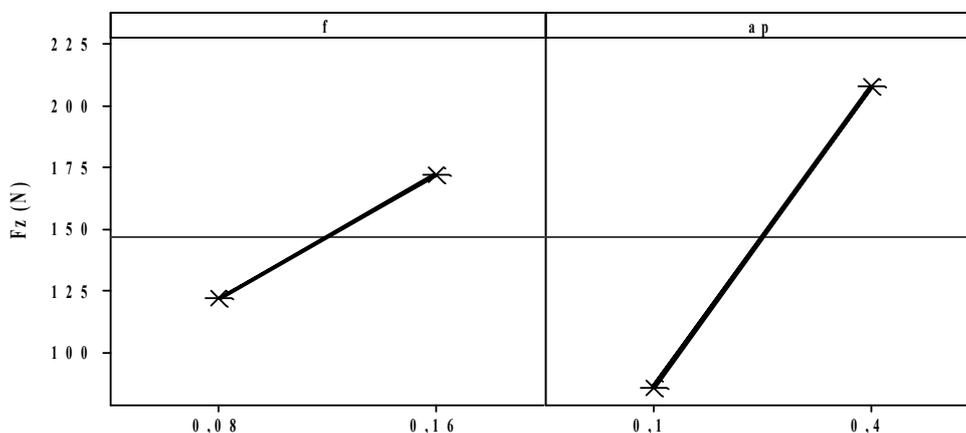


Figure V.12: Effet moyens de f et ap sur F_z .

V.2.3 Modèle mathématique de la température de coupe

Le tableau (V.8) présente l'analyse ANOVA pour la température de coupe (t°) effectuée à partir des résultats du tableau (V.1). Les valeurs de la probabilité P, indiquent la contribution des facteurs principaux et les interactions. D'après ces résultats on remarque que l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un impact significatif parce que la valeur de probabilité est inférieure à 0.05. La vitesse de coupe est le facteur le plus prépondérant que la profondeur car sa valeur de contribution est de 56%. Elle est suivie par la profondeur de passe (contribution 22.5%), par l'avance (contribution 8%) et en dernier lieu le rayon du bec de l'outil CBN (contribution 4%).

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution %
f (mm/tr)	1	10816	10816	8,03	0,037	8,0911
ap (mm)	1	30102	30102	22,35	0,005	22,5183
Vc (m/min)	1	74529	74529	55,33	0,001	55,7526
r (mm)	1	5402	5402	4,01	0,102	4,0411
f*ap	1	1892	1892	1,40	0,289	1,4153
f*vc	1	441	441	0,33	0,592	0,3299
f*r	1	12	12	0,01	0,928	0,0089
ap*vc	1	72	72	0,05	0,826	0,0539
ap*r	1	16	16	0,01	0,917	0,012
vc*r	1	3660	3660	2,72	0,160	2,7370
Erreur	5	6735	1347			5,0382
Total	15	133678				

Tableau V.8: Résultats de l'analyse de variance pour la température.

Le modèle qui décrit la variation de la température de coupe en fonction de tous les facteurs significatifs peut être écrit de la façon suivante :

Modèle complet :

$$t^{\circ} = 260,42 + 735,23f + 541,29 ap + 0,80Vc - 114,17r - 1812,5f*ap + 2,76 f*Vc - 39,77f*r - 0,30ap*Vc + 12,12ap*r + 0,58Vc*r \dots\dots\dots (V.13)$$

$R^2 = 94,96\%$

Par contre l'équation (V.14) est exprimée seulement par les termes qui ont un effet significatif.
Modèle réduit :

$$t^{\circ} = 203,958 + 650f + 289,167 ap + 1,437Vc \dots\dots\dots (V.14)$$

$R^2 = 86,36\%$

La figure (V.13) montre que la pente de la vitesse de coupe est supérieure par rapport aux autres facteurs, ce qui implique que ce facteur à une influence très importante sur la température de coupe. Le graphe de contour montre la relation entre la variable de réponse (t°) et les trois facteurs à partir d'un modèle d'équation.

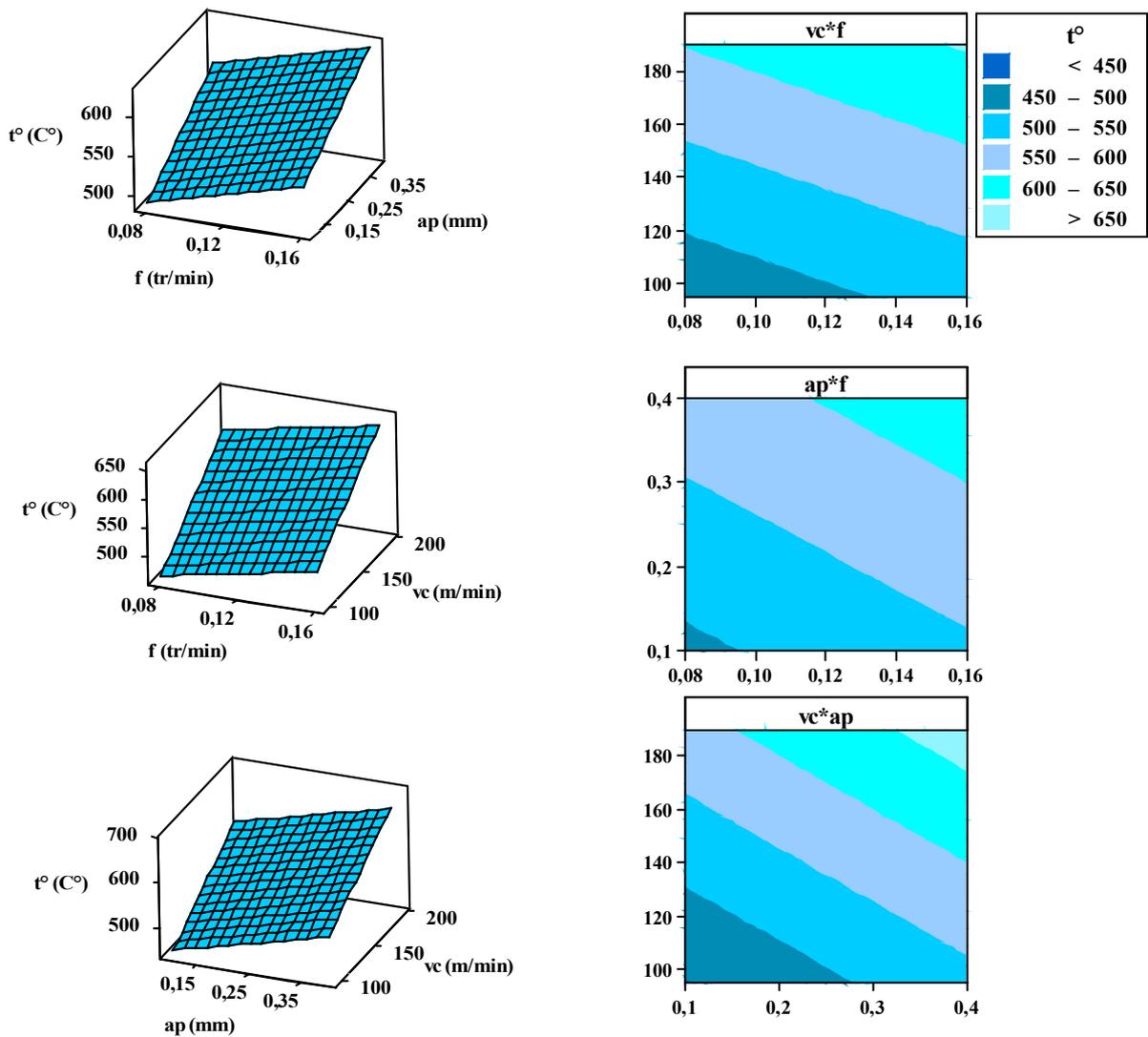


Figure V.13: Surface de réponse de la température de coupe (t°) en fonction de f , Vc , ap et graphes de contour.

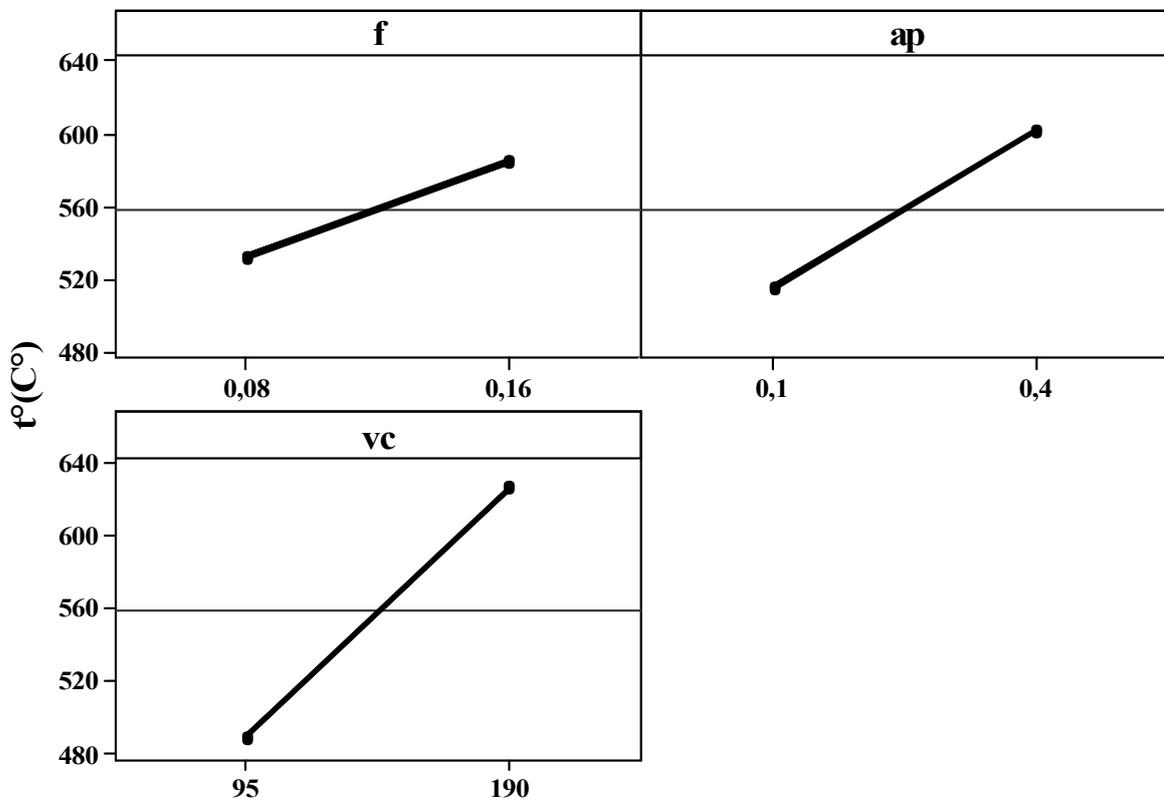


Figure V.14: Effets moyens de f , Vc et ap sur la température.

La figure (V.14) montre les effets moyens de l'avance, la vitesse de coupe et de la profondeur de passe sur la température de coupe. On remarque que la pente de la vitesse de coupe est la plus grande.

V.3 Résultats avec l'outil céramique revêtue CC6050

Le tableau (V.9) présente les valeurs expérimentales de la composante de l'effort de coupe F_y et le critère de rugosité R_a en fonction des différents paramètres de coupe (Vc , f et ap). Pour cela nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, chaque facteur varie à trois niveaux, ce qui nous donne un plan de 27 essais (3^3). Le traitement des résultats expérimentaux obtenus nous permet de déterminer des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre la rugosité (R_a), l'effort de coupe (F_y) et les paramètres du régime de coupe.

<i>N°</i>	<i>Vc (m/min)</i>	<i>f (mm/tr)ap</i>	<i>ap(mm)</i>	<i>Ra (µm)</i>	<i>Fy (N)</i>
Essais					
1	90	0.08	0.15	0.50	138.23
2	90	0.08	0.30	0.48	169.36
3	90	0.08	0.45	0.50	106.28
4	90	0.16	0.15	1.17	159.77
1	90	0.16	0.30	1.19	243.75
6	90	0.16	0.45	1.01	180.91
7	90	0.24	0.15	2.23	186.2
8	90	0.24	0.30	2.28	295.99
9	90	0.24	0.45	1.48	241.74
10	120	0.08	0.15	0.47	83.92
11	120	0.08	0.30	0.52	129.06
12	120	0.08	0.45	0.37	135.34
13	120	0.16	0.15	1.05	109.23
14	120	0.16	0.30	1.12	170.79
15	120	0.16	0.45	0.95	207.11
16	120	0.24	0.15	2.56	121.77
17	120	0.24	0.30	3.33	178.06
18	120	0.24	0.45	2.62	209.27
19	140	0.08	0.15	0.38	65.74
20	140	0.08	0.30	0.44	116.99
21	140	0.08	0.45	0.37	126.82
22	140	0.16	0.15	0.71	90.32
23	140	0.16	0.30	0.84	161.9
24	140	0.16	0.45	0.94	215.5
25	140	0.24	0.15	2.21	97.45
26	140	0.24	0.30	2.31	179.19
27	140	0.24	0.45	3.45	370.2

Tableau V.9: Rugosité et effort en fonction du plan expérimental 3³.

V.3.1 Analyse du critère de la rugosité Ra

Le tableau (V.8) présente l'analyse ANOVA pour le critère de la rugosité Ra. Les valeurs de la probabilité P, indiquent la signification des facteurs et les interactions. D'après ces résultats on remarque que l'avance et ses interactions ont un impact significatif, parce que la valeur de probabilité est inférieure à 0.05. L'avance est le facteur prépondérant car sa valeur de contribution est de 72.46%. Elle est suivie par la vitesse de coupe (contribution 2%), et en dernier lieu la profondeur de passe a un effet presque négligeable car sa contribution est de 0.07%.

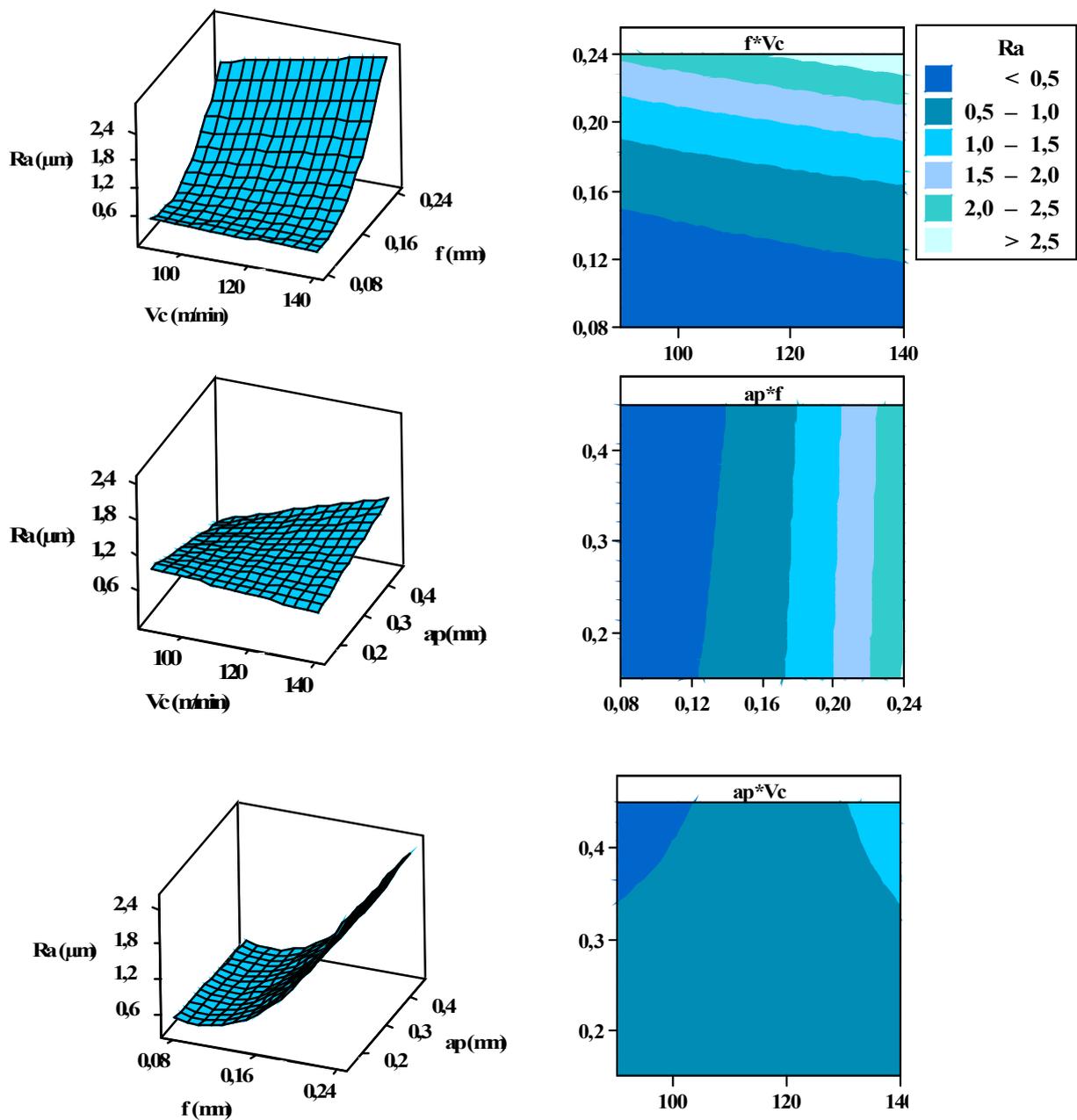


Figure V.15: Surface de réponse de l'effort de coupe (Ra) en fonction de Vc , f et les graphes de contour.

La figure (V.16) montre les effets moyens de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité Ra .

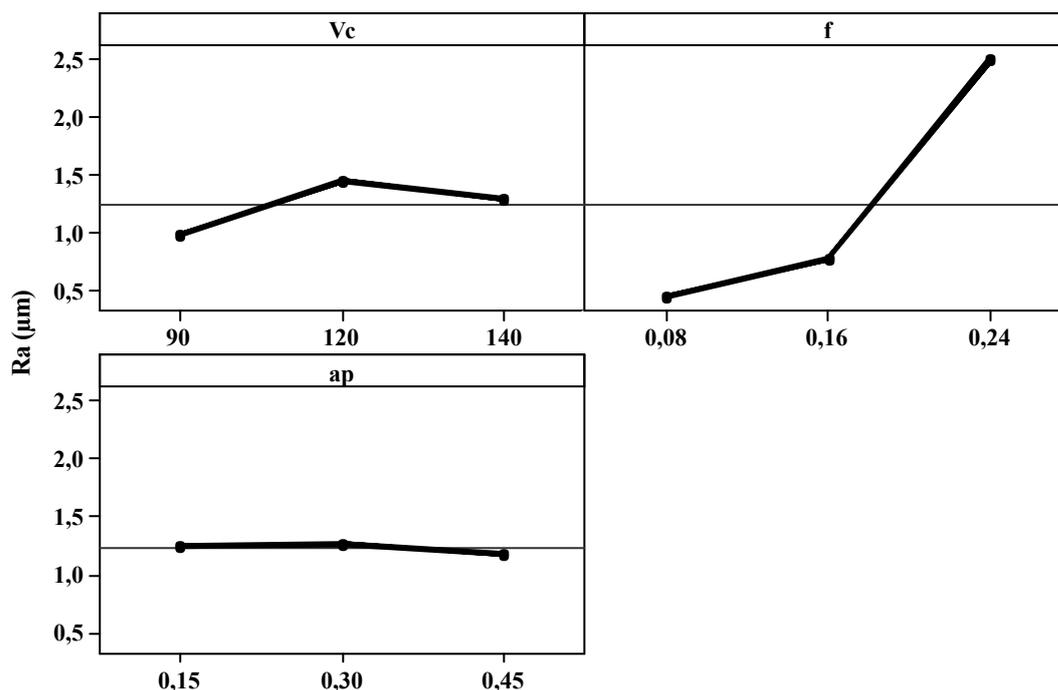


Figure V.16: Graphe des effets de V_c , f et ap sur R_a .

V.3.2 Analyse de la composante de l'effort de coupe F_y

Le tableau (V.11) présente l'analyse de variance ANOVA pour la composante radiale (F_y). Les valeurs de la probabilité P qui indique la contribution des facteurs et les interactions. D'après cette analyse on remarque que l'avance est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 30%, suivie par la profondeur de passe de 25% et en dernier lieu la vitesse de coupe de 4%.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
f (mm/tr)	1	36282	47	0,05	0,833	30,13
V_c (m/min)	1	5920	5508	5,34	0,034	4,9169
ap (mm)	1	30467	1136	1,10	0,309	25,3048
f*f	1	298	298	0,29	0,598	0,2475
V_c * V_c	1	2889	2889	2,80	0,113	2,3995
ap*ap	1	3657	3657	3,54	0,077	3,0373
f* V_c	1	2	2	0,00	0,961	0,0016
f*ap	1	9365	9365	9,08	0,008	7,7782
V_c *ap	1	13978	13978	13,55	0,002	11,6096
Error	17	17541	17541			14,5689
Total	26	120400				

Tableau V.11: Résultats de l'analyse de variance pour F_y .

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

Modèle complet :

$$F_y = 869,4 - 11,879V_c + 189,0f - 494,7ap + 0,227V_c*f + 9,041V_c*ap + 2328,1f*ap - 0,0368V_c*V_c - 1102f*f - 1097,2ap*ap \dots \dots \dots (V.17)$$

$$R^2 = 85,43\%$$

Par contre l'équation (V.18) est exprimée seulement avec les termes qui ont un effet significatif.

Modèle réduit

$$F_y = 194,30 - 0,76V_c + 163,65f - 98,21 ap + 0,23 V_c*f + 2328,06 f*ap \dots \dots \dots (V.18)$$

$$R^2 = 68,14\%$$

La présentation en 3D figure (V.17) et les effets principaux figure (V.18) de l'avance, vitesse de coupe et la profondeur de passe sur l'effort radial. Ce dernier augmente avec l'augmentation de l'avance. Les contours permettent d'établir la valeur de réponse (F_y) et les conditions d'exploitation souhaitables.

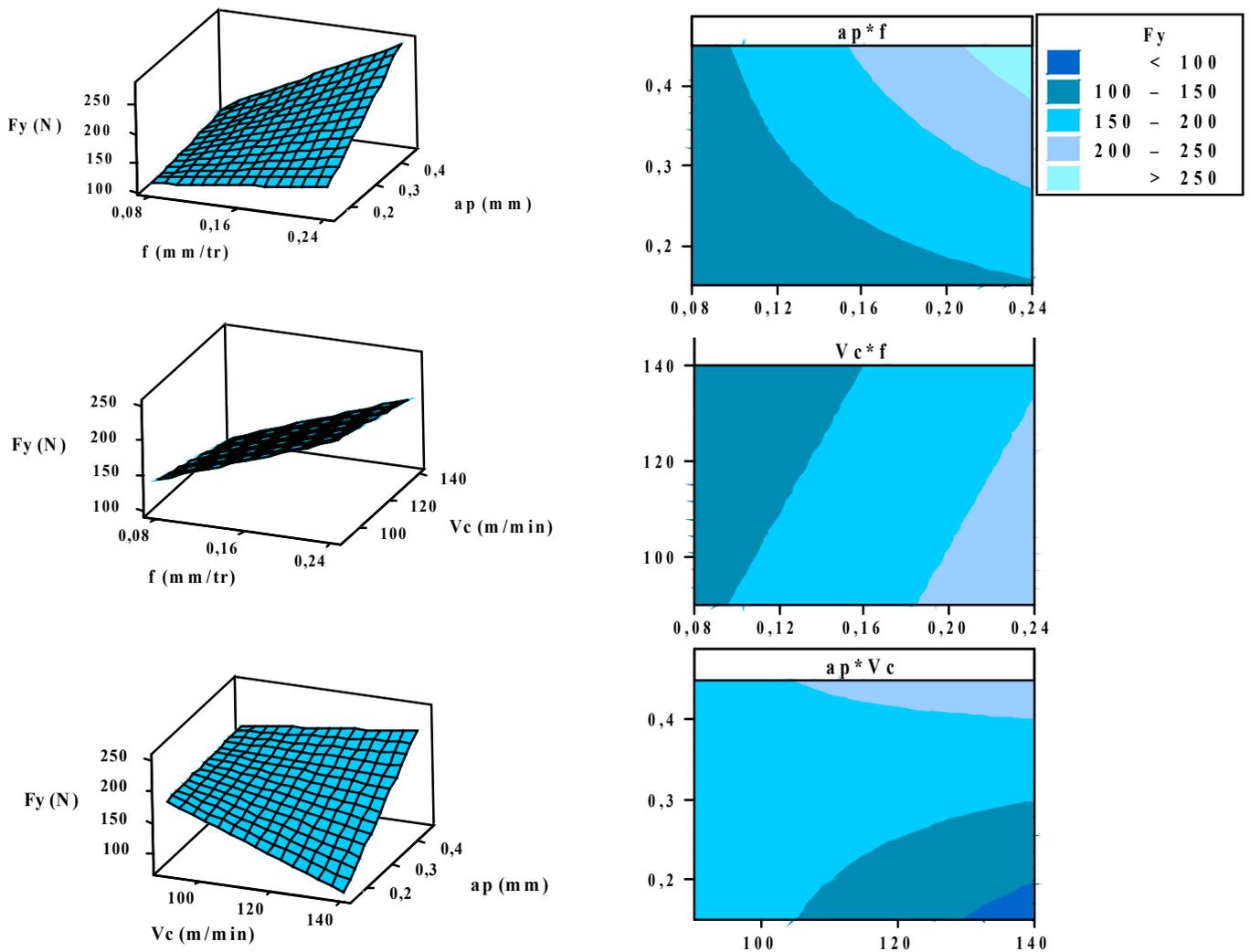


Figure V.17: Surface de réponse de l'effort de coupe (F_y) en fonction de V_c , f , ap et graphe de contour.

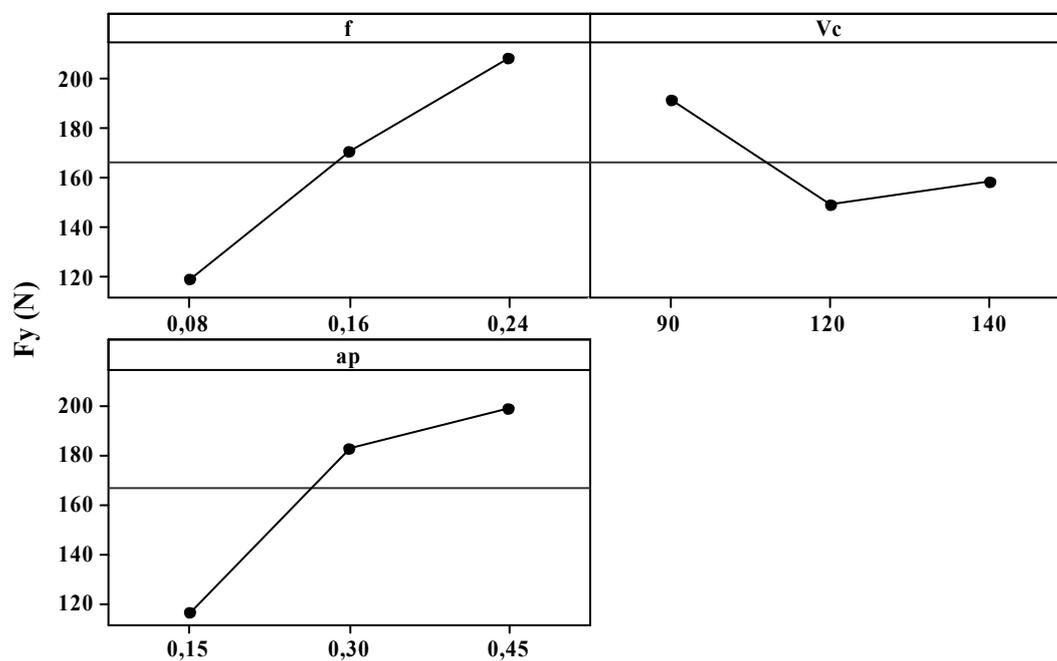


Figure V.18: Graphe des effets de f , Vc et ap sur F_y .

Conclusion générale

L'étude expérimentale sur le comportement des matériaux de coupe et en particulier le nitrure de bore cubique (CBN) lors du tournage de l'acier fortement allié AISI D3 traité à 60HRC nous a permis de mettre en évidence quelques aspects du problème de la coupe et les phénomènes physiques qui y sont liés.

Dans le premier chapitre, tous nos efforts ont été consacrés à l'étude bibliographique qui concerne le tournage dur, les phénomènes physiques régissant le processus de coupe et l'état d'art sur les différents travaux de recherche réalisés en tournage dur.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences, les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe et du traitement thermique de la pièce.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté en premier temps une comparaison entre les performances en terme d'usure des différents types de matériaux de coupe tels que (CBN, CC6050, CC650, CC670 et GC4005) en usinant l'acier AISI D3 à deux différentes vitesses de coupe (basse 110m/min et élevée 200m/min). Nous avons exposé également les résultats de l'évolution des efforts de coupe et la dégradation de la qualité de la surface de la pièce, sous l'effet de l'usure de ces cinq matériaux. Ensuite l'étude a été focalisée sur l'usure de l'outil CBN. En dernier lieu, nous avons présenté une exploitation des résultats trouvés de l'usure en termes de durée de vie et de productivité. Cette exploitation débouche sur une proposition des modèles mathématiques de la tenue.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe, effort spécifique, effort résultant, puissance de coupe et rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier AISI D3 par les cinq matériaux de coupe testés. Nous avons présenté également les résultats de l'impact de la dureté de la pièce sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe, rugosité et la puissance de coupe lors de l'usinage avec l'outil CBN. En fin, nous avons présenté les résultats de la température de coupe.

Dans le cinquième chapitre nous avons présenté une étude statistique des résultats qui repose sur la méthodologie de surface de réponse et une analyse de la variance (ANOVA) 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, profondeur de passe et rayon du bec de l'outil) et les paramètres étudiés (effort de coupe, rugosité et température de coupe).

L'étude du comportement des matériaux de coupe face à l'acier AISI D3) en tournage dur, nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Le comportement à l'usure varie très largement en fonction de la composition chimique et aux caractéristiques physiques et mécaniques du couple outil-matière. En effet, la comparaison en termes d'usure montre que le CBN est le matériau le plus résistant à l'usure suivi par la céramique revêtue CC6050, ensuite la céramique mixte CC650 et la céramique composite CC670 et en dernier lieu le carbure GC4005.

- La comparaison entre les différents matériaux de coupe pour deux vitesses de coupe basse 110m/min et élevée 200m/min, montre que l'outil CBN présente des performances supérieures à celle des autres matériaux testés, en termes d'usure, productivité, tenue, effort de coupe et rugosité de surface.
- L'usure en dépouille de l'outil CBN est principalement due à l'abrasion. Elle est attribuée aux rapports entre la dureté des composants de l'acier AISI D3 et les composantes du CBN. l'analyse par rayon X montre que l'usure par adhésion intervient aussi lors de l'usinage avec le CBN.
- Aux vitesses de coupe [85-115-150-200], l'usure de l'outil CBN se manifeste par l'apparition d'une bande striée et régulière sur la surface en dépouille et la formation d'un cratère sur la surface d'attaque. Avec le temps, on remarque un élargissement de l'usure VB et KT ce qui conduit à un effondrement du bec de l'outil à cause de l'usure combinée de (VB) et (KT). Aux vitesses de coupe élevée [240-310] l'effondrement du bec de l'outil se fait aux premières minutes d'usinage et on remarque un émoussement de la pointe de l'outil. Cette usure mérite par conséquent une attention particulière puisqu'elle affecte la surface usinée et la précision dimensionnelle.
- Les vitesses de coupe supérieures à 240m/min sont peut recommandées à cause de l'usure rapide de l'outil CBN. Cela a pour effet de donner des durées de vie trop courtes, non intéressante sur le plan industriel. Par conséquent, le domaine de vitesse entre 85 et 240 m/min peut être considéré comme un domaine optimal d'exploitation des outils CBN face à l'acier fortement allié AISI D3 traité à 60 HRC.
- L'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance entraîne une augmentation de l'usure VB et KT. Par conséquent, l'usure la plus faible est observée pour les faibles conditions de coupe ($V_c = 85$ m/min ; $f = 0.08$ mm/tr). Par contre l'usure la plus forte est observée pour les grandes conditions de coupe ($V_c = 310$ m/min ou bien $V_c = 180$ m/min; $f = 0.14$ mm/tr). L'augmentation de la vitesse de 85 à 180m/min, conduit a une chute de tenue de 0.7%, aussi l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.14mm/tr, conduit a une chute de tenue de 0.8 %.
- L'étude des efforts de coupe réalisée nous a permis de mieux comprendre ce phénomène en tournage dur et cela dans le but d'avoir une meilleure stabilité du système usinant. L'effort de coupe le plus important est l'effort radial en raison de la géométrie négative de la plaquette et le travail à la limite du bec de l'outil.
- Le choix d'une avance (f) et d'une profondeur de passe (a_p) trop faible génère des pressions de coupe énormes qui peuvent endommager l'arête tranchante de l'outil. Les grandes vitesses de coupe engendrent d'une part une diminution des efforts et d'autre part une accélération de l'usure. Ce qui nous pousse à chercher un compromis entre un effort minimal et une tenue exploitable sur le plan industriel.
- Les efforts de coupe et les pressions spécifiques diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Par exemple, une élévation de la vitesse de 30 à 80 m/min, contribue à une diminution des trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z) respectivement de (38.23 ; 46.89 ; 7.92)% pour le CBN, de (34.12 ; 36.68; 48.83)% pour la céramique revêtue CC6050, de (21.19 ; 38.01; 21.61)% pour la céramique mixte CC650, de (59.88; 36.72; 35.55)% pour la céramique composite CC670 et de (16.01; 4.69; 7.98)% pour le carbure GC4005.

- Les résultats de la température de coupe, montrent que la grande quantité de chaleur produite pendant l'usinage est évacuée principalement par le copeau, à $V_c = 320$ m/min la température maximale du copeau atteint 580°C , sur la surface d'attaque de l'outil est de 70°C et elle ne dépasse pas 40°C sur la pièce. Ceci indique que la pièce ne sera pas affectée thermiquement.
- La qualité des surfaces obtenues lors de l'usinage avec l'outil en CBN 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 a noté aussi d'après l'étude de l'influence des conditions de coupe sur la rugosité que le facteur le plus intervenant sur 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. Malgré l'évolution de VB jusqu'à **0.3** mm, la majorité des valeurs enregistrées de **Ra** n'ont pas dépassé la valeur de **1 μm** .
- Les différents modèles de la rugosité indiquent que l'avance est le facteur qui influe sur les différents critères de rugosité (Ra, Rt, Rz), sa contribution dépasse 87% pour Ra, 97% pour Rz et Rt.
- 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 66% pour F_y , 74% pour F_z et 73% pour F_x .
- Les résultats de la température de coupe montre que la vitesse de coupe influe sur la t° (contribution 55%), suivie par la profondeur de passe (contribution 22%), l'avance (8%) et en dernier lieu le rayon du bec de l'outil avec une contribution de 4%.
- Les résultats avec la céramique mixte CC6050 confirment les résultats de la rugosité avec le CBN, que l'avance reste le facteur le plus influent.
- Les résultats de l'effet de la dureté de la pièce montrent que les trois composantes de l'effort de coupe augmentent avec l'augmentation de la dureté, mais les trois critères de la rugosité diminuent.
- La détermination des modèles mathématiques concernant, la tenue, les efforts de coupe, la rugosité et la température de coupe, nous a permis d'en déduire le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe. Ces modèles représentent aussi un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent la détermination des conditions d'usinage optimales et l'élaboration des abaques.

PERSPECTIVES

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

- Etude de l'impact de l'usure et des conditions de coupe sur les vibrations (accélérations et déplacement) générées lors du processus de coupe en tournage dur.
- Etude de l'effet de la dureté de l'acier AISI D3 sur les différents paramètres de sortie (usure et température de coupe).
- Elaboration de des modèles mathématiques de (l'usure, la rugosité, les efforts de coupe) en tenant compte d'un grand nombre de paramètres, telles que (la géométrie de l'outil, la rigidité de l'outil).
- Etudier l'influence de l'usure sur la précision dimensionnelle de la pièce et sur le recule de l'arête de l'outil.

Liste des Publications et Communications

Les travaux de thèse réalisés ont donné lieu à des publications et à des communications avec comité de lecture.

PUBLICATIONS

1- Bouchelaghem H, Yallese M A, Amirat A, Belhadi S, Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel, revue Mechanika, n° 3(65) 2007, pp. 57-65.

<http://zurnalas.mechanika.ktu.lt/?lang=2>

2- M.A.Yallese, H.Bouchelaghem, S.Belhadi, K.Bouacha, N.Kribes, Investigation expérimentale sur les efforts et la température de coupe en tournage dur, Communication Science & Technologie n° 7. Janvier 2009 COST.

<http://193.194.87.163:90/spip.php?rubrique95>

3- M.A. Yallese, H. Bouchelaghem, S. Belhadi, N. Kribes, Investigation expérimentale sur l'usure des outils de coupe en CBN lors du tournage des pièces dures. Sciences & Technologie b – n°26, décembre 2007, pp 15-22.

<http://www.umc.edu.dz>

4- H. Bouchelaghem; M. A. Yallese; A. Amirat; T. Mabrouki; J. F. Rigal, Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). Machining Science and Technology 14, 8 décembre 2010, pp 471–501.

<http://www.informaworld.com>

COMMUNICATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES

1- 5^{ème} Journées de Mécanique de l'EMP 2006 Etude de l'impact des conditions d'usinage et de l'usure sur les efforts de coupe lors du tournage d'un acier traité (60 HRC)

H. Bouchelaghem, M.A. Yallese, L. Boulanouar, S. Belhadi, N. Kribes, S. Khamel

2- 1^{ères} journées nationales de l'ingénierie mécanique 13-14 juin 2006 Constantine Etude du comportement à l'usure de l'outil CBN lors de l'usinage de l'acier AISI D3

H. Bouchelaghem, M.A. Yallese, L. Boulanouar, S. Belhadi, N. Kribes,

3- International conference on mechanics and materials ICMM06 04-06 nov 2006 Sétif Investigation expérimentale sur l'usure des outils de coupe lors du tournage dur

H. Bouchelaghem, M.A. Yallese, S. Belhadi, N. Kribes, S. Khamel

4- 6ème Séminaire National de mécanique 07-08 nov 2006 Annaba, Investigation expérimentale sur les efforts et la température de coupe lors du tournage de l'acier fortement allié AISI D3.

H. Bouchelaghem, M.A. Yallese, L. Boulanouar, S. Belhadi, N. Kribes, S. Khamel

5- Deuxième Congrès International Conception et modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM'2007, 19-21 Mars 2007 Monastir, Tunisie. Influence des conditions de coupe sur la rugosité de l'acier traité X200Cr12 en usinage dur.

H. Bouchelaghem, M.A. Yallese, S. Belhadi, N. Kribes, K. Bouacha, S. Khamel

6- Deuxième Congrès International Conception et modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM'2007, 19-21 Mars 2007 Monastir, Tunisie. Investigation expérimentale sur l'usure des outils en CBN lors de l'usinage de l'acier AISI D3 (60HRC).

M.A. Yallese, H. Bouchelaghem, S. Belhadi, K. Bouacha & N. Kribes

7- Conférence internationale sur la métallurgie & l'environnement cime_07Annaba 23, 24 et 25 Avril 2007. Intérêt du nitrure de bore cubique (CBN) dans l'usinage écologique des aciers durs.

H. Bouchelaghem, M. A. Yallese, S. Belhadi, K. Bouacha

8- Congrès algérien de Mécanique de construction, (CAM) Alger 29-30 Avril 2007.

Influence des conditions de coupe sur la rugosité de l'acier traité AISI D3 usiné avec un outil CBN.

H. Bouchelaghem, M.A. Yallese, S. Belhadi, N. Kribes, S. Khamel

9- The fourth TSS international conference on advances in mechanical engineering and mechanics (ICAMEM2008), Sousse – Tunisia, December 16-18. Wear behaviour of CBN tool when turning hardened AISI D3 steel;

M.A. Yallese, S. Belhadi, H. Bouchelaghem, A. Amirat and K. Chaoui

BIBLIOGRAPHIE

- [ALT 98] **Taylan Altan, Peter Fallböhmer, Ciro A. Rodriguez and Tugrul Özel**, High Speed Cutting of Cast Iron and Alloy Steels – State of Research, VDI BERICHTE NR.1399, 1998.
- [AMR 87] **Amri. B**, Contribution à l'étude du comportement des matériaux modernes pour outils coupants, Thèse, INSA-Lyon, 1987, pp. 43-44.
- [AND 84] **Andonov. I, Bekech. Y.**, Analyse et synthèse des processus technologiques en construction mécanique, Technica, Sofia 1984.
- [Ay 97] **H. Ay**, Heat transfer and life of metal cutting tools in turning, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 41, 1998, pp. 613-623.
- [BAC 99] **Bacci M., J. Wallbank J.**, Cutting temperature prediction and measurement methods-a review, J. Mater. Process. Technol. N°88, 1999, pp. 195-202.
- [BAG 90] **F. BAGUR**. Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'ingénieur, Traité de génie mécanique. BM 7080, 1990.
- [BAR 01] **Barry.J ; Byrne.G.**, Cutting tool wear in the machining of hardened steels, Part I : alumina / Tic cutting tool wear ; wear ; vol -(247), 2001, pp. 139-151.
- [BAT 02] **J.-L. Battaglia, H. Elmoussami, L. Puigsegur**, Modélisation du comportement thermique d'un outil de fraisage : approche par identification de système non entier, C. R. Mécanique Vol. 330, 2002, pp. 857-864.
- [BEC 92] **Becir. K** « Étude de l'usinage des aciers trempés avec des outils en nitrure de bore cubique (CBN) » Annaba, 1992, pp.72-73.
- [BED 89] **Bedrin.C; Roumesy.B.**, Usinage par outil coupant Fascicule 1-2, INSA Lyon 1989.
- [BER 74] **Bernard. J** « le diamant, outil de rectification et de coupe » MACH- modernes, 04/1974.
- [BER 92] **A. Berktold** Drehräumen gehärteter stahlwerkstoffe. PhD thesis, RWTH Aachen, published in VDI – Verlag, 1992.
- [BIS 05] **S. Bissey**, Développement d'un modèle d'effort de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités. Thèse en procédé de fabrication. ENSAM, N° d'ordre : 2005-04 2005.
- [BIT 93] **Bittes G.**, Contribution à la connaissance des mécanismes fondamentaux liés à l'usinabilité des aciers de construction mécanique, Masters's thesis, Université de Toulon, 1993.
- [BOD 90] **Bodart .E**, « Une méthode rapide de mesure de l'usinabilité et les essais de longue durée » CIRP ANNALLEN, 09/1990, pp.261-263.
- [BOG 96] **Boggio.U**; The recipe for good hard turning; Manufacturing Engineering; March 1996; pp. 95-105.
- [BOU 97] **Boulanouar L., Belhadi S. et Lahrache T.**, Influence de la géométrie sur la durée de vie d'un outil de tour en acier rapide, Matériaux et technique N° 9-10, 1997, pp. 43-46.
- [BOU 93] **Bouzid W.**, Etude expérimentale et numérique de la coupe orthogonale, Master's thesis, ENSAM Paris, 1993.
- [BOU 05] **Boutin Y.**, L'usinage a Grande Vitesse (6 de 6), section : les matériaux d'outils de coupe <http://magazinemci.com/supmetal/articles/2005/08/aout0506.htm> _ 16/01/2008
- [BOU 06] **Bouchelaghem.H, Yaltese.M.A, Belhadi.S, Khamel.S**, Investigation expérimentale sur l'usure des outils de coupe lors du tournage dur de l'acier AISI D3, Int. conf. on mechanics and materials ICMM06, Setif. Nov 2006.
- [BOU 06] **H. Bouchelaghem**, étude de l'impact des conditions de coupe et de l'usure sur les paramètres technologique lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D3, mémoire de magister, 2006.

- [BOS 90] **Bossom.P.K**, Finish machining of hard ferrous work pieces; industriel Diamond Review; vol (5) ,1990, pp.228-233.
- [BRO 82] **R.H.Brown**, « l'usure des outils de coupe a faible profondeur de passe » Microtecnic, VOL XVII n°1, 1982, pp.13-19.
- [CAL 95] **Le Calvez C.**- Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone- Thèse de doctorat de L' ENSAM Paris ,1995.
- [CLE 02] **Clément.B**, Design and analysis of experiments, Génistat Conseils Inc., 2002.
- [CAL 98] **Calderon.J**, Caractérisation dynamique du système pièce outil machine : usinage des pièces minces, Thèse, INSA Lyon, 1998, pp. 44-45
- [CET 79] **CETIM**. Etude de l'usinage à grande vitesse, Décision d'aide N°: 72-7-0669. 1979.
- [CHA 91] **Chan C.L. et Chandra A.**, A boundary element method analysis of the thermal aspect of metal cutting processes, Trans. ASME, J. Eng. Ind. 113, 1991, pp. 311-319.
- [CHE 00] **Chen, W.**, (2000) cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools. Int.J. Mach. Tools Manuf.40, 455-466
- [CHO 03] **Chou YK, Evans CJ, Barash MM** Experimental investigation on CBN turning of AISI 52100 steel. J Mater Process Technol 134, 2003, pp.1-9
- [COS 07] **J.P Costes., Y Guillet., G Poulachon., M Dessoly.**; Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718, Journal of MACHINT TOOLS & MANUFACTURE 47, 2007, pp. 1081-1087.
- [CUN 92] **CUNAT P.**; Aciers inoxydables "Mise en œuvre", Techniques de l'ingénieur M4542.
- [CZA 62] **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.
- [DAS 99] **M.B. da Silva, J. Wallbank**, Cutting temperature: prediction and measurement methods - a review, Journal of Materials Processing Technology Vol. 88,1999, pp.195-202.
- [DAV 96] **Davies, M.A., Fick, S.E., Evans, C.J.**, “ Dynamic Measurement of Shear Band Formation in Precision Hard Turning”, in Liber Amicorum, Professor Paul Vanherck, Ingenieur and Pedagog, ISBN 90-73802-56-3, Katholieke Universiteit Press, Leuven, Chapter 5; 1996.
- [DAV 07] **J Paulo Davim* and L Figueira**, Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel. Proc. IMechE Vol. 221 Part B: J. Engineering Manufacture, 2007, pp. 625-633.
- [DAW 02] **Dawson.T.G**; Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools Gorgia institute of technology 2002.
- [DEU 01] **Friederike Deuerler, Heiko Gruner, Michael Pohl, Ladji Tikana**, Wear mechanisms of diamond-coated tools, Surface and Coatings Technology 142-144, 2001, pp.674-680.
- [DES 03] **L. Deshayes.**, Méthodologie d'étude de la coupe. Liaison entre Couple Outil Matière et système Pièce Outil Machine, Thèse de doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2003.
- [DOL 01] **Slavko Dolinšek, Borivoj Šuštarši, Janez Kopa**, Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes, Wear 250, 2001, pp. 349-356.
- [DUR 09] **J S Dureja, V K Gupta, V S Sharma2, and M Dogra**, Design optimization of cutting conditions and analysis of their effect on tool wear and surface roughness during hard turning of AISI-H11 steel with a coated-mixed ceramic tool, Proc. IMechE Vol. 223 Part B: J. Engineering Manufacture, 2009, pp.1442-1453.
- [DUR 09] **J S. Dureja, V K Gupta, V S Sharma2, et M Dogra**, Wear mechanisms of coated mixed-ceramic tool during finish hard turning of hot tool die steel, Proc. IMechE Vol. 223 Part C: J. Mechanical Engineering Science, 2009, pp.1-11
- [ENA 72] **S. Enache**, La qualité des surfaces usinées, **Dunod**, Paris 1972.
- [END 02] **Endres, J. W., Loo, M.** - Modeling cutting process nonlinearity for stability analysis – application to tooling selection for valve-seat machining. In: Proc. 5th International workshop on modelling of machining operations, May 2002, pp. 71-81.

- [ELB 96] **M.A. Elbestawi, A.K. Srivastava, T. El-Wardany**, A model for chip formation when machining hardened steel. *Annals of the CIRP*. Vol. 45/1, 1996, pp. 71-76.
- [ESL 04] **E. Aslan**, Experimental investigation of cutting tool performance in high speed cutting of hardened X210 Cr12 cold-work tool steel (62 HRC) *Materials et design*, 2004, pp.21-27.
- [FAR 03] **Z.N. Farhat**, Wear mechanism of CBN cutting tool during high-speed machining of mold steel, *Materials Science and Engineering A361* 2003, pp. 100–110.
- [FAR 08] **F.Mahfoudi, G.List, A. Molinari et A.H Moufki, L.Boulanouar**, High speed turning for hard material with PCBN inserts: tool wear analysis, *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, Vol. 3, Nos. 1/2, 2008, pp.62-79.
- [FNI 08] **B. Fnides**, évaluation des performances des matériaux de coupe lors de l'usinage de l'acier x38crmov5-1, 2008,mémoire de magister.
- [GAI 09] **V.N. Gaitonde , S.R. Karnik , Luis Figueira , J. Paulo Davim**, Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27 (2009) 754–763.
- [GEI 99] **Geiskopt F., calandon y. et Due E.**, usinage à grande vitesse, Nipport ENScachan, LURPA, 1999.
- [GON 98] **Gonthier J.R.**, Tournage des matières trempées, *Marchés systèmes management*, N° 9, 27 août 1998.
- [GRU 03] **J. Grum, M. Kisin**, Influence of microstructure on surface integrity in turning – part I : the influence of the size of the soft phase in a microstructure on surface-roughness formation, *International journal of machine Tools & Manufacture* 43. 2003, pp. 1535-1543.
- [HAB 06]**M. Habek**, étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100cr6, l'école nationale supérieure d'arts et métiers, spécialité “ mécanique - matériaux - procédés ”, le 11 décembre, 2006.
- [HAM 96] **Hamann, J. C., Grolleau, V., Le Maître, F.** - Machinability Improvement of Steels at High Cutting Speeds – Study of Tool/Work Material Interaction. *Annals of the CIRP*, 1996, Vol 45, n°1, pp. 87-92.
- [HUA 03] **Y. Huang, S. Y. Liang**, Modeling of CBN Tool Flank Wear Progression in Finish Hard Turning, *journal of manufacturing science and engineering*. Manuscript received July 2003.
- [HUA 04] **Huang, Y.; Liang, S.Y.** Modeling of CBN tool flank wear progression in finish hard turning.*J. Mfg. Sci. Eng.* 126:2004, pp.98–106.
- [HUG 95] **Hug J. L.**, Tournage des métaux durs, *Machine de production*, 110, 1995, pp.17-19.
- [KEV 03] **Kevin Y. Chou C., Evans J. and Barash M.M**, Experimental investigation on cubic boron nitride turning of hardened AISI 52100 steel, *J. Mater Process Technology*. V (134), 2003, pp. 1-9,
- [KIS 97] **H.A. Kishawy, M.A. Elbestawi** Effect of process parameters on chip formation when machining hardened steel. *International Mechanical Engineering Congress and Expansion*, ASME-MED 6-2, Dallas, Texas, 1997, pp. 62-66
- [KOM 81] **R. Komanduri, R.H. Brown**, The mechanics of chip segmentation in machining. *ASME. Journal of Engineering for Industry*. (1981)Vol. 103, pp. 33-51.
- [KOM 82] **R. Komanduri, T. Schroeder, B.F. Von Turkovich, J. Hazra, D.G. Flom**, On the catastrophic shear instability in high speed machining of AISI 4340 steel. *Trans. ASME. Journal of Engineering for Industry*. Vol. 104, 1982, pp. 121-131.
- [KOM 85] **R. Komanduri** « Substitution inthe Vs of ceramic tools for conventional tools containing strategie minerals- Wta / Co » *Hard Metals* 4 (3), 1985, pp.128-132.
- [KÖN 84] **KÖning W et al.**, “Machining of hard materiels”, *Annals of the CIRP*, 1984, pp. 417-427.
- [KON 87]**Konig W., Wand Th.**, Turning bearing steel steel with amborite and ceramic, *Industrial diamond review*, N°3, 1987, pp. 117-120.

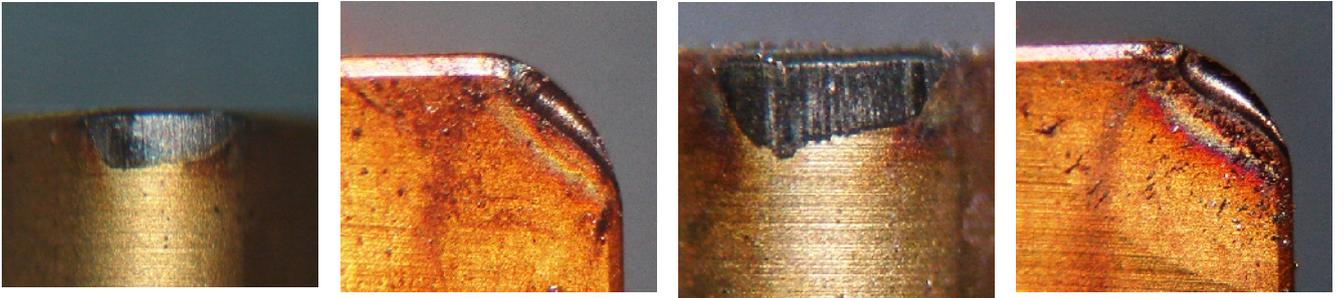
- [KÖN 90] **KÖning W., M. Klinger, R. link**, “Machining hard material with geometrically Defined cutting Edges- Field of Application and limitations”, Annals of the CIRP. Vol 39/1/1990, pp.61-64.
- [KOP 01] **Kopac.J**,Hardening phenomena of Mn-austenite steels in tge cutting process, J. Mater. Process. Technol. 109,2001, pp.96-104.
- [KUM 06] **Kumar A., Durai A., Sornakumar T.**, 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, 173,2006, pp. 151-156.
- [LAH 07] **Lahiff,C,Gordon,S.Phelan,P.**, PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning. Robot. Comput. Integr. Manuf, 2007, 23, pp.638-644.
- [LIM 05] **J.G. Lima, R.F. vila, A.M. Abra ̃o, M. Faustino , J. Paulo Davim**. Hard turning: AISI 4340 high strength alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. J Mater Process Tech 2005;169:pp.388–95.
- [LIU 03] **K. Liu, X.P. Li, M. Rahman, X.D. Liu**, CBN tool wear in ductile cutting of tungsten carbide, Wear 255,2003, pp.1344–1351.
- [LIQ 07] **L. Qian, M.R. Hossan**, Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts, J. Mater. Process. Tech. 2007, doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.03.022.
- [LIS 04] **Gautier List**, étude des mécanismes d’endommagement des outils carbure wc-co par la caractérisation de l’interface outil-copeau application a l’usinage a sec de l’alliage d’aluminium aéronautique a2024 t351, l’école nationale supérieure d’arts et métiers, thèse 2004.
- [LUO 97] **Luo. S.Y., et Liano.S.Y.**, “ Wear characteristics in turning high haedness alloy steel by ceramic and CBN tools”Journal of Processing Technology 88, 1999, pp. 114-121.
- [LUO 99] **Luo, S.Y.; Liao,Y.S.,Tsai, Y.Y.**, wear characteristics turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools; Journal of Materiels processing technology, vol.(88),1999,pp.114-121.
- [MAC 00] **Mach’Pro** Qui coupe quoi. Edition 15 novembre 2000.
- [MAI 02] **Sophie Maire** – Rationalisation industrielle des techniques de tournage dur. Mémoire CNAM, soutenu le 27 sept. 2002 au CNAM de Paris.
- [MAT 87] **Y. Matsumcoto, M.M. Barash, C.R. Liu**, Cutting mechanism during machining of hardened steed. Materials Science and Technology. Vol. 13, 1987, pp. 229-305.
- [MAT 96] **Matsumoto, Y.,Narutaki, N.**, “ tool workpiece interaction in precision Hard turning” Finer points, vol. (8) n° .(4) ,1996, pp.14-16.
- [MAT 70] **P Mathon**; usinabilité et lois générales d’usinage des aciers et des fontes. Mec, Mat, Elec. N° 246-247, pp. 23-43.
- [MAY 78] **R. Mayer** « Evolution des outils de coupe, acier rapide et Métaux durs » Aciers spéciaux n°43, 1978.
- [MOS 75] **A. Mosan** « Optimisation économique des opérations de tournage » Ingénieurs et techniciens 12,1975, pp.43-48.
- [M’SA 04]**R. M’Saoubi, H. Chandrasekaran**, Investigation of the effects of tool micro-geometry and coating on tool temperature during orthogonal turning of quenched and tempered steel, International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 44, 2004, pp.213-224.
- [NAB 01] **Nabani. F**, Wear mechanisms of ultra-hard cutting tools materials, J. Mater. Process. Technol. 115, 2001, pp.1388-1394.
- [NAK 74] **K. Nakayama**, The formation of saw-toothed chip in metal cutting. Proc. Of Int. Conf. on Production Engineering. Part I, Tokyo,1974, pp. 572-577.
- [NAK 88] **Nakamaya, M. Arai, T. Kanda**, Machining characteristics of hard materials, Ann. CIRP 37 (1), 1988, pp.89-92.
- [NEO 03] **Neo K.S., Rahman M., Li X.P., Khoo H.H., Sawa M., Maeda Y.**, Performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel, Journal of Material Processing Technology, 140, 2003, pp. 326–331.
- [NF-E-66-520 97] **NF E 66-520-1**. Working zones of cutting tools – Couple Tool-material – part1 : general presentation. Sept 1997, AFNOR, ISSN 0335-3931.

- [**NORME 94**] Couple Outil-Matière : Domaine de Fonctionnement des Outils Coupants. Norme AFNOR NF E 66-520, 1994, pp.1 à 6.
- [**NOT 81**] **Notter A.T, Heath J.P.**, usinage des métaux ferreux de grande dureté à l'aide de l'amborite, Matériaux et Techniques, N°386, 1981, pp.301-308.
- [**NOO 04**] **Noordin.M.Y, Venkatesh.V.C, Sharif.S, Elting.S, Abdullah.A**, Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel. . J Mater Process Tech 2004, pp.46:58-145.
- [**OBI 96**] **Obikawa T., Usui E.**, Computational machining of titanium alloy- finite element modeling and a few results, Trans. ASME, J. Manuf. Sci. Eng 118, 1996, pp. 208-215.
- [**O'SU 01**] **O'sullivan D., Cotterell M., Temperature** measurement in single point turning. J. Mater. Process. Technol. N° 118, 2001, pp. 301-308.
- [**ÖZE 05**] **Özel, T, Hsu TK, Zeren E.** Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. Int J Adv Manuf Technol; 25(3-4), 2005, pp.262-269.
- [**PAU 06**] **Paulo .J and al.**, Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques. Materials et design, 2006, pp.1187-1191.
- [**PAS 87**] **Pastor H.**, Etat actuel et développement des matériaux durs et superdurs, Matériaux et techniques, 2 ème partie, 1987, pp.319-327.
- [**PAS 96**] **Pastor H.**, The evolution of cutting tool materials, Bulletin du Cercle d'Etudes des Métaux, N°13, Novembre 1996, 7. pp.1-7.11.
- [**PAG 03**] **Pagès, C.** Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition. Mécanique. France, Ecole Centrale de Lyon (2003).
- [**PAN 98**] **Pantale O.**, Développement d'un modèle numérique de la coupe des métaux, thèse de doctorat, 1998.
- [**PAW 07**]**R.S Pawade.Suhas S.Joshi.P.K Brahmkar.M Rahman.**;An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718, Journal of Materials Processing Technology 51, 2007, pp. 1220-1224.
- [**PIE 88**] **J.P. Pierozak**, « Coupe des métaux » office des publications universitaires, 11/88, pp.10-16.
- [**POT 04**] **Y.K. Potdar, A.T. Zehnder**, Temperature and Deformation Measurements in Transient Metal Cutting, Experimental Mechanics Vol. 44, 2004, pp.1-9.
- [**POU 99**] **Poulachan G.**, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Thèse de doctorat de L'ENSAM de cluny, 1999.
- [**POU 03**] **Poulachon G., A. Moisan**, “ Performance evaluation on hardned steel- P-CBN tool pair in high speed turning”, Matériaux et Techniques, N° 1-2, 2003, pp.23-34.
- [**POU 03**] **G. Poulachon, B.P. Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, S. Pheulpin, E. Seguin**, The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, Int. J. Machine Tools Manuf. 43, 2003, pp.139-144.
- [**POU 04**] **G. Poulachon**, Usinabilité des matériaux difficiles : application aux aciers durcis. Techniques de l'ingénieur, BM7048, 2004.
- [**REC 04**] **J. Rech, A. Kusiak, J.-L. Battaglia**, Tribological and thermal functions of cutting tool coatings, Surface and Coatings Technology Vol. 186, 2004, pp.364-371.
- [**REM 06**] **Remadna. M, J-F Rigal**, Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts, Journal of processing Technology 178, 2006, pp. 67-75.
- [**REM 01**] **Ramadna. M**, “Le comportement du système usinant en tournage dur. Application en cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN”. Thèse de doctorat. INSA. LYON. 2001
- [**ROB 73**] **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.
- [**ROU 75**] **Roumesy B.**, Determination des lois d'usure, Machines- outils, N° 301,1975.

- [SAD 06] **Sadettin. O, Osman Er. A, Camuşcu.N, Aslan.E**, Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. *ndteint* 40.2006, pp.121-126.
- [SAF 07] Catalogue de tournage, 2007 – Documentation Valenite Safety.
- [SCH 01] **Schmitz, T. L., Davies, M. A, Kennedy, M. D.** Tool point frequency response prediction for high-speed machining by RCSA, *Trans. ASME, J. Manufacturing Science and Engineering*, Nov. Vol 123,2001, pp. 700 -707.
- [SCH 00] **Schmitz, T. L.** Predicting High-Speed Machining dynamic by structure Analysis, *CIRP Annals*, Jan. Vol 49, n°1, 2000, pp. 303-308.
- [SHA 76] **M.C. Shaw**, Assessment of machinability, vol. 11ISI special report 94, the Iron steel, Institute, London 1976.
- [STE 92] **Stephenson D. A., Ali A.**, Tool temperature in interrupted metal cutting, *Journal of Engineering for industry*, N°136, 1992, pp.114-127.
- [STE 93] **Stephenson D. A.**, Tool-work thermocouple temperature measurements-theory and implementation issues, *Journal of Engineering for industry*, N°115, 1993, pp. 432-437.
- [SUT 03] **G. Sutter, L. Faure, A. Molinari, N. Ranc, V. Pina**, An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 43, 2003, pp.671-678.
- [TAK 83] **Takatsu,S., Shimoda, H., and Otani, K.**, “effects of CBN content on the cutting performance of polycrystalline CBN tools”, *Internation Journal of Refractory and Hard Metals*, vol.(2) N°.4, 1983, pp.175-178.
- [THI 99] **Thiel. J.D, S.N.Melkote**, Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. *J .Mater. Process. Tehnol.* 94, 1999, pp. 216-226.
- [THI 00] **Thiele, Jeffrey D, Melkote, Shreyes N**, Effect of tool edge geometry on workpiece subsurface deformation and through-thickness residual stresses for hard turning of AISI 52100 steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 2000.
- [TRA 04] Tournage: des matières de plus en plus dures usinées de plus en plus vite *TraMetal*, oct 2004, pp. 1-11.
- [USM 07] **Mohammad Usman Ghani & Nuri A. Abukhshim &M. A. Sheikh**, An investigation of heat partition and tool wear in hard turning of H13 tool steel with CBN cutting tools. *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-007-1282-7, 9 October 2007, pp.1-15.
- [VAS 08] **Brigitte Vasques**, étude du comportement du rayon d’arête et de son influence sur l’intégrité de surface en tournage à sec. Docteur de l’université François – Rabelais, 17 juin 2008
- [VER 04] **K.M. Vernaza-Peña, J.J. Mason, M. Li**, Experimental Study of the Temperature Field Generated During Orthogonal Machining of an Aluminum Alloy, *Experimental Mechanics* Vol. 42 2004, pp.221-229.
- [VYA 99] **A. Vyas, M.C. Shaw**, Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 121, 1999, pp. 163-172.
- [WAN 03] **J. Wang., C.Z. Huang1, W.G. Song**, The effect of tool flank wear on the orthogonal cutting process and its practical implications, *Journal of Materials Processing Technology* 142 2003, pp. 338–346
- [WAR 00] **T.I. El-Wardany, H.A. Kishawy, M.A. Elsbetawi**, Surface integrity of die material in high-speed hard machining. Part 1. Micrographical analysis, *J. Manuf. Sci. Eng.* 122 (4), 2000, pp. 620–631.
- [WEI 71] **Weil R.**, Techniques d’usinage, Dunod, Paris 1971.
- [WER 85] **Werner G., Knappert W.**, Machining hardened bearing races with Pc-BN, *Industriel diamond review*, N°3, 1985, pp.117-120.
- [YAL 04] **Yallesc.M.A, Boulanouar.L et Chaoui.K**, Usinage de l’acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique, *Revue Mécanique et industries*, Vol 5, 4, 2004, pp.355-368.

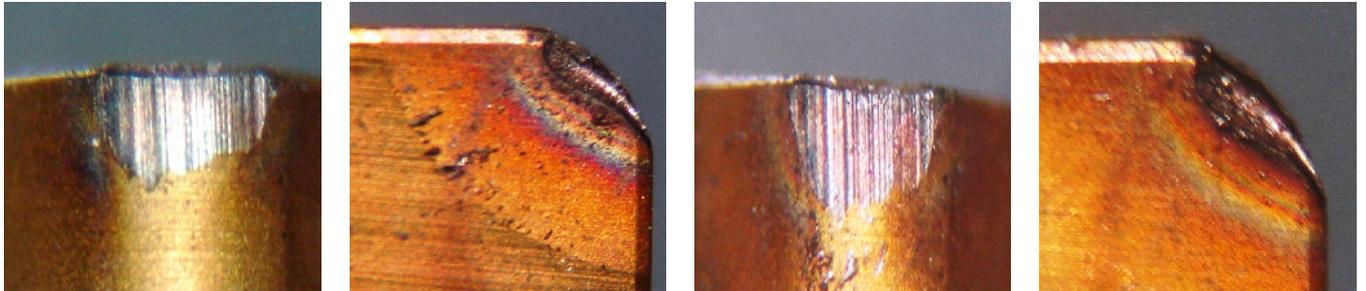
- [YAL 05] Yallese M.A. Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur.** Thèse de doctorat. ANNABA. 2005.
- [YAL 05] Yallese.M.A, Rigal J.F, Chaoui.K et Boulanouar.L,** The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 Steel (60HRC). Journal of engineering Manufacture, Proceedings of the ImechE part B, Vol. 219, 2005, pp.35-55.
- [YAL 09] Yallese MA, Chaoui K, Zeghib N, Boulanouar L, Rigal JF.** Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, journal of materials processing technology 2009, 2009, pp.1092–1104.
- [ZIM 97] Zimmerman, M., Lahres, M., Viens, D.V., Loubé, B.L.,** “ investigation of the wear of cubic boron nitride cutting tools using Auger electron spectroscopy and X-ray analysis by EPMA”, wear, vol. 207, 1997, pp.241-249.

ANNEXE I



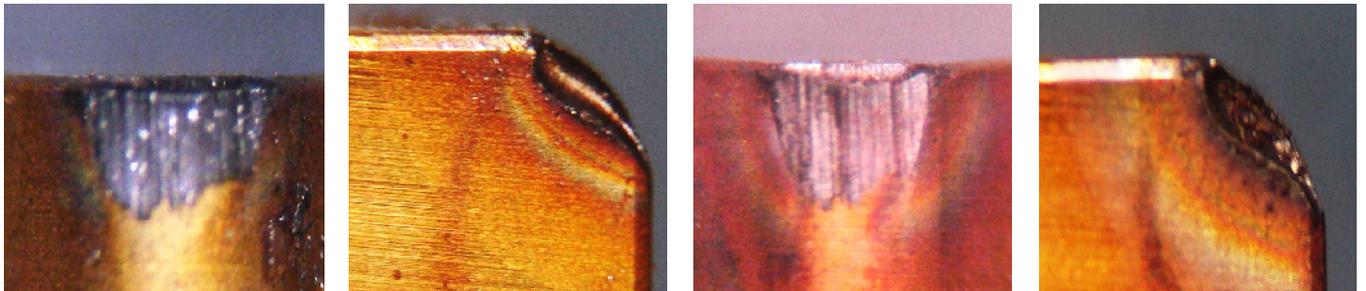
1) $t_1=10$ min

2) $t_2=15$ min



3) $t_3=25$ min

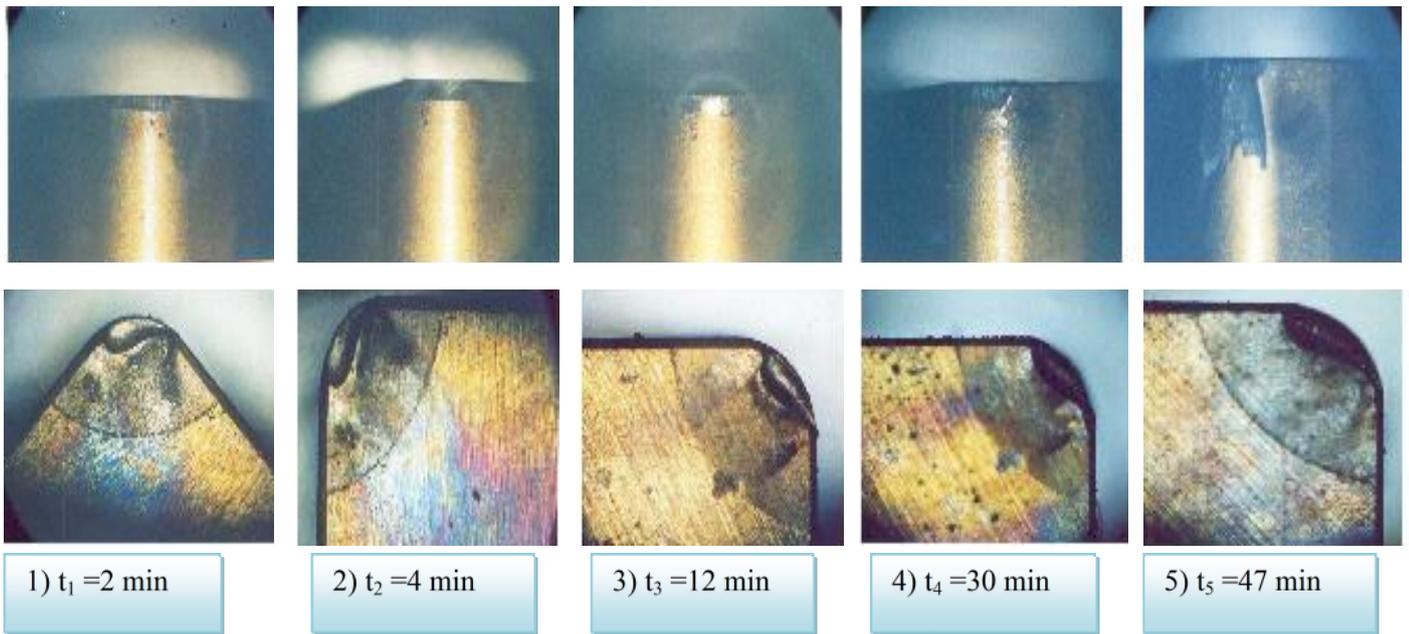
4) $t_4=30$ min



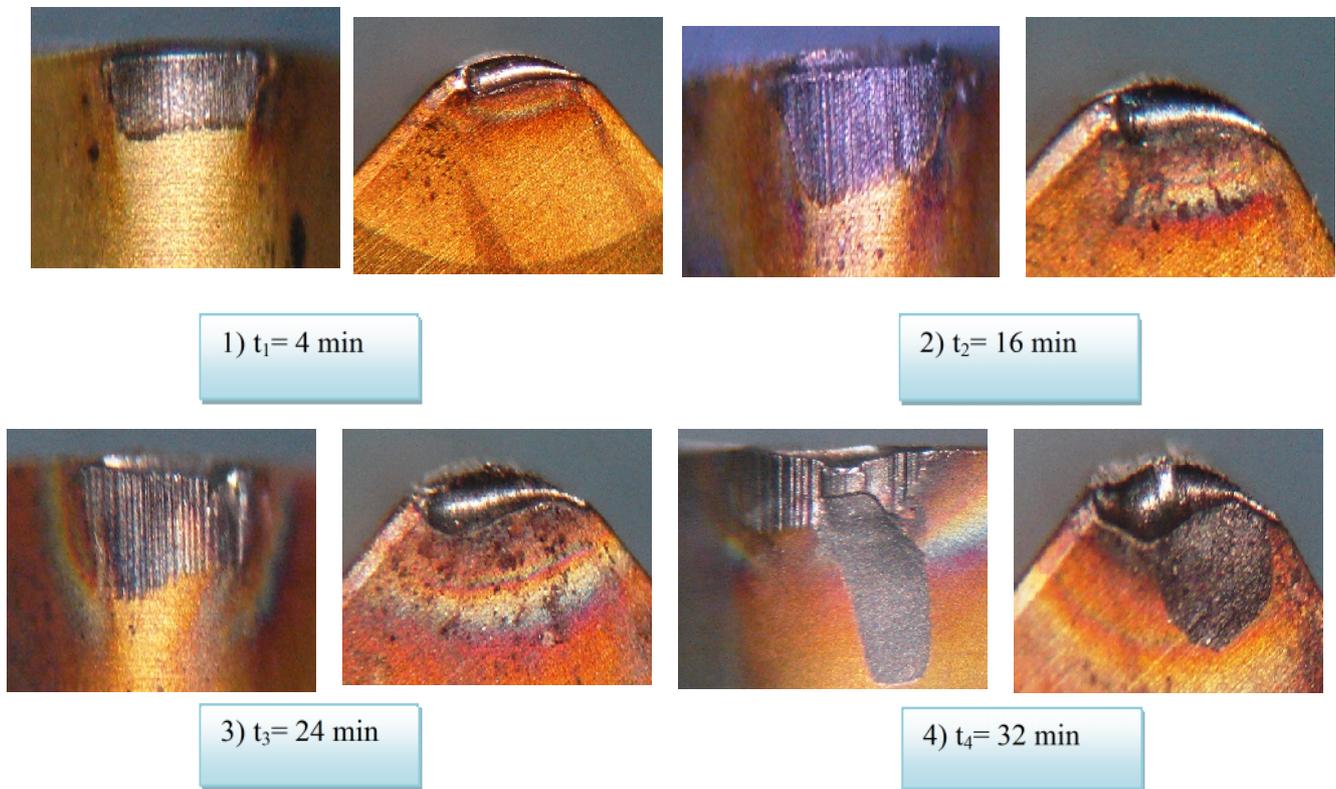
5) $t_5=40$ min

6) $t_6=45$ min

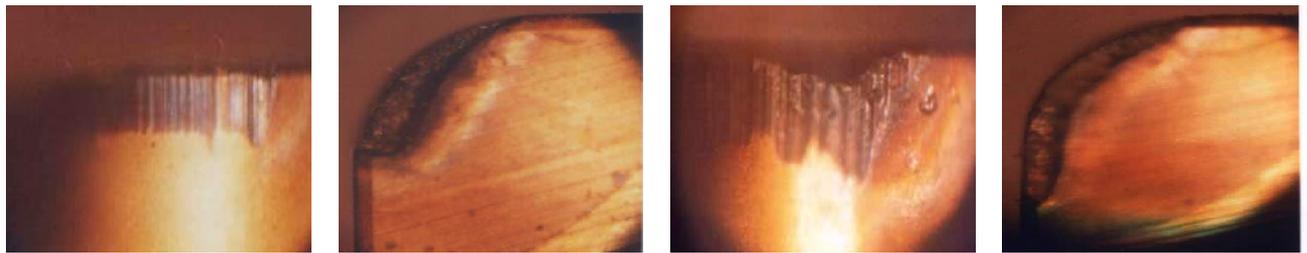
[a]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c= 85\text{m/min}$, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p= 0.5$ mm.



[b]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c = 90\text{m/min}$, $f = 0.14$ mm/tr et $a_p = 0.5\text{mm}$.

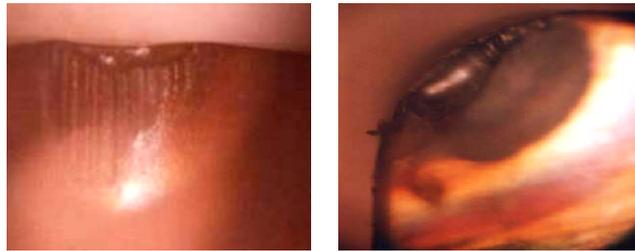


[c]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c = 115\text{m/min}$, $f = 0.08\text{mm/tr}$ et $a_p = 0.5\text{mm}$.



1) $t_1 = 3 \text{ min}$

2) $t_2 = 17.5 \text{ min}$



3) $t_3 = 22 \text{ min}$

[d]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c = 150 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.5 \text{ mm}$.

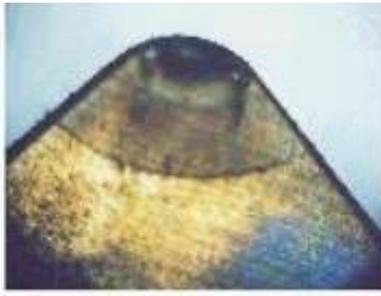
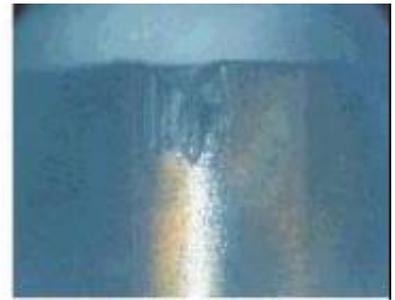


1) $t_1 = 2 \text{ min}$

2) $t_2 = 8 \text{ min}$

3) $t_3 = 16 \text{ min}$

[e]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c = 180 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.5 \text{ mm}$.

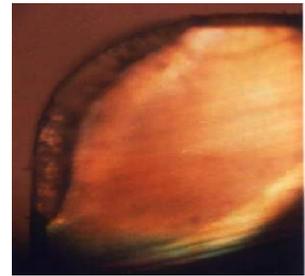
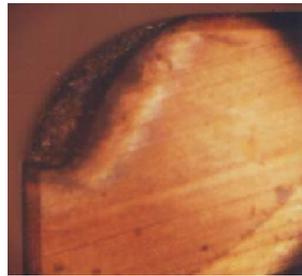
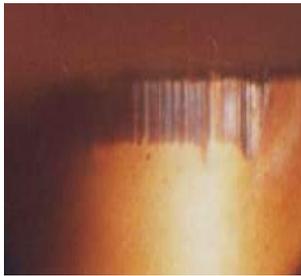


1) $t_1 = 2$ min

2) $t_2 = 8$ min

3) $t_3 = 16$ min

[f]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c = 180\text{m/min}$, $f = 0.14\text{mm/tr}$ et $a_p = 0.5\text{mm}$.



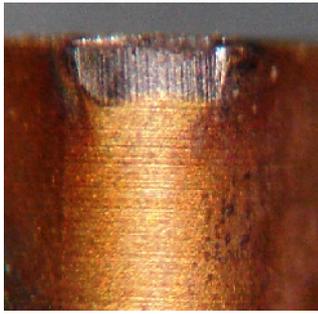
1) $t_1 = 3$ min

2) $t_2 = 17.5$ min

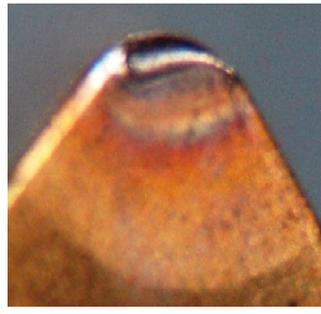


3) $t_3 = 22$ min

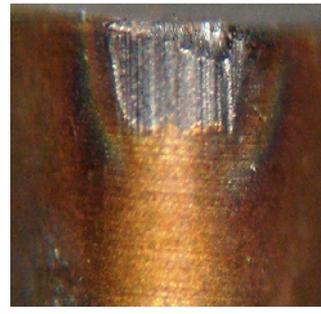
[j]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c = 150\text{m/min}$, $f = 0.08\text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.5\text{ mm}$.



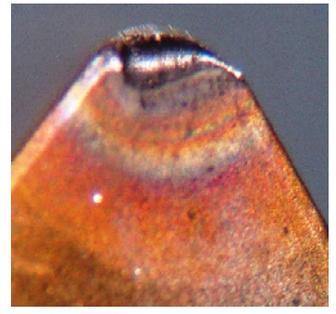
1) $t_1 = 2.5$ min



2) $t_2 = 11$ min



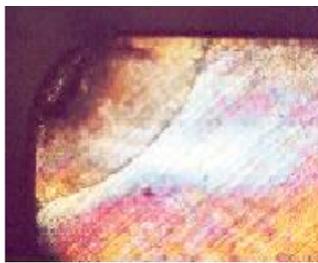
3) $t_3 = 16$ min



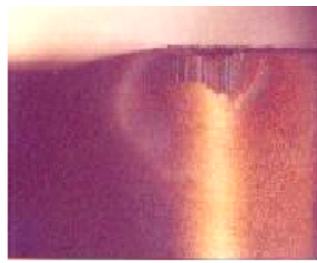
[j]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c = 200$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm.



1) $t_1 = 1.5$ min



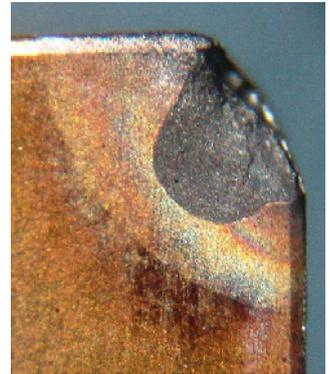
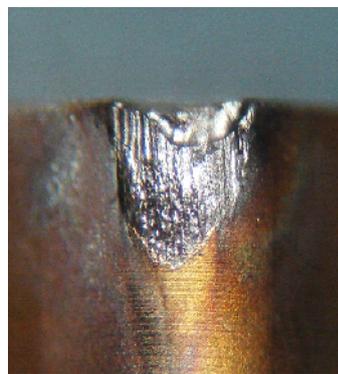
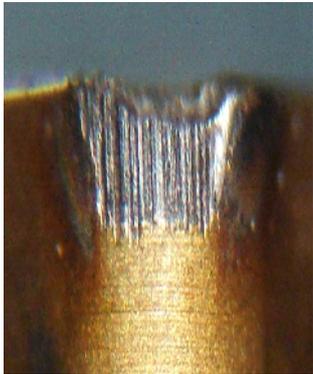
2) $t_2 = 3$ min



3) $t_3 = 14$ min



[k]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c = 240$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_n = 0.5$ mm.



1) $t_1 = 2.5$ min

2) $t_2 = 4$ min

[II]: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère
 $V_c = 310$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm.