

République Algérienne Démocratique & Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 08 Mai 1945 de Guelma

Mémoire de magister



Département de Génie Mécanique

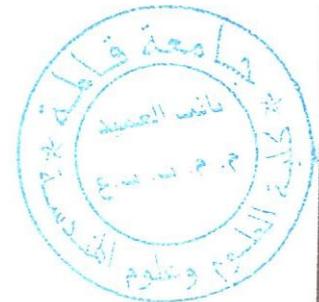
EVALUATION DES PERFORMANCES DES MATERIAUX DE COUPE LORS DE L'USINAGE DE L'ACIER X38CrMoV5-1

Option : Mécanique Productive

Présenté et soutenu publiquement par :
B. FNIDES

Devant le jury composé de MM :

M. LAHMAR	Président	Professeur à l'université de Guelma
K. BEY	Examineur	M/C à l'université de Annaba
S. GUENFOUD	Examineur	M/C à l'université de Guelma
M. A. YALLESE	Rapporteur	M/C à l'université de Guelma
S. BOUTABBA	Membre invité	Dr à l'université de Guelma



2008

Remerciements

Je tiens à remercier vivement mon encadreur le docteur M.A. YALLESE pour son appui scientifique et ses judicieux conseils.

Je remercie également Monsieur le professeur M. LAHMAR pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.

Tous mes remerciements vont à Monsieur K. BEY, à Monsieur S. GUENFOUD et à Monsieur S. BOUTABBA pour leur participation au jury.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur le professeur Mohamed NEMAMCHA, Président de l'université 08 Mai 1945 de Guelma, pour m'avoir autorisé à poursuivre les études en cycle long et en post-graduation.

Que toutes les personnes qui ont assuré ma formation à l'école coranique, à l'école primaire, au CEM, au lycée et à l'université trouvent ici ma reconnaissance la plus sincère.

Je remercie aussi tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de cette tâche et particulièrement MM : Mohamed AIB, A/Aziz MADI, Sofiane BERKANI et Hamdi AOUCI.

J'adresse un salut spécial à Monsieur Hocine FNIDES (l'artiste) pour son aide précieuse.

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

Je dédie ce mémoire aux gens qui se sont sacrifiés pour que la lumière de la science éclaire notre monde et élimine définitivement les ténèbres de l'ignorance.

A nos martyrs

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تقييم تجلية مواد القطع التالية : الكربور غير المكسو H13A، الكربور المكسو GC3015، السرمي غير المكسو CT5015، السرمي المكسو GC1525، الخزف المختلط (الأسود) CC650 و الخزف المقوى (الأخضر) CC670 في الخراطة الصلبة للقطع من [AISI H11] X38CrMoV5-1 ذات صلابة تقدر ب 50HRC. هذا الأخير معد خصيصا لصناعة القوالب.

يحتوي الفصل الأول على دراسة مختلف المراجع حول قطع المواد. خصائص مواد القطع المستعملة في الخراطة الصلبة و الأبحاث العلمية المتعلقة بتصنيع القطع ذات الصلابة العالية قد تم شرحها. الأجهزة التي استعملت في التجارب و شروط الإنجاز تم تعريفها في الفصل الثاني.

أما الفصل الثالث فيعالج تجلية أدوات القطع في ما يخص تآكل الخلو صر، قوى القطع و حالات السطح و تطورها تبعاً لتغيرات أهم عناصر القطع.

دراسة معمقة حول حالة الخزف المختلط (الأسود) CC650 في الخراطة الصلبة للقطع من X38CrMoV5-1 [AISI H11] قد قدمت في الفصل الرابع.

في الفصل الخامس، النماذج الرياضية عينت و الثوابت التابعة لها حددت بواسطة Minitab 13. في الأخير، انهينا هذه المذكرة بخاتمة عامة متبوعة بقائمة المراجع و ملحقات.

Résumé

Ce travail consiste à évaluer les performances des matériaux de coupe suivants : les carbures non revêtus H13A, les carbures revêtus GC3015, les cermets non revêtus CT5015, les cermets revêtus GC1525, les céramiques mixtes CC650 et les céramiques renforcées CC670, en tournage dur à sec de l'acier X38CrMoV5-1 [AISI H11] traité à 50HRC. Cet acier est destiné pour le travail à chaud, exempt de tungstène sur base CrMoV, insensible aux changements de température et ayant une résistance à l'usure élevée. Il est employé pour la fabrication des matrices, des coquilles, des moules et inserts de coulée sous pression fortement sollicités avec durée de vie élevée.

L'étude bibliographique sur la coupe des métaux a été présentée au premier chapitre et dans lequel, nous avons évoqué les caractéristiques des matériaux de coupe utilisés en tournage dur. Les travaux de recherche sur l'usinage des aciers durcis et les phénomènes physiques dans le processus de coupe ont été définis.

Le deuxième chapitre montre les équipements indispensables aux essais et les conditions de coupe retenues.

Le troisième traite les performances des outils de coupe en termes d'usure, d'efforts de coupe et de rugosité des surfaces usinées et leurs évolutions en fonction des éléments du régime de coupe (temps d'usinage, avance par tour, vitesse de coupe et profondeur de passe).

Une étude approfondie sur le comportement à la coupe de la céramique mixte (Al_2O_3+TiC) est faite au quatrième chapitre.

Le cinquième définit les modèles mathématiques liés aux résultats expérimentaux, ainsi les valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ont été calculées à l'aide du logiciel Minitab 13.

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

Abstract

The aim of this work is to evaluate the performances of the following cutting materials : not coated carbides H13A, coated carbides GC3015, not coated cermets CT5015, coated cermets GC1525, mixed ceramics CC650 and reinforced ceramics CC670, in dry hard turning of steel X38CrMoV5-1 [AISI H11] treated at 50HRC. This steel is intended for hot work, free from tungsten on CrMoV basis, insensitive to temperature changes and having a high wear resistance. It is employed for the manufacture of matrices, shells, inserts with high tool life, plastic moulds subject to high stress and forging dies.

The bibliographical study on metal cutting was presented at the first chapter and in which, we evoked the characteristics of cutting materials used in hard turning. The research machining of hardened steels and the physical phenomena in the cutting process were defined.

The second chapter shows the essential equipment to the tests and the selected cutting conditions.

The third treats the performances of the cutting tools in terms of flank wear, cutting forces and roughness of machined surfaces and their evolutions according to the elements of the cutting regime (machining time, feed rate, cutting speed and depth of cut).

A study on the cutting behavior of mixed ceramics ($Al_2O_3 + TiC$) is done in the fourth chapter.

The fifth defines the mathematical models related to the experimental results, thus the values of the coefficients of correlation and the constant partners were calculated using the software Minitab 13.

At the end, we worked out a general conclusion followed by a list of bibliographical references and appendices.

Sommaire

Nomenclature	7
Introduction générale	8
Chapitre I : Etude bibliographique sur la coupe des métaux	
I.1 Introduction	10
I.2 Matériaux de coupe	10
I.2.1 Les carbures	10-13
I.2.2 Les céramiques	13-16
I.2.3 Les cermets	16-17
I.2.4 Le nitrure de bore cubique.....	17-18
I.3 Tournage dur	18-20
I.4 Travaux de recherche sur l'usinage des aciers durcis	20-25
I.5 Phénomènes physiques dans le processus de coupe	26-27
I.5.1 Variables d'entrée	27-28
I.5.2 Paramètres de sortie.....	29-35
I.6 Conclusion	36
Chapitre II : Procédures expérimentales	
II.1 Introduction	38
II.2 Equipements utilisés	38
II.2.1 Eprouvettes	38-39
II.2.2 Machine-outil.....	39-40
II.2.3 Four à chambre électrique (traitement thermique).....	40-41
II.2.4 Duromètre.....	41
II.2.5 Plaquettes de coupe.....	42-44
II.2.6 Porte-outils	44-45
II.2.7 Dynamomètre (platine KISTLER)	45-47
II.2.8 Rugosimètre	47-48
II.2.9 Pyromètre à infrarouge	48
II.2.10 Microscope optique.....	49
II.2.11 Autres équipements	49
II.3 Conditions expérimentales	49-50
II.4 Planification des expériences	50-52
II.5 Conclusion	53

Chapitre III : Résultats des essais d'usinage

III.1 Introduction	55
III.2 Evaluation des performances des outils	55
III.2.1 Evolution de l'usure en fonction du temps d'usinage	55-59
III.2.2 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage ...	59-61
III.2.3 Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage	62-64
III.3 Conclusion	65

Chapitre IV : Comportement de la céramique mixte à la coupe

IV.1 Introduction	67
IV.2 Evolution de l'usure en fonction des conditions de coupe	67-68
IV.3 Evolution des efforts de coupe	69-71
IV.4 Evolution des pressions de coupe et de l'effort résultant	71-75
IV.5 Evolution des rugosités	75-77
IV.6 Evolution de la température dans la zone de coupe	77-79
IV.7 Conclusion	80

Chapitre V : Modèles mathématiques

V.1 Introduction	82
V.2 Modèles des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe	82-86
V.3 Modèles des rugosités en fonction des conditions de coupe	86-89
V.4 Modèle de la durée de vie T en fonction des conditions de coupe	90
V.5 Conclusion	91
- Conclusion générale	92
- Références bibliographiques.....	93-94
- Annexes	95-102

Nomenclature

a_p :	Profondeur de passe (mm).
f :	Avance par tour (mm/tr).
F :	Effort de coupe résultant (N).
$F_x (F_a)$:	Effort de coupe axial (N).
$F_y (F_r)$:	Effort de coupe radial (N).
$F_z (F_v)$:	Effort de coupe tangentiel (N).
HRC :	Dureté Rockwell.
HV :	Dureté Vickers.
K :	Pression (effort spécifique) de coupe (N/mm ²).
K_a :	Pression (effort spécifique) de coupe axiale (N/mm ²).
K_r :	Pression (effort spécifique) de coupe radiale (N/mm ²).
K_v :	Pression (effort spécifique) de coupe tangentielle (N/mm ²).
P_b :	Puissance sur la broche (Watt).
P_c :	Puissance de coupe (Watt).
R^2 :	Coefficient de détermination.
R_a :	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
R_t :	Rugosité totale (μm).
R_z :	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
r_ϵ :	Rayon de bec de l'outil (mm).
VB :	Usure en dépouille (mm).
V_c :	Vitesse de coupe (m/min).
α :	Angle de dépouille principal (degré).
γ :	Angle d'attaque (degré).
λ :	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).
η :	Rendement de la machine.
θ :	Température maximale dans la zone de coupe (degré Celsius).
χ :	Angle de direction principal (degré).

Introduction générale

Actuellement, les améliorations des matériaux de coupe permettent aux industriels de gagner du temps et de diminuer les coûts de fabrication tout en prenant en compte les contraintes liées à l'environnement. C'est dans ce contexte que rentre notre travail qui consiste à évaluer les performances des matériaux de coupe suivants : les carbures, les céramiques (mixte et renforcée) et les cermets, en tournage dur à sec de l'acier X38CrMoV5-1 [AISI H11] traité à 50HRC. Cet acier est destiné pour le travail à chaud, exempt de tungstène sur base CrMoV, insensible aux changements de température et ayant une résistance à l'usure élevée. Il est employé pour la fabrication des matrices, des coquilles, des moules et inserts de coulée sous pression fortement sollicités avec durée de vie élevée.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux. Dans ce chapitre, nous avons évoqué les caractéristiques des matériaux de coupe susceptibles d'être utilisés en usinage dur. La notion du tournage dur, les travaux de recherche sur l'usinage des aciers durcis et les phénomènes physiques dans le processus de coupe ont été définis.

Le second chapitre présente les équipements indispensables aux essais et les conditions expérimentales retenues.

Le troisième traite les performances des outils en termes d'usure en dépouille, d'efforts de coupe et de rugosité des surfaces usinées et leurs évolutions en fonction des éléments du régime de coupe (temps d'usinage, avance par tour, vitesse de coupe et profondeur de passe).

Une étude approfondie sur le comportement à la coupe de la céramique mixte ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$) est faite au quatrième chapitre.

Le cinquième définit les modèles mathématiques liés aux résultats expérimentaux, ainsi les valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ont été calculées à l'aide du logiciel Minitab 13.

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

Chapitre I

Etude bibliographique sur la coupe des métaux

I.1 Introduction

I.2 Matériaux de coupe

I.2.1 Les carbures

I.2.2 Les céramiques

I.2.3 Les cermets

I.2.4 Le nitrure de bore cubique

I.3 Tournage dur

I.4 Travaux de recherche sur l'usinage des aciers durcis

I.5 Phénomènes physiques dans le processus de coupe

I.5.1 Variables d'entrée

I.5.2 Paramètres de sortie

I.6 Conclusion

I.1 Introduction

Depuis toujours, c'est la performance des matériaux de coupe qui a permis aux procédés d'usinage d'être évolués. La concurrence perpétuelle entre fabricants d'outils de coupe, métallurgistes et constructeurs de machines-outils en est aussi la cause du développement du processus d'usinage. Ainsi, en utilisant des matériaux de coupe plus performants ayant une dureté, une résistance mécanique, une résistance à l'abrasion et à la température, une conductivité thermique et une densité élevées, avec des géométries appropriées de la partie active de l'outil, des avances, des vitesses de coupe et des profondeurs de passe élevées, on augmente le taux d'enlèvement de la matière et par conséquent on obtient des gains de productivité très importants.

I.2 Matériaux de coupe

Les principaux matériaux de coupe utilisés en tournage des pièces dures sont : les carbures, les céramiques, les cermets et le nitrure de bore cubique.

I.2.1 Les carbures

Les outils frittés en carbure de tungstène (WC) et en carbure de titane (TiC) contiennent entre (70 et 90) % de substances dures, (10 à 30) % de substances liantes. Les substances dures qui représentent la phase γ sont constituées de carbures de tungstène, titane tantale ou niobium. Les substances liantes qui représentent la phase β sont généralement constituées de cobalt. La norme ISO donne trois nuances de carbures obtenues en faisant varier les contenus et les pourcentages de phase γ et de la phase β . Ces trois nuances sont désignées par les lettres P, M, K. La nuance P, destinée à l'usinage des aciers coulés et des fontes malléables à copeaux longs, la nuance M, pour l'usinage des aciers au manganèse, les aciers austénitiques, les aciers de décolletage ainsi que les fontes alliées et malléables à copeaux courts, et la nuance K, retenue pour l'usinage des aciers trempés, des métaux non ferreux, des matières plastiques, du bois et des matériaux composites. L'outil d'ébauche requiert une ténacité importante car il doit résister aux chocs alors que la finition nécessite un outil ayant une résistance à l'usure élevée pour le calibrage de la cote fabriquée et la qualité de l'état de surface. L'usinage des pièces dures impose la nuance K car l'outil doit être

à la fois tenace et résistant à l'usure. Actuellement, des carbures « micro grains » plus performants que les carbures classiques sont disponibles. Ces carbures « micro grains » sont caractérisés par une structure granulométrique très fine du carbure de tungstène (0.2 à 1) μm , liée à du cobalt (8 à 20) %. Ils ont une ténacité plus élevée pour une dureté constante. Leur granulométrie procure un rayon d'acuité d'arête très petit ainsi que des angles de coupe très positifs. De plus, le coût des plaquettes en carbure de tungstène « micro grain » est comparable à celui des plaquettes en carbure « classique ».

Il existe également des carbures revêtus qui ont été mis au point dans le but d'associer une résistance à l'usure élevée à la surface des plaquettes et une forte ténacité du substrat.

Les principaux procédés de revêtement sont :

CVD : Dépôt Chimique en phase Vapeur (Chemical Vapor Deposition). C'est un procédé de revêtement par réaction chimique à température élevée de 900 à 1100°C sous une atmosphère inerte, réductrice ou recarburante. Un gaz transporteur amène une vapeur réactive appropriée dans un réacteur où se trouvent les pièces. L'épaisseur de 2 à 14 μm dépend du matériau de revêtement, de la pression, du temps et de la température.

PVD : Dépôt physique en phase Vapeur (Physical Vapor Deposition). On vaporise, sous vide, le matériau de revêtement entre 150 et 500°C en utilisant un courant à haute tension. La vapeur produite se condense en un film de 2 à 5 μm sur les surfaces à revêtir (substrat).

Les matériaux déposés en revêtement sont très nombreux. Les plus courants sont : le titane (Ti), le nitrure de titane (TiN), le carbure de titane (TiC) et l'alumine (Al_2O_3) que l'on retrouve en monocouche ou combinés (Ti/TiN, TiC, Al_2O_3 /TiN).

On peut retenir globalement que :

- le nitrure de titane (TiN) est réputé mieux résister à l'abrasion. Pour cette raison, il est souvent utilisé en couche externe. De plus il tolère des dépôts plus épais sans nuire à sa tenue en service. Le TiN est inerte vis-à-vis des aciers et le coefficient de

frottement du métal sur le revêtement TiN est plus faible, ce que minimise le risque de formation d'arête rapportée ;

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

- l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) est déposé en couche intermédiaire comme barrière de diffusion à la chaleur. Il conserve sa dureté à hautes températures, offrant une excellente résistance à l'usure, ainsi qu'une excellente protection contre la diffusion et l'oxydation à des vitesses et des températures de coupe très élevées. Un inconvénient majeur dans le cas des revêtements multicouches des plaquettes de finition est la perte de l'acuité d'arête. Pour cette raison, les métallurgistes ont mis au point des revêtements en couches minces de 1 à $2\mu\text{m}$.

Les gains obtenus dans la coupe des métaux à l'aide de ces revêtements sont importants. Ces gains dépendent essentiellement du couple outil/matière. Cependant, pour caractériser l'influence du revêtement, nous précisons dès maintenant que trois modes de détérioration peuvent intervenir :

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

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

- fissuration et écaillage : la détérioration s'effectue par fissuration du revêtement soumis à de fortes contraintes d'origine thermique entraînant des micro écaillages (sur l'arête ou sur les flancs) puis une usure contrôlée par diffusion et abrasion.

Ainsi, une couche extérieure de TiN semble aujourd'hui conduire aux meilleurs résultats lors du tournage des aciers inoxydables. L'usure par effets physicochimiques est très réduite [1].

En conclusion, on peut dire que les carbures revêtus couvrent un très vaste domaine d'usinage. On estime que 70% des opérations d'usinage sont effectuées par des plaquettes en carbure (figure I.1). Une large gamme de compositions est offerte et

chaque nuance est conçue en fonction des besoins requis pour toute application particulière.



Fig. I.1 Plaquettes en carbure

I.2.2 Les céramiques

Le terme de céramique désigne aujourd'hui de façon paradoxale des matériaux dont les applications peuvent être à la fois très traditionnelles et souvent utilitaires : briques, vaisselle, etc., mais aussi très spécialisées et parfois même hyper sophistiquées : électronique, optique, nucléaire, astronautique, matériaux de coupe [2].

Les avantages des céramiques sont leur faible masse volumique et leur température d'utilisation nettement plus élevée que celle des alliages courants. Cependant, leur ténacité, c'est-à-dire leur aptitude à résister aux microfissures en fait leur principale faiblesse.

Les premiers brevets et publications sur les matériaux de coupe céramiques à base d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) datent du début du XX^e siècle en Allemagne. Des recherches systématiques commencèrent dans les années 1930. Mais ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale que furent intensifiés la recherche et le développement. Des résultats, permettant l'exploitation de la céramique, ont été mis au point en particulier aux Etats-Unis, en URSS et en Allemagne. L'application pratique de la céramique de coupe fut présentée pour la première fois lors des expositions de la machine-outil de Chicago en 1956 et de Hanovre en 1957. Les premiers métaux de coupe étaient surtout des céramiques très pures, à base d'alumine. Cette matière présente des valeurs mécaniques de très hautes résistances. C'est l'oxyde le plus stable,

possédant une excellente stabilité chimique jusqu'aux températures avoisinant son point de fusion (2050°C).

Cette céramique oxydée rendait possible l'usinage des fontes et des aciers à des vitesses qui, pour la première fois, excédaient la limite des 1000m/min. Le terme d'«usinage à grande vitesse» était né. La performance de la céramique de coupe était alors très supérieure aux possibilités des machines-outils existantes. Il était donc devenu nécessaire de perfectionner les machines-outils tant sur leur stabilité que sur leur puissance, leur vitesse et leur contrôle. Dès le début des années 1960, une importante réorientation commença et eut pour effet une évolution réciproque sur les outils et les machines.

Au début du XX^e siècle, nul n'aurait pensé qu'un matériau de coupe céramique jouerait un rôle aussi important dans le domaine de l'usinage.

Ces produits céramiques offrent de nombreuses possibilités d'applications en raison de leurs propriétés remarquables (non métallique, inorganique, réfractaire), et leur champ d'application s'agrandit de jour en jour, malgré l'image particulière de fragilité, de rupture, etc.

Les céramiques ont été introduites en premier lieu pour l'usinage grande vitesse des fontes et pour les applications nécessitant des taux d'enlèvement de matière importants. Les outils céramiques sont hautement réfractaires, plus résistants à l'usure et plus stables chimiquement que les carbures cémentés. Grâce à leur exceptionnelle stabilité à haute température, les céramiques conviennent bien pour l'usinage grande vitesse et l'usinage des alliages ferreux très durs jusqu'à 790HV (63HRC).

Leurs principales limitations sont de faibles résistances aux chocs mécanique et thermique.

En raison de leur forte affinité chimique, les céramiques ne conviennent pas pour l'usinage des alliages d'aluminium, de titane et autres alliages de métaux réagissant avec l'alumine.

Plusieurs céramiques ont été développées et ne cessent encore de s'améliorer pour concurrencer les outils CBN sur certaines applications.

Les céramiques utilisées dans le cas de l'usinage de matériaux à haute dureté sont principalement :

- les céramiques mixtes (de couleur noire) ;
- les céramiques renforcées dénommées « Whiskers » (de couleur verte). La figure I.2 montre ces deux nuances.



Fig. I.2 Plaquettes en céramique (mixte+renforcée)

Les céramiques mixtes (de couleur noire) sont connues sous le nom de carboxydes. L'alumine (Al_2O_3) est alliée à d'autres carbures métalliques comme le TiC. Elles sont utilisées pour la coupe depuis 1970. Mais on trouve également des combinaisons de Al_2O_3 avec du nitrure de titane (TiN) ou TiC/N (carbonitrure). Les matériaux de coupe pressés à chaud se distinguent par une haute densité, une excellente stabilité des arêtes de coupe et une résistance à la rupture avec une bonne conductivité thermique. Leur principale application est le tournage des fontes blanches. Ils sont cependant utilisés avec succès pour certaines opérations de finitions en tournage, ainsi qu'en fraisage fin qui se substitue à l'opération de rectification [3].

Les céramiques renforcées dénommées « Whiskers » (de couleur verte) sont des matériaux de coupe à base de l'oxyde d'aluminium renforcés au moyen d'une dispersion des fibres en carbures de silicium (Al_2O_3+SiC). Ce renforcement semble représenter l'une des solutions les plus prometteuse permettant d'augmenter considérablement la ténacité du matériau final. Les Whiskers sont des fibres monocristallines. Les Whiskers de SiC utilisés pour renforcer les outils de coupe en

alumine ont un diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$ et une longueur comprise entre 5 et $20\mu\text{m}$. Les composites en carbure de silicium comportent généralement 25 à 35% en poids de Whiskers. Cette adjonction se traduit par un doublement de la résistance à la rupture et par une augmentation de la résistance aux chocs thermiques qui rend donc possible l'utilisation d'un liquide de coupe en cours d'usinage [4].

I.2.3 Les cermets

Les cermets (céramique métal), constitués principalement de TiC ou de TiC/N, possèdent par rapport aux métaux durs conventionnels une densité beaucoup plus faible mais une dureté et une résistance à l'usure plus élevées. Les forts coefficients de dilatation thermique des cermets (7 à $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{K}$) dus au TiC et TiN par rapport aux outils carbures (WC) sont co-responsables de la faible résistance des cermets aux chocs thermiques. C'est également ce qui explique leurs faiblesses lors de l'usinage à coupe interrompue. Le remplacement du TiC par le TiN qui possède la plus grande conductivité thermique, a permis d'améliorer la résistance des cermets aux chocs thermiques.

Les cermets (figure I.3) sont utilisés pour la finition et l'usinage de précision demandant de grandes vitesses de coupe et des avances faibles. Ils se rapprochent ainsi du domaine d'utilisation des céramiques en étant toutefois résistants. Leur emploi diminue ou supprime le collage des copeaux, évitant ainsi les arrachements sur les matériaux malléables (inox, aciers doux) et conduit à une durée de vie accrue. La plage des vitesses de coupe est étendue dans le tournage des aciers inoxydables (100 à 200) m/min. Les avances sont celles de passes de finition (0.02 à 0.15) mm/tr. Les profondeurs de passe ne doivent pas excéder 1mm.

En conclusion, on peut retenir les avantages pour lesquels les cermets sont utilisés :

- leurs résistances à la cratérisation et à la formation de l'arête rapportée sont supérieures à celles des carbures de tungstène et des céramiques ;
- leurs résistances à l'usure sont trois à quatre fois plus grandes que celles des carbures non revêtus ;
- ils admettent de faibles avances ;
- leurs vitesses de coupe sont proches de celles des céramiques mais également

utilisables aux vitesses supérieures des carbures de tungstène non revêtus ;
- ils recouvrent la plage des carbures revêtus.

Il faut noter que les applications des cermets en usinage, sont actuellement très limitées en Europe par rapport à leurs utilisations au Japon. Cela est dû au fait qu'en Europe les gains de productivité sont surtout recherchés dans les moindres usures d'outils pour des valeurs d'avance élevées. Cet objectif est réalisé avec des carbures revêtus.

Inversement, au Japon, l'usinage direct en finition à partir de pièces brutes très proches des cotes finales (technologie near net shape) à des vitesses de coupe élevées, mais avec des profondeurs de passe et des avances modérées, est très développé et constitue le domaine de prédilection des cermets [1].



Fig. I.3 Plaquettes en cermet

I.2.4 Le nitrure de bore cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique est un matériau de synthèse dont les propriétés sont voisines de celles du graphite. Sous l'effet de températures très élevées (supérieures à 1500°C) et de pressions importantes comprises (entre 50 et 100) bars, le nitrure de bore cubique subit une transformation structurale (passage d'une structure hexagonale à une structure cubique), qui lui confère une grande dureté.

Le nitrure de bore cubique est le second des matériaux les plus durs connus, juste après le diamant, il est donc plus résistant à l'usure que les céramiques ou les carbures métalliques.

Le CBN ne réagit pas avec les alliages ferreux et il est thermiquement stable jusqu'à 1400°C. Le CBN peut donc usiner des alliages par contre le diamant ne peut pas, tels que les aciers à outil, les fontes trempées, les superalliages à base de nickel ou de cobalt.

I.3 Tournage dur (TD)

Le tournage dur, c'est-à-dire le tournage des métaux durs, se définit comme une opération de tournage sur des aciers traités et durcis thermiquement, d'une dureté de 45HRC à 68HRC.

Le tournage dur est un procédé récent dans son utilisation. Il se présente comme une alternative à la rectification conventionnelle, souvent longue et coûteuse lors de l'usinage de pièces de précision. Il vise soit à la remplacer, soit à la compléter. On espère qu'ainsi le tournage dur éliminera ce qui est un des goulots d'étranglement des ateliers. Ce procédé remet en cause la méthodologie appliquée à une gamme de fabrication.

Le principal avantage démontré et/ou attendu du tournage dur réside dans le fait qu'il est possible de réaliser sur la même machine et donc avec une seule prise de pièce, des usinages dont la tolérance dimensionnelle atteint 0.01mm. De ce fait, tout en améliorant la qualité de la géométrie, et en éliminant les imprécisions engendrées par les montages / démontages des pièces, il est possible de réaliser des gains de productivité importants.

D'autre part, du point de vue énergétique, le tournage dur présente un meilleur rendement : il engendre cinq fois moins d'énergie qu'en rectification, donc moins de calories. De plus en Tournage Dur, les calories sont évacuées par les copeaux. L'outil est la pièce ne chauffent pratiquement pas.

En résumé, le tournage des métaux durs est prometteur. Il intéresse de nombreux industriels pour les gains de productivité qu'il doit permettre de réaliser. Avec les méthodes d'usinage traditionnelles, les pièces étaient d'abord usinées puis traitées thermiquement pour atteindre les duretés souhaitées, et enfin rectifiées pour respecter les spécifications notifiées par les plans. Ceci impliquait des montages et des

démontages de pièces qui deviennent inutiles avec le tournage dur. Avec des outils capables d'usiner directement des aciers traités, toutes les phases peuvent être réalisées sur le même centre d'usinage, sans démontage et avec un nombre de changement d'outil minimal. Des gains substantiels de productivité peuvent être obtenus par la suppression de la phase de rectification [1].

Les matériaux durs sont caractérisés par un pouvoir abrasif élevé, une grande dureté, une faible ductilité et un rapport entre la dureté et le module d'élasticité élevé. Lors de l'usinage de ces matériaux, il faut s'assurer que les valeurs pratiques des profondeurs de passes et des avances sont faibles de façon à limiter les efforts de coupe et les déformations [2] et [5].

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

L'objectif du tournage dur (TD) est que les pièces en acier de dureté élevée soient finies en tournage et sans rectification. Le tournage dur permet d'obtenir de bons états de surfaces. Les premières appréciations montrent que la rugosité peut descendre jusqu'à des Ra de $0.15\mu\text{m}$, approchant les valeurs obtenues en rectification (inférieures à $0.15\mu\text{m}$). Les tolérances dimensionnelles peuvent atteindre des qualités 6 avec des tolérances géométriques très précises. Des défauts de circularité inférieure à $1\mu\text{m}$ peuvent être observés [6].

La prise de conscience industrielle à propos de la technique du tournage dur n'a été vraiment effective qu'à partir du début des années 1990.

A présent, tout industriel a compris que fabriquer écologique devenait une nécessité, voire une action civique vis-à-vis des générations futures. Avec la réglementation environnementale en vigueur, les industries sont contraintes de traiter ou recycler leurs

déchets, sous peine de fortes pénalités. Effectivement il est préférable de produire des déchets recyclables tels que des copeaux plutôt que des boues de rectification chargées d'hydrocarbures [5].

I.4 Travaux de recherche sur l'usinage des aciers durcis

L'acier utilisé est de nuance X38CrMoV5-1 [AISI H11]. Cet acier est fortement allié destiné pour le travail à chaud. Il se classe dans les aciers résistants aux chocs thermiques du fait de la présence du chrome, du molybdène et du vanadium.

Le chrome augmente la trempabilité de l'acier, diminue le grossissement du grain lors de l'austénitisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température. Il forme également des carbures qui contribuent à la résistance à l'abrasion.

Le molybdène confère à l'acier une très bonne résistance à l'usure à chaud via la présence de carbures très durs de 1500 (M6C) à 2000HV (M2C), et ralentit l'adoucissement.

Le vanadium permet de générer des carbures de très haute dureté (MC 3000HV). De petites additions supérieures à (0.2% en masse) sont très efficaces pour éviter le grossissement du grain lors du traitement thermique. Dans les aciers à outils, il est très utilisé avec le chrome, le molybdène et le tungstène. Sa mauvaise résistance à l'oxydation au-delà de 600°C est compensée par la présence de chrome. Par ailleurs, la teneur en carbone de l'acier est étroitement liée à la teneur en vanadium.

Cette dernière se trouve limitée par des problèmes de trempabilité, de forgeabilité après trempe et revenu.

Le silicium, avec une teneur voisine de 1% en masse, est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration entraîne une augmentation de la limite élastique, de la résistance à l'oxydation au-delà de 1000°C et de la trempabilité par effet de synergie avec d'autres éléments d'alliage comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer la stabilité des carbures M2C, ce qui diminue la fragilité du métal. Cet aspect est particulièrement important dans le cadre du forgeage à chaud. Cet acier doit posséder, malgré sa structure martensitique revenue, une bonne trempabilité et il

se caractérise par une dureté à température ambiante relativement élevée, comprise entre 40 et 56HRC, et par une bonne dureté à chaud. Sa propriété essentielle est d'avoir un bon niveau de résistance à l'adoucissement qui lui permet d'être utilisé à une température de travail d'environ 600-650°C [7]. Outre les caractéristiques citées, cet acier montre une excellente résistance à la fatigue thermique, sa ténacité et son aptitude au polissage, lui permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants : matriçage à chaud, moules à coulée sous pression, filage à chaud, lames de cisaille à chaud et matrice de module de porte pour automobile.

Dans le cas de l'usinage (tournage) de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 54HRC, l'effet de la vitesse de coupe est prépondérant par rapport à l'avance. Ce qui signifie qu'il sera préférable de réduire la vitesse de coupe et augmenter l'avance pour améliorer la tenue de la plaquette utilisée sans pour autant modifier le taux d'enlèvement de la matière [5] et [8].

L'objectif des essais effectués par [9] sur cet acier traité à 47HRC est de déterminer une loi de coupe utilisable avec n'importe quelle fraise de la même famille que les outils testés (même matériau, même préparation d'arête...) même si par exemple, l'angle d'hélice varie le long de l'arête. Le but de ces essais est de se placer dans des conditions d'exploitation plus simples que pour les essais de fraisage, afin d'étudier séparément les influences des angles de coupe et d'hélice puis de les intégrer dans la loi de coupe. Ces essais préliminaires ont été réalisés selon la configuration de tournage avec des fraises à angle d'hélice nul comme outils, compte tenu de la simplicité des solutions de montage des deux types d'expérimentation. Cette solution consiste à fixer la fraise (qui prend le rôle d'un outil de tournage fixe) sur une platine de mesure d'efforts dynamométrique et à entraîner la pièce en rotation.

L'usinage a été effectué par des fraises cylindriques spéciales à denture droite, à deux dents, en carbure monobloc (K10/30F) revêtues TiAlN, chacune possédant un angle de coupe différent, de diamètre 20mm afin de minimiser la flexion de l'outil, et ainsi de la négliger dans l'étude des efforts de coupe.

Deux configurations ont été mises en place pour étudier d'une part l'influence de l'angle de coupe et d'autre part celle de l'angle d'hélice sur les efforts mesurés. Les

essais ont été menés sur une fraiseuse 5axes GAMBIN 120 CR et sur un centre d'usinage DMG DMC 65V.

La figure I.4 présente l'évolution de la pression de coupe et la plage de fonctionnement ainsi déterminée.

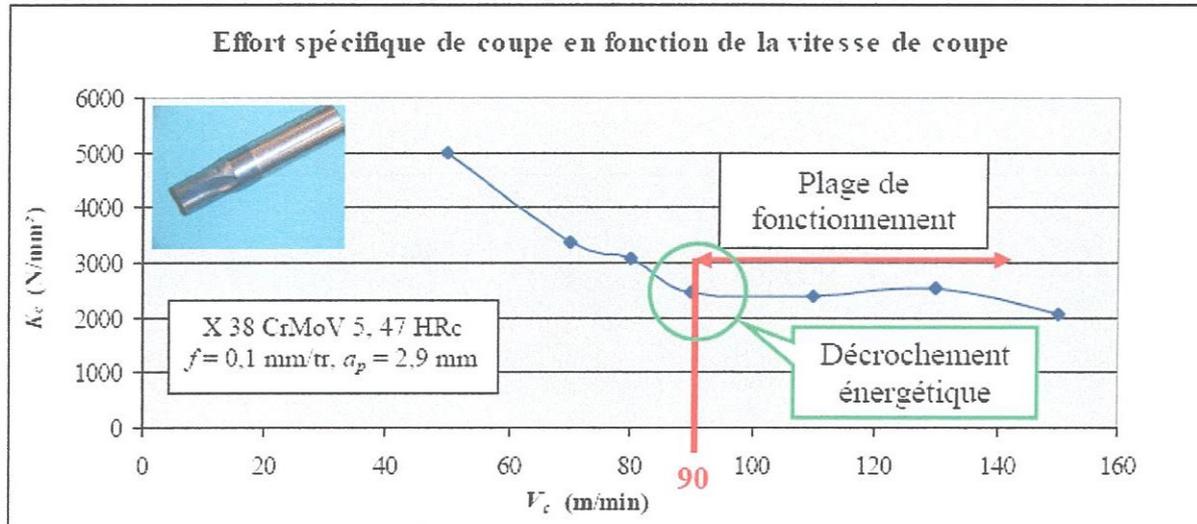


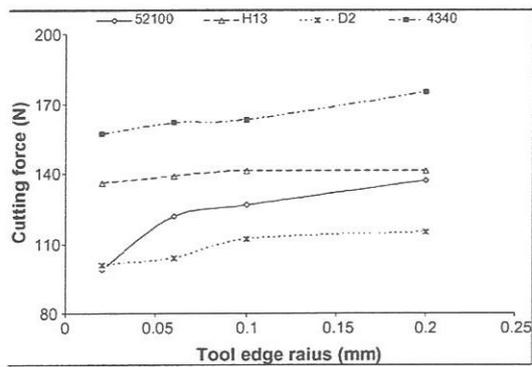
Fig. I.4 Evolution de la pression de coupe en fonction de la vitesse de coupe (d'après [9])

D'après le décrochement énergétique et la plage de fonctionnement visibles sur la figure I.4, la vitesse de coupe minimale pouvant être utilisée pour ce Couple Outil-Matière est 90m/min. Pour la série d'essais préliminaires, la vitesse de coupe choisie est de 110m/min, c'est-à-dire au-delà de cette vitesse de coupe minimale afin d'assurer une marge de sécurité par rapport à V_{cmin} , et dans la plage de fonctionnement donnée par la méthodologie du Couple Outil Matière, assurant ainsi une valeur de pression de coupe K_c minimale et stable d'environ 2500N/mm².

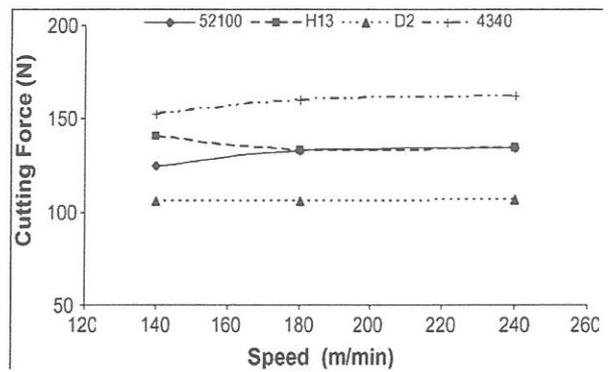
Le but des travaux de recherche effectués par [10] est d'analyser l'impact des variables d'entrée sur les efforts de coupe en usinage orthogonal des aciers durcis. L'usinage à grande vitesse (UGV) des matrices et des moules dans leur état durci est devenu une pratique normale dans l'industrie. Dans ce processus, les outils conventionnels s'usent rapidement en raison des températures élevées et de la forte adhérence entre l'outil et la pièce à usiner. Des simulations numériques (analyse par éléments finis) de l'usinage orthogonal à grande vitesse ont été effectuées pour étudier

l'effet des variables du régime de coupe suivants : la géométrie de la partie active de l'outil, la dureté de la pièce, l'avance et la vitesse de coupe sur les efforts de coupe en tournage dur de finition (figures I.5 (a)-(f)). Le nitrure de bore cubique (CBN) ou le polycristallin (PCBN) en plaquettes sont largement répandus en tant que matériaux d'outil de coupe dans un tel usinage à grande vitesse des aciers à outils durcis en raison de leur dureté élevée, de leur résistance à l'usure par abrasion et de leur stabilité chimique à hautes températures. Dans cet article, les résultats de l'analyse par éléments finis en termes d'efforts de coupe relatifs à l'usinage orthogonal à grande vitesse de l'acier durci à roulement AISI 52100 (45–58 HRC), de l'acier pour travail à chaud AISI H13, de l'acier pour travail à froid AISI D2 et de l'acier faiblement allié AISI 4340 par des plaquettes en CBN, sont présentés. Les efforts de coupe tangentiel et radial ont été déterminés dans les simulations numériques. Parmi les paramètres étudiés du régime de coupe c'est l'avance qui a l'effet le plus significatif sur les efforts de coupe tangentiel et radial. Dans les mêmes conditions d'usinage, l'effort de coupe tangentiel est le plus prépondérant en tournage de l'acier AISI 4340 tandis qu'en tournage de l'acier AISI 52100 l'effort radial est le plus important et en tournage de l'acier AISI D2 les efforts de coupe tangentiel et radial sont les plus faibles. L'effort radial semble être plus dominant que l'effort de coupe tangentiel en tournage dur. Les efforts de coupe tangentiel et radial augmentent avec l'augmentation de l'avance, du rayon de bec de l'outil, de l'angle d'attaque négatif et de la dureté de la pièce. En outre, les effets de la vitesse de coupe, de l'avance, de la géométrie de la partie active de l'outil et de la dureté des éprouvettes sur les efforts de coupe sont rapportés. Ces résultats de l'analyse par éléments finis sont comparés aux résultats expérimentaux. Des simulations numériques en tournage dur des aciers durcis AISI 52100, AISI H13, AISI D2 et AISI 4340 par analyse des éléments finis, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

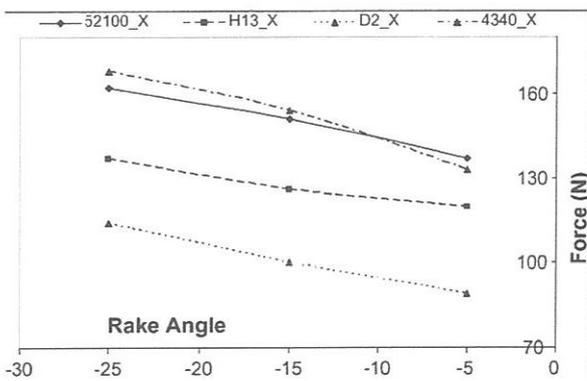
- les efforts de coupe prédits sont bien conformes aux données expérimentales mesurées et disponibles dans la littérature avec une précision raisonnable ;
- les tendances d'augmentation des efforts de coupe avec l'augmentation de l'avance, du rayon de bec de l'outil, des angles d'attaque négatifs et de la dureté des éprouvettes



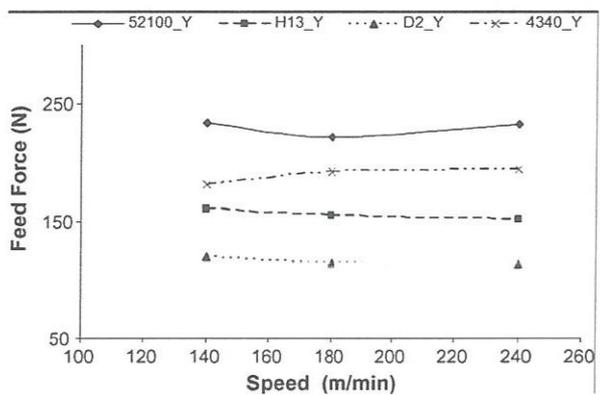
(a) Effet de rayon du bec de l'outil et de la nuance de l'outil sur l'effort de coupe tangential



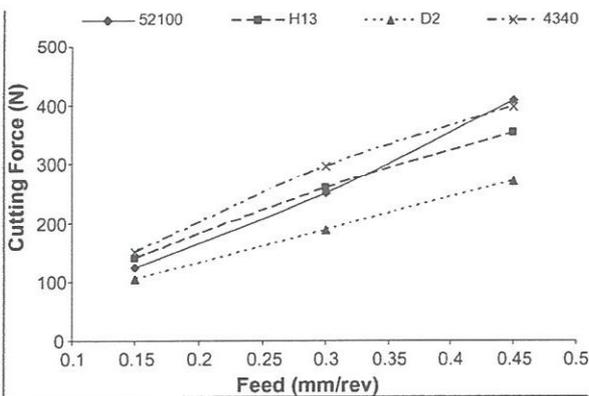
(b) Effet de la vitesse de coupe et de la nuance de la pièce sur l'effort de coupe tangential



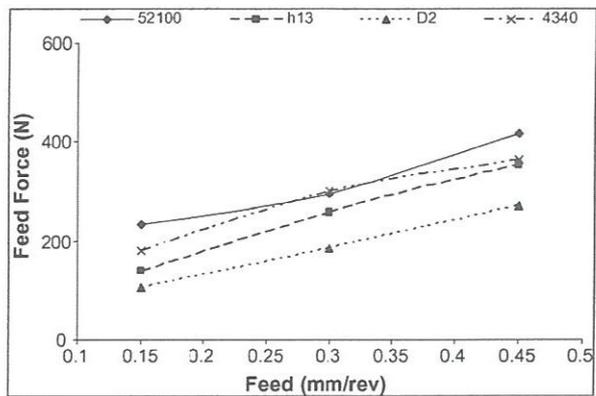
(c) Effet de l'angle d'attaque et de la nuance de l'outil sur l'effort de coupe tangential



(d) Effet de la vitesse de coupe et de la nuance de la pièce sur l'effort radial



(e) Effet de l'avance et du matériau sur l'effort de coupe tangential



(f) Effet de l'avance et du matériau sur l'effort radial

Fig. I.5 Evolution des efforts de coupe en usinage orthogonal des aciers durcis (d'après [10])

sont similaires aux résultats expérimentaux et numériques rapportés par d'autres chercheurs. [11] a évalué les efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier GB699-88 55 durci (45-55HRC) à l'aide des outils CBN (figures I.6 (a)-(d)). Il a conclu que l'effort de coupe radial était le plus grand parmi les trois composantes de l'effort de coupe et était le plus sensible aux changements du chanfrein, du rayon de bec de l'outil et de l'usure en dépouille. Si la profondeur de passe est bien plus petite que le rayon du bec de l'outil, alors ce dernier deviendra le principal paramètre géométrique.

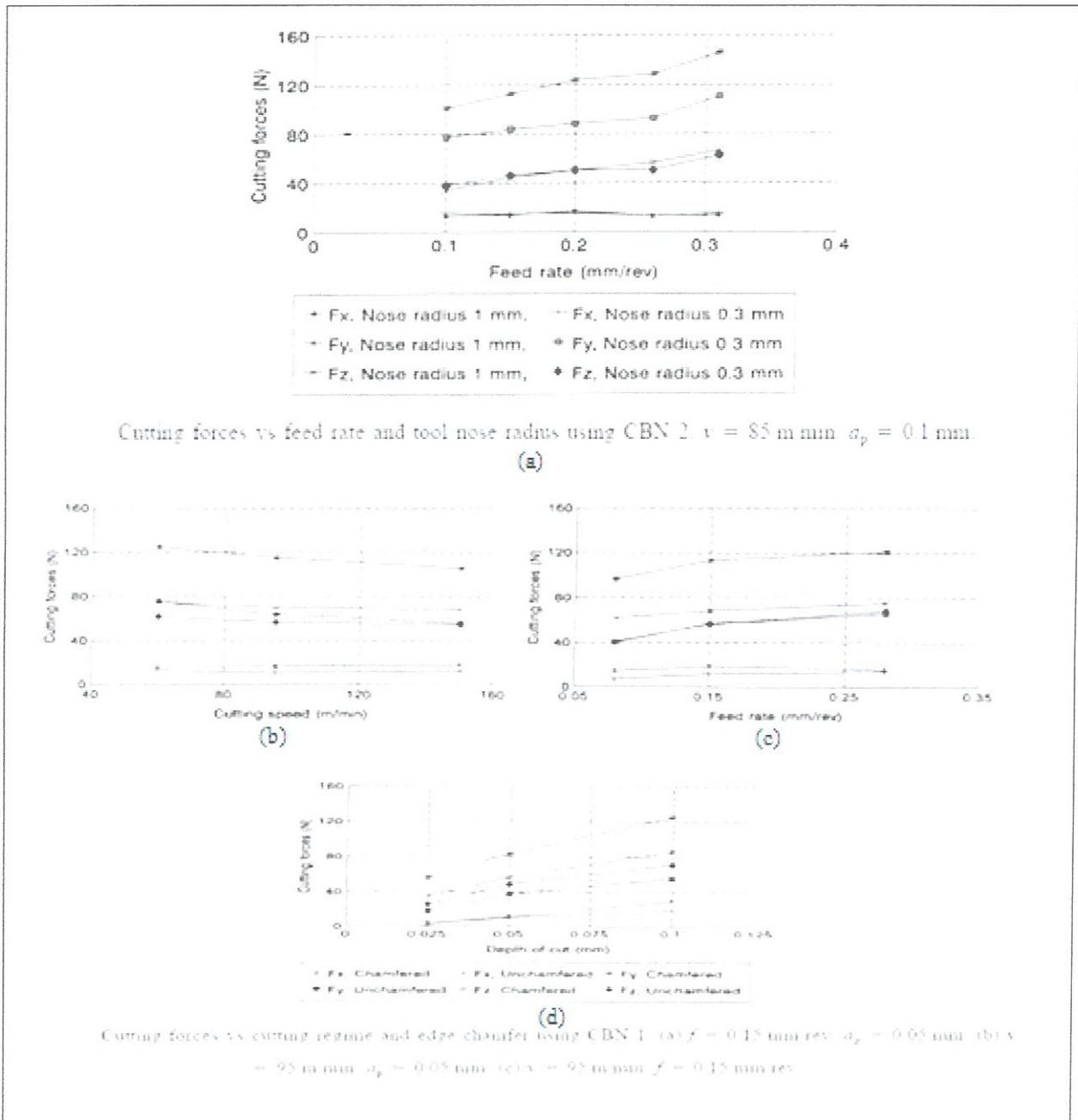


Fig. I.6 Impact des paramètres de coupe sur les efforts de coupe (d'après [11])

I.5 Phénomènes physiques dans le processus de coupe

Le processus de coupe est accompagné de plusieurs phénomènes.

La figure I.7 présente le schéma structural du processus de coupe.

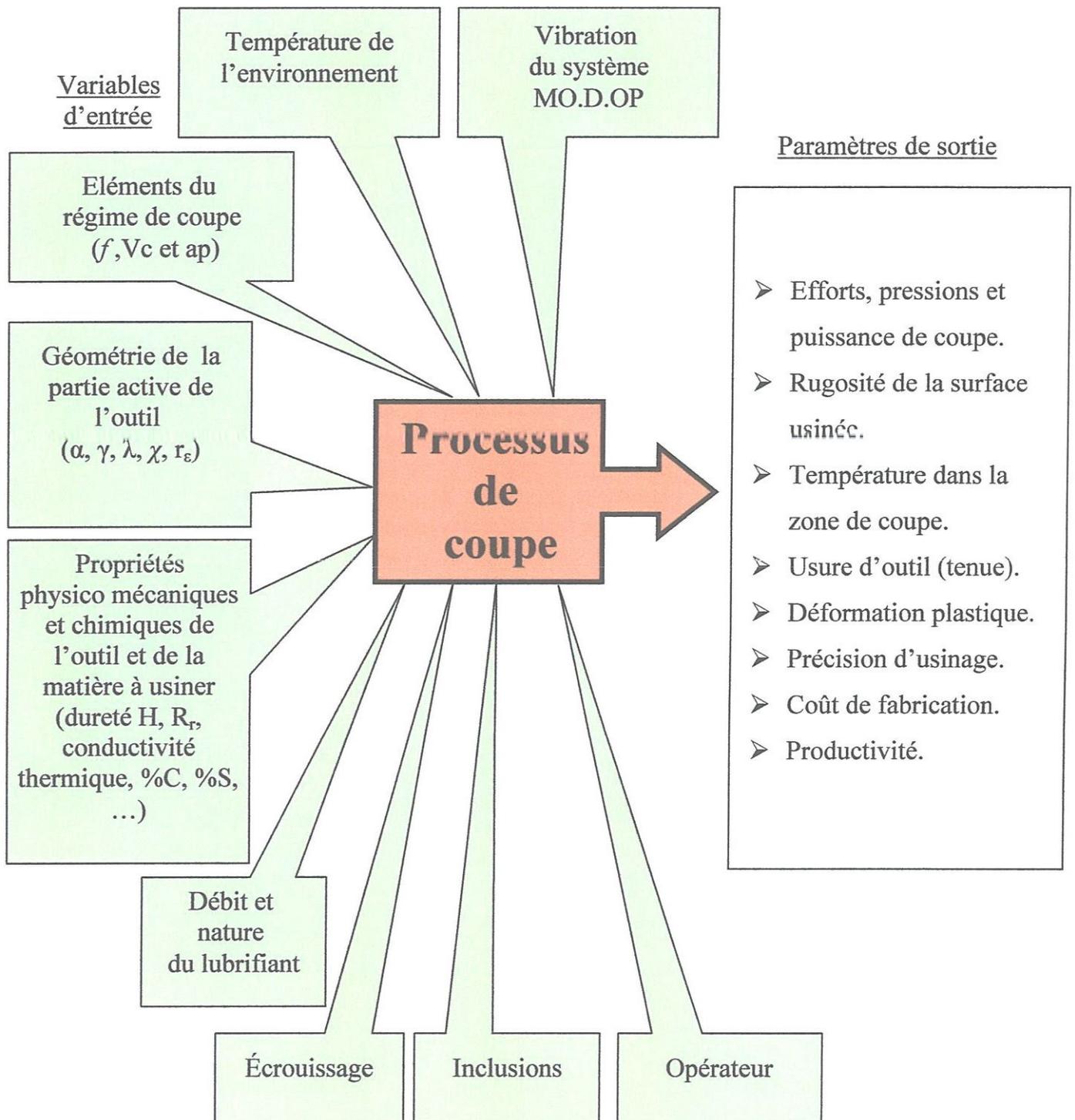


Fig. I.7 Schéma structural du processus de coupe

On distingue d'une part, les variables d'entrée et d'autre part les paramètres de sortie. Les variables d'entrée regroupent essentiellement les éléments du régime de coupe (f , V_c et a_p), les propriétés physico mécaniques et chimiques de la pièce et de l'outil (leurs résistances à la rupture, leurs duretés, leurs résistances à chaud, leurs compositions chimiques...), la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ , r_ϵ , chanfrein, brise copeau...), la rigidité de la machine outil...

Ces variables ont une influence considérable sur le processus de coupe.

Les paramètres de sortie (ou paramètres technologiques) sont principalement les efforts, les pressions et la puissance de coupe, la rugosité des surfaces usinées, la température dans la zone de coupe, l'usure et la durée de vie de l'outil, la productivité...

L'analyse des relations entre ces deux groupes de paramètres nous permet d'optimiser le processus de coupe [12].

I.5.1 Variables d'entrée

Les principales variables d'entrée que nous allons définir sont : l'avance par tour (f), la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de passe (a_p), l'angle de dépouille (α), l'angle d'attaque (γ), l'angle de direction principal (χ) et le rayon de bec de l'outil (r_ϵ).

I.5.1.1 Avance par tour

L'avance (f) représente le déplacement de l'outil en fonction de la fréquence de rotation de la pièce (nombre de tours effectués par la pièce) pendant la formation du copeau. En pratique, la vitesse d'avance est la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport au bâti de la machine-outil selon les deux axes longitudinal et transversal et en fonction de la fréquence de rotation de la pièce.

I.5.1.2 Vitesse de coupe

Le choix de la vitesse de coupe (V_c) dépend essentiellement de la nature de l'opération effectuée et du couple outil matière. Généralement, elle est réglée par la fréquence de rotation de la pièce (nombre de tours effectués par la pièce) et du diamètre de cette dernière.

I.5.1.3 Profondeur de passe

La profondeur de passe (a_p) désigne la différence des rayons de la pièce avant et après usinage (profondeur de la matière à enlever).

I.5.1.4 Angle de dépouille

L'angle de dépouille (α) intervient dans le frottement entre la pièce et la surface de dépouille de l'outil. C'est pour cette raison qu'il est toujours positif. Sa valeur est de 6° .

I.5.1.5 Angle d'attaque

Lorsque l'angle d'attaque (γ) est négatif, l'effort tangentiel de coupe est important et l'angle de coupe (δ) devient grand. Ce qui assure à l'outil une résistance. Au fur et à mesure que γ augmente, l'effort de coupe diminue. La croissance de cet angle est limitée par la résistance à la rupture de l'arête de coupe. L'angle d'attaque (γ) joue un rôle déterminant dans la formation du copeau. Selon le matériau à usiner, il passe d'une valeur positive à une valeur négative. Dans l'usinage des aciers durcis, et pour rendre l'outil plus résistant mécaniquement, cet angle doit être négatif.

I.5.1.6 Angle de direction principal

La valeur de l'angle de direction principal (χ) varie de 0 à 90° . Plus cet angle est faible, plus la tenue de l'outil (résistance à l'usure) est meilleure. Dans ce cas l'effort de coupe augmente mais on obtient un bon état de surface (travaux de finition). Si la quantité de métal à enlever est importante, on doit augmenter χ (travaux de dégrossissage). L'angle de direction principal (χ) a une influence sur la direction et l'intensité des efforts de coupe, sur la direction d'évacuation et la largeur du copeau, sur l'usure de l'outil et sur la température dans la zone de coupe.

I.5.1.7 Rayon de bec de l'outil

Le rayon de bec de l'outil (r_ϵ) est essentiel dans le choix de l'outil de coupe puisqu'il conditionne la rugosité de la surface usinée et détermine la résistance du bec de l'outil (plus le rayon de bec est grand, plus l'outil résiste aux efforts de coupe dans les limites admises par la géométrie).

I.5.2 Paramètres de sortie

Les principaux paramètres de sortie (ou paramètres technologiques) que nous allons analyser sont : les efforts, les pressions et la puissance de coupe, la rugosité de la surface usinée, la température dans la zone de coupe et l'usure de l'outil.

I.5.2.1 Efforts, pression et puissance de coupe

a) Efforts de coupe

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

Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec une certaine force « F » dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe (figure I.8). La résultante de coupe « F » est la somme de 3 composantes suivantes :

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

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

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \dots\dots\dots(1)$$

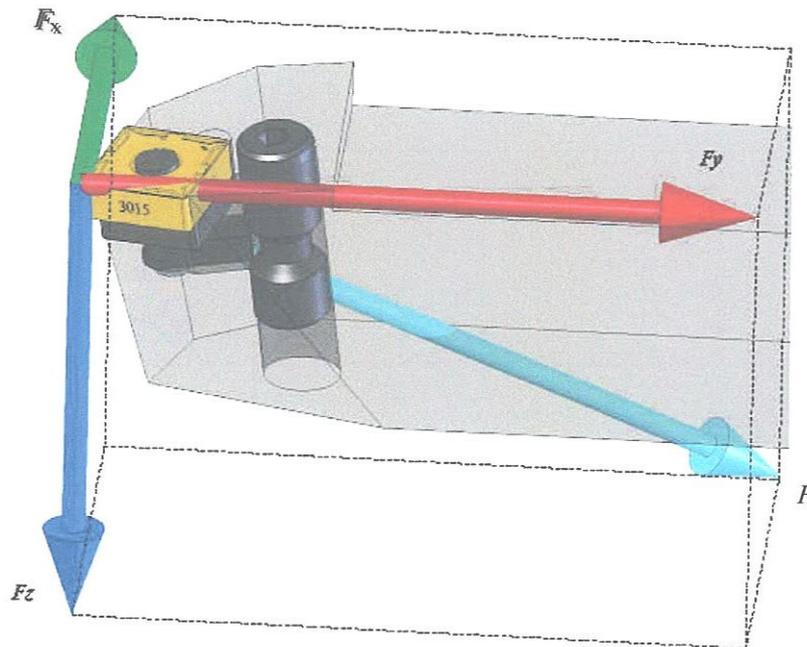


Fig.I.8 Composantes de l'effort de coupe

b) Pression de coupe

La pression de coupe, aussi appelée, effort spécifique de coupe, est également à déterminer. Cette grandeur est définie comme étant l'effort de coupe ramené à la section du copeau non déformé. Elle est donnée par la formule suivante :

$$K_i = F_i / (f \cdot ap) \dots \dots \dots (2)$$

Avec $i = (v, r, a)$;

K_i : pression (effort spécifique) de coupe (N/mm^2) ;

F_i : effort de coupe (N) ;

f : avance par tour (mm/tr) ;

ap : profondeur de passe (mm).

L'étude de cette pression (effort spécifique) de coupe microscopique sur la pointe de l'outil permettra de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant utilisé dans la matière retenue [13].

c) Puissance de coupe

Elle est donnée par la relation : $P_c = F_c \cdot V_c \dots \dots \dots (3)$

Où :

P_c : puissance de coupe (W) ;

F_c : force de coupe (N) ;

V_c : vitesse de coupe (m/s).

Mais dans le cas de calcul de la puissance, on utilise l'effort tangentiel (force de coupe), donc la puissance est égale :

$$P_c = K \cdot a_p \cdot V_c \cdot f \dots\dots\dots (4)$$

Avec :

K: pression (effort spécifique) de coupe (N/mm²) ;

a_p : profondeur de passe (mm) ;

f: avance par tour (mm/tr).

La puissance absorbée par la machine se déduit de la puissance de coupe en fonction du rendement η.

$$P_b = \frac{P_c}{\eta} \dots\dots\dots (5)$$

Avec :

P_b : puissance sur la broche (W) ;

η : rendement de la machine (≈ 0.8).

I.5.2.2 Rugosité de la surface usinée

La rugosité d'une surface usinée est représentée par l'ensemble des défauts microscopiques (aspérités) dont le pas de distribution est relativement petit. Ces irrégularités peuvent être relevées comme écart de profil effectif par rapport à la ligne de référence définie dans le domaine de prospection.

L'importance de la rugosité superficielle vient du fait qu'elle est en relation avec de nombreuses propriétés d'usage des pièces mécaniques entre autres, la résistance à l'usure, la capacité d'ajustement, l'étanchéité, la durée de rodage des pièces mécaniques, etc....

Les défauts de surfaces jouent un rôle important dans l'aptitude d'une pièce mécanique à remplir une fonction donnée.

Ces défauts sont de nature géométrique ou physico-chimique. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux défauts géométriques. Ces derniers sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (figure I.9) :

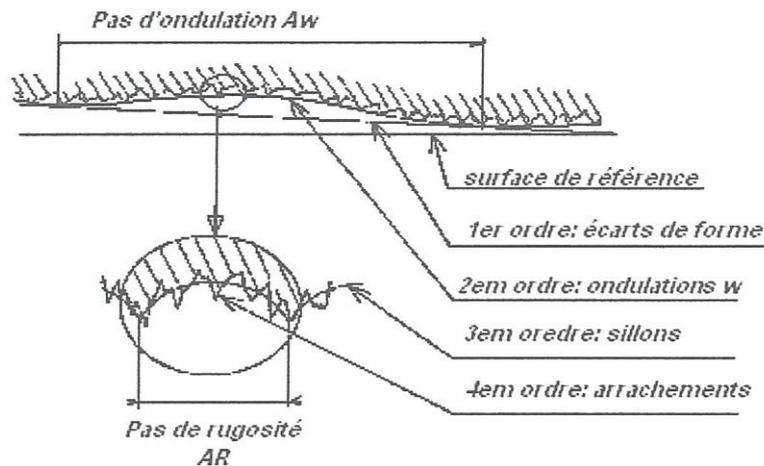


Fig.I.9 Principaux défauts de surface

1^{er} ordre : écarts de forme et de position

Il est supposé implicitement que l'écart de forme, d'orientation et de position est, dans tous les cas, inférieur à la tolérance indiquée sur le dessin de définition. La tolérance représente la plus grande erreur admissible sur l'élément considéré.

2^{ème} ordre : ondulations

L'ondulation possède en général un caractère périodique dû essentiellement à des vibrations de basses fréquences de la pièce et /ou l'outil générateur.

3^{ème} ordre : stries, sillons

Ce type de défaut a un caractère périodique ou pseudopériodique, il a son origine dans la reproduction de la forme du tranchant de l'outil sur la pièce.

4^{ème} ordre : arrachements

Ce type de défaut a un caractère apériodique, voire aléatoire lié aux phénomènes mécaniques (usinage par coupe ou abrasion) ou physico-chimiques (corrosion), responsables de l'enlèvement de matière.

Les irrégularités de 3^{ème} et 4^{ème} sont désignées par le terme général de « rugosité ».

Les facteurs d'influence en sont multiples:

- vibrations de hautes fréquences ;
- installation de lubrification (nature de lubrifiant, mode d'arrosage, filtrage) ;

- avance;
- usure de l'outil de coupe ;
- hétérogénéité du matériau.

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne (figures I.10 et I.11), soit :

a) Rugosité moyenne arithmétique (R_a)

Elle représente la valeur moyenne arithmétique de toutes les distances situées perpendiculairement à la médiane dans le segment mesuré (figure I.10).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y| dx \dots\dots\dots (6)$$

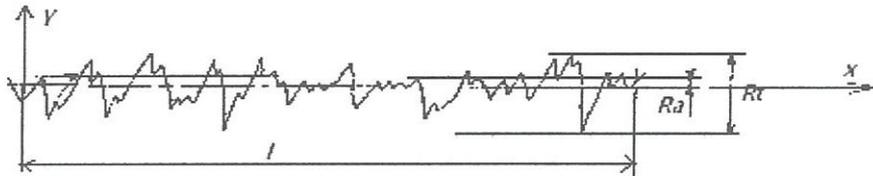


Fig. I.10 Critères de rugosité R_a et R_t

La rugosité R_a peut être exprimée par la formule :

$$R_a = 0.032 f^2 / r_\epsilon \dots\dots\dots (7)$$

Avec :

R_a : rugosité moyenne arithmétique ;

f : avance par tour (mm/tr) ;

r_ϵ : rayon de bec de l'outil (mm).

b) Rugosité totale R_t

Elle représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil (figure I.10).

c) Rugosité R_z (hauteur des irrégularités)

Ce critère de rugosité représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas (figure I.11).

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_1^5 Z_i \dots\dots\dots (8)$$

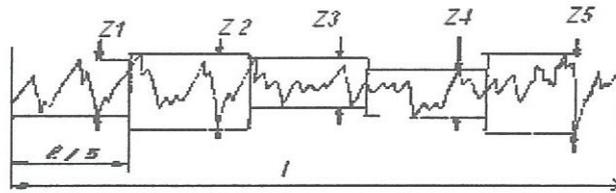


Fig. I.11 Critère de rugosité R_z

I.5.2.3 Température dans la zone de coupe

La température est une grandeur physique qui mesure le degré de chaleur d'un corps ou d'un milieu. Lorsque deux corps sont placés dans une enceinte adiabatique, le corps le plus chaud cède de la chaleur au corps le plus froid, jusqu'à ce que les deux corps aient la même température (équilibre thermique). Les termes température et chaleur désignent deux notions distinctes : la température est une propriété thermodynamique du corps qui mesure l'agitation microscopique de la matière; la chaleur est une forme d'énergie qui peut être échangée entre deux corps. On peut mesurer la température d'un corps en observant le changement de l'une de ses propriétés spécifiques, telle que la résistivité électrique.

Les études sur l'usinage ont montré l'importance de la température, ou de la distribution de la température dans l'arête des outils de coupe.

La température de coupe prend naissance au contact du copeau et de l'outil. Son importance dans l'étude de l'usure des outils avait déjà été reconnue par EDWARD HERBERT, qui a énoncé la première loi qui porte son nom: « l'usure de l'arête de l'outil n'est fonction que de la température de coupe ». Effectivement, tous les phénomènes physiques qui sont à la base de l'usure des outils (frottement, abrasion, corrosion chimique usure par diffusion) sont étroitement sous la dépendance de la température. La connaissance du gradient de température dans toute la plaquette et particulièrement à l'interface outil copeau permettra une meilleure adéquation entre les paramètres de coupe, les caractéristiques du matériau à usiner ainsi que celles de l'outil. Dans le processus de coupe, la pièce, l'outil de coupe et le copeau s'échauffent c'est-à-dire dans la zone de coupe, la température augmente, cela est dû à la transformation de l'énergie mécanique, déformation élastique et plastique, ainsi que

le frottement du copeau sur les surfaces d'attaque et de dépouille de l'outil en énergie thermique.

I.5.2.4 Usure de l'outil

Les mécanismes d'usure se divisent globalement en trois catégories : l'usure par abrasion, par adhésion et par diffusion. La première se distingue par un striage, croûte de fonderie et par des inclusions. La seconde se caractérise par un collage, soudage et des arrachements de particules. La dernière est due à un échange de particules entre la pièce et l'outil à une température élevée. L'usure est due au frottement de la pièce sur les faces en dépouille et d'attaque de l'outil. Celle relative au frottement de la pièce sur la face d'attaque de l'outil est désignée par l'usure en cratère. Elle est caractérisée par une cuvette formée sur cette face. Sa valeur K_t est la profondeur du cratère. Quant à l'usure en dépouille (usure frontale), elle est due au frottement de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête, de largeur moyenne VB (figure I.12). Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer car elle détermine l'état de surface de la pièce, la précision dimensionnelle et la durée de vie de l'outil. Les arêtes de coupe usées augmentent sensiblement les efforts de coupe. On estime que pour une usure en dépouille de 0.1mm, on enregistre une augmentation de 10% de l'effort de coupe.

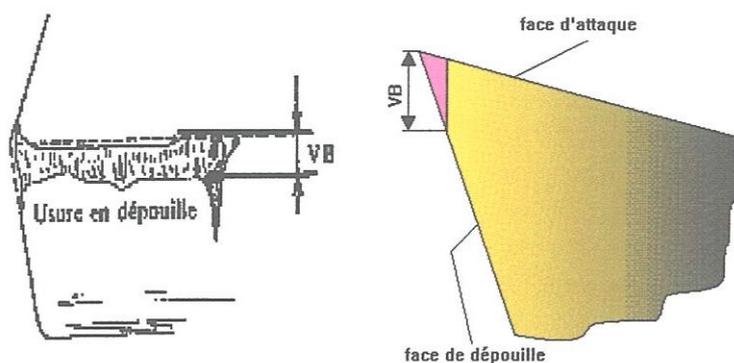


Fig. I.12 Usure en dépouille

I.6 Conclusion

L'étude bibliographique sur la coupe des métaux a permis de définir les matériaux de coupe utilisés en tournage dur tels que les carbures, les céramiques, les cermets et le CBN. Dans ce chapitre, la notion du tournage dur et les différents travaux de recherche réalisés sur l'usinage des aciers durcis ont été évoqués. L'influence des facteurs d'entrée (éléments du régime de coupe et géométrie de la partie active de l'outil) sur le processus de coupe en général et particulièrement sur les paramètres technologiques (efforts, pressions et puissance de coupe, rugosité de la surface usinée et usure de l'outil) a été mise en évidence.

Chapitre II

Procédures expérimentales

II.1 Introduction

II.2 Equipements utilisés

II.2.1 Eprouvettes

II.2.2 Machine-outil

II.2.3 Four à chambre électrique

II.2.4 Duromètre

II.2.5 Plaquettes de coupe

II.2.6 Porte-outils

II.2.7 Dynamomètre (platine KISTLER)

II.2.8 Rugosimètre

II.2.9 Pyromètre à infrarouge

II.2.10 Microscope optique

II.2.11 Autres équipements

II.3 Conditions expérimentales

II.4 Planification des expériences

II.5 Conclusion

II.1 Introduction

Les essais de chariotage faits sur l'acier X38CrMoV 5-1, nécessaires à la réalisation de notre travail, ont été effectués au hall de technologie (laboratoire de coupe des métaux) du département de génie mécanique à l'université 8 Mai 1945 de Guelma.

II.2 Equipements utilisés

II.2.1 Eprouvettes

Les éprouvettes sont en acier fortement allié travaillant à chaud de nuance X38CrMoV5-1. Cet acier possède une excellente résistance aux chocs thermiques, sa ténacité, sa résistance à haute température, son aptitude au polissage et sa résistance à la fatigue thermique, lui permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants : matriçage à chaud, moules sous pression... [14] et [15].

Pour les essais, nous avons usiné des éprouvettes de diamètre $\Phi = 80\text{mm}$ et de longueur $L = 400\text{mm}$ (fig. II.1).

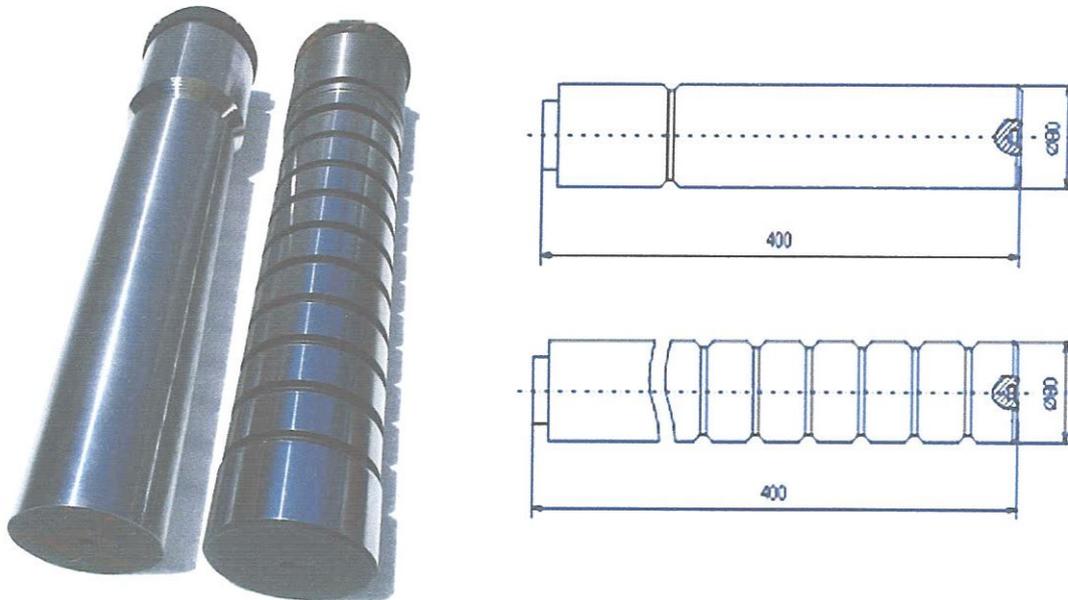


Fig. II.1 Eprouvettes utilisées

La composition chimique réelle de l'acier X38CrMoV 5-1 est donnée dans le tableau II.1.

Eléments	Pourcentage (%)
Carbone	0.35
Chrome	5.26
Molybdène	1.19
Vanadium	0.5
Silicium	1.01
Manganèse	0.32
Soufre	0.002
Phosphore	0.016
Autres éléments	1.042
Fer	90.31

Tableau II.1 Composition chimique réelle de l'acier X38CrMoV5-1

Cette analyse a été faite au laboratoire du Complexe Sidérurgique d' El Hadjar.

II.2.2 Machine-outil

La machine-outil qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40 C de puissance sur la broche égale à 6.6KW (fig.II.2).

Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont: (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min.

Les avances disponibles sont : (0.08; 0.10; 0.11; 0.12; 0.14; 0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.24... 0.8) mm/tr.



Fig. II.2 Tour parallèle SN 40 C

II.2.3 Four à chambre électrique

Pour le traitement thermique des éprouvettes, nous avons réalisé une trempe suivie d'un revenu, ce qui a augmenté la dureté des éprouvettes à 50HRC (tableau II.2).

Acier	Dureté avant traitement	Dureté après traitement	Traitement thermique		Temps de maintien
			trempe	Revenu	
X38CrMoV5-1	26HRC	50HRC	1020°C	250°C	40 minutes

Tableau II.2 Conditions de traitement thermique

Les caractéristiques du four à chambre électrique sont citées dans le tableau II.3.

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

Tableau II.3 Caractéristiques du four électrique

Les opérations de traitement thermique des éprouvettes sont représentées dans la fig. II.3 ((a), (b) et (c)).



(a) Chauffage des éprouvettes (b) Transport de la pièce (c) Trempe à l'huile

Fig. II.3 ((a), (b) et (c)) Opérations de traitement thermique

II.2.4 Duromètre

Pour mesurer la dureté des éprouvettes avant et après traitement thermique, nous avons utilisé un duromètre digital type DM2D dont les caractéristiques sont les suivantes :

son poids = 40Kgf, sa hauteur = 490mm,
sa largeur = 250mm, sa profondeur = 395mm.

La table sur laquelle se pose l'échantillon est de forme carrée de côté 110mm.

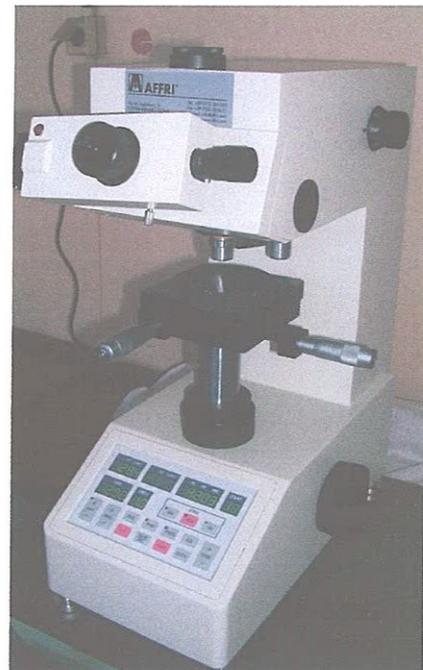
Les charges utilisées sont : (10; 25; 50; 100; 200; 300; 500; 1000) gf.

La hauteur max de l'échantillon ne doit pas dépasser 90mm.

La mesure s'effectue en HV et sera convertie en HRC.

L'intervalle de la dureté est de 211 à 1037HV (17 à 70HRC).

Le temps de chargement est de (0 à 99) secondes. Fig. II.4 Duromètre digital DM2D



II.2.5 Plaquettes de coupe

Les plaquettes de coupe que nous avons utilisé sont amovibles et se fixent mécaniquement soit par bride de serrage pour plaquette sans trou soit par levier pour plaquette avec trou.

II.2.5.1 Plaquette en carbure non revêtu

La plaquette H13A (fig. II.5) est une nuance carbure non revêtue, recommandée pour le tournage ébauche et finition des superalliages réfractaires et des alliages d'aluminium [16].

II.2.5.2 Plaquette en cermet non revêtu

La plaquette CT5015 (fig. II.6) est une nuance de carbure à base de titane (cermet à liant de cobalt pur), non revêtue. L'emploi de titane au lieu de tungstène comme base de particules dures se traduit par une plus grande stabilité chimique, cette nuance est utilisée pour l'usinage des matières collantes [16].

II.2.5.3 Plaquette en carbure revêtu

La plaquette GC3015 (fig. II.7) est une nuance de carbure à revêtement épais CVD $\text{TiCN-Al}_2\text{O}_3$ - et TiN $14\mu\text{m}$. Combinaison d'un revêtement extrêmement résistant à l'usure pour l'usinage des pièces dures et d'un substrat dur capable de supporter des températures de coupe élevées sans se déformer [16].

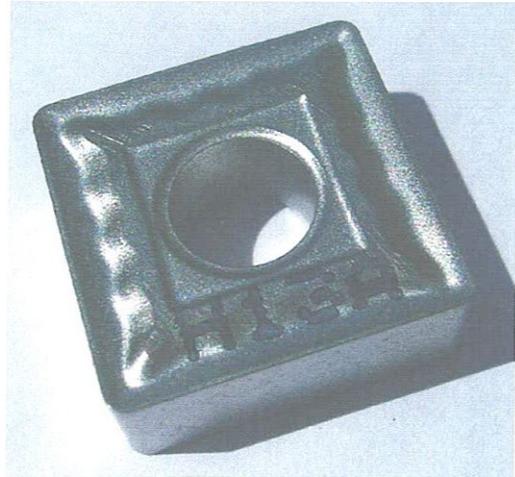


Fig. II.5 Plaquette H13A

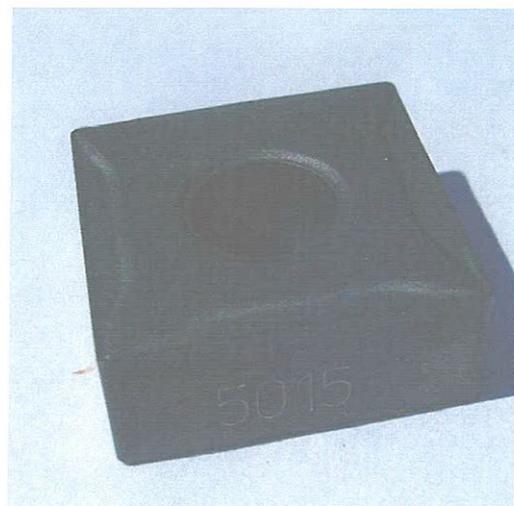


Fig. II.6 Plaquette CT5015



Fig. II.7 Plaquette GC3015

II.2.5.4 Plaquette en cermet revêtu

La plaquette GC1525 (fig. II.8) est une nuance cermet à revêtement PVD de TiCN et TiN $3\mu\text{m}$. Le revêtement PVD apporte de la résistance à l'usure et à la déformation plastique. Le choix de ce revêtement est dû à son extrême compatibilité avec le substrat, ce qui entraîne la réduction des risques d'écaillage. GC1525 est destiné pour une sécurité d'usinage élevée et un bon état de surface [16].



Fig. II.8 Plaquette GC1525

II.2.5.5 Plaquette en céramique noire

La plaquette CC650 (fig. II.9) est une nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnée de carbure de titane ($70\%Al_2O_3+30\%TiC$). Principalement recommandée pour l'usinage de finition des aciers trempés et des superalliages réfractaires, requérant une bonne résistance à l'usure associée à de bonnes propriétés thermiques [16].



Fig. II.9 Plaquette CC650

II.2.5.6 Plaquette en céramique composite

La plaquette CC670 (fig. II.10) est une nuance de céramique « Whisker » renforcée par des fibres de carbure de silicium dispersées dans le substrat ($75\%Al_2O_3+25\%SiC$). 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 [16].



Fig. II.10 Plaquette CC670

Les informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées sont mentionnées dans le tableau II.4.

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Marque	Composition	r_ϵ
Carbure non revêtu	H13A	SNMG120408 -MR	Sandvik Coromant	Carbure de tungstène	0.8mm
Cermet non revêtu	CT5015	SNMG120408 -QF	Sandvik Coromant	Carbure à base de titane	0.8mm
Carbure revêtu	GC3015	SNMA120408 -KR	Sandvik Coromant	Revêt. CVD TiCN-Al ₂ O ₃ - et TiN	0.8mm
Cermet revêtu	GC1525	SNMG120408 -PF	Sandvik Coromant	Revêt. PVD TiCN et TiN	0.8mm
Céramique mixte	CC 650	SNGA 120408 T 010 20	Sandvik Coromant	Al ₂ O ₃ (70%) + TiC (30%)	0.8mm
Céramique composite	CC670	SNGN 120408 T 010 20	Sandvik Coromant	Al ₂ O ₃ (75%) + SiC (25%)	0.8mm

Tableau II.4 Informations relatives aux plaquettes utilisées

II.2.6 Porte-outils

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux porte-outils sur lesquels se fixent les plaquettes mécaniquement soit par bride de serrage pour plaquette sans trou soit par levier pour plaquette avec trou. Les caractéristiques de ces porte-outils sont indiquées dans le tableau II.5.

Désignation	Marque	α	γ	χ	λ
CSBNR 25×25 M12	TIZIT SIMPLEX	6°	-6°	75°	-6°
PSBNR 25×25 K12	SANDVIK Coromant	6°	-6°	75°	-6°

Tableau II.5 Caractéristiques des porte-outils utilisés

La figure II.11 présente les porte-outils utilisés.

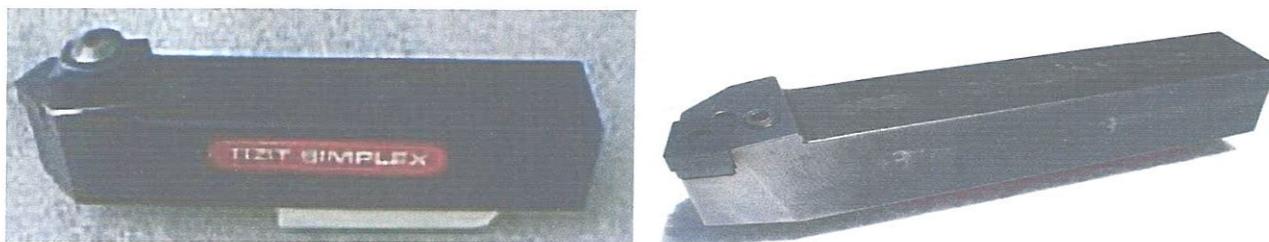


Fig. II.11 Porte-outils utilisés

II.2.7 Dynamomètre

Pour connaître l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne (dynamomètre KISTLER), 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 en 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 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. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (fig. II.12).

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques. Ces dernières 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 exprimée en trois composantes :

1. force axiale : F_x .
2. force radiale : F_y .
3. force tangentielle : F_z .

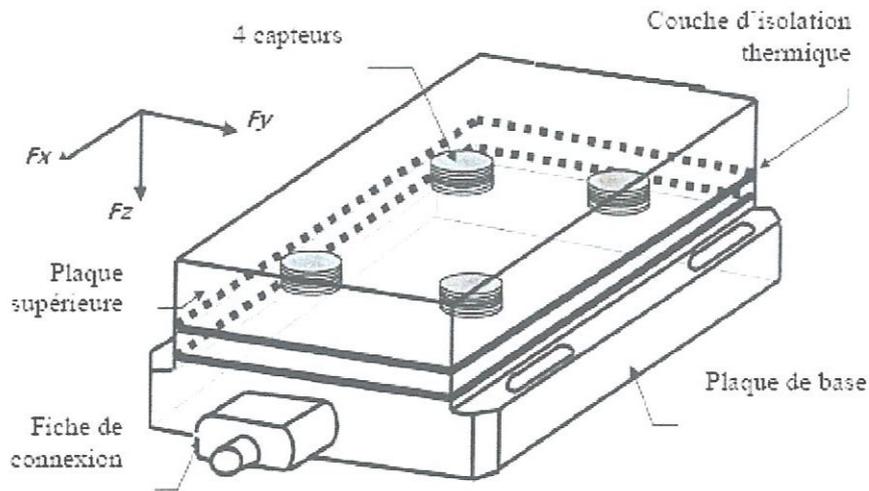


Fig. II.12 Capteur d'effort de coupe KISTLER

Le dynamomètre est à 3 composantes (9257 B) : le porte-outil type 9403 vissable est employé pour des outils de tournage avec une section carrée maximale de côté 26mm. Ses principales caractéristiques sont :

- 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).

La figure II.13 présente la chaîne de mesure des efforts de coupe.

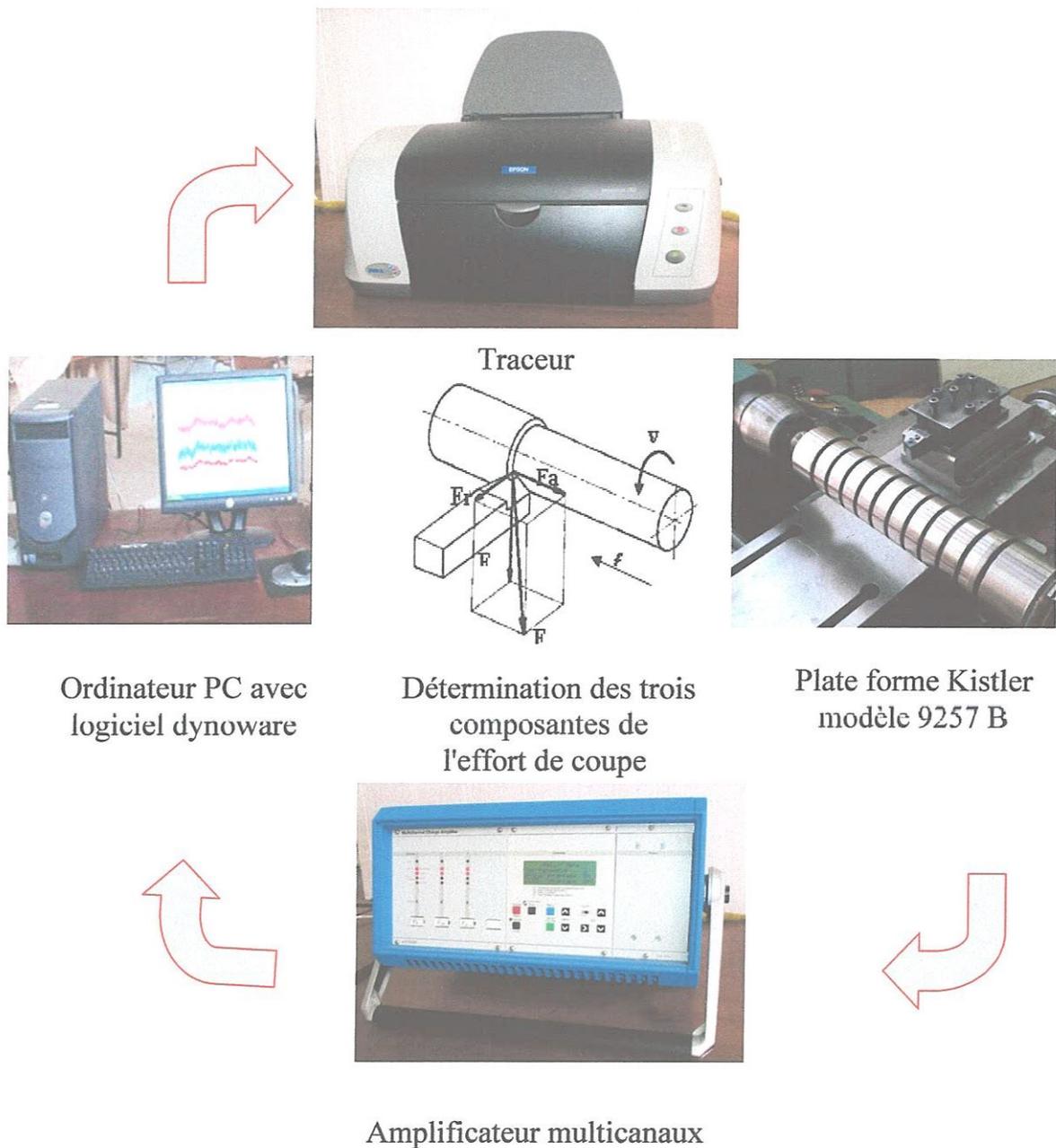


Fig. II.13 Chaîne de mesure des efforts de coupe

II.2.8 Rugosimètre

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t et R_z), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 301 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante de profil de rugosité (fig. II.14). Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. 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.



Fig. II.14 Dispositif pour mesurer la rugosité sans démonter la pièce

II.2.9 Pyromètre à infrarouge

Durant l'usinage, pour mesurer les températures maximales dans la zone de coupe, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge modèle Raynger 3I (fig. II.15). 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 (moyenne, maximale 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 μ ;
- 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 700msec.



Fig. II.15 Pyromètre à infrarouge modèle Raynger 3I

II.2.10 Microscope optique

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. 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 (fig. II.16).



Fig. II.16 Microscope optique

II.2.11 Autres équipements

En plus des équipements sus cités, nous avons utilisé :

- un chronomètre pour enregistrer le temps de coupe ;
- un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce ;
- un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés et les photos de l'usure.

II.3 Conditions expérimentales

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ , r_ϵ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). Les

conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les tableaux II.6 à II.8. Tous les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification.

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	125	f (mm/tr)	0.08; 0.11; 0.14;
ap (mm)	0.15		0.16; 0.18; 0.24.
Vc (m/min)	125	ap (mm)	0.10; 0.20; 0.30;
f (mm/tr)	0.08		0.50; 0.60; 0.80.
ap (mm)	0.15	Vc (m/min)	45; 90; 178;
f (mm/tr)	0.08		250; 350; 500.

Tableau II.6 Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	125	f (mm/tr)	0.08; 0.11; 0.14; 0.16;
ap (mm)	0.15		0.18; 0.20; 0.24.
Vc (m/min)	125	ap (mm)	0.05; 0.10; 0.20; 0.30;
f (mm/tr)	0.08		0.40; 0.50; 0.60.
ap (mm)	0.15	Vc (m/min)	60; 90; 125; 178;
f (mm/tr)	0.08		250; 350; 500.

Tableau II.7 Conditions de coupe pour les essais de rugosité

es paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	125	f (mm/tr)	0.08; 0.11; 0.14; 0.18;
ap (mm)	0.15		0.20; 0.22; 0.24.
Vc (m/min)	125	ap (mm)	0.05; 0.10; 0.20; 0.30;
f (mm/tr)	0.08		0.40; 0.50; 0.60.
ap (mm)	0.15	Vc (m/min)	45; 90; 125; 178;
f (mm/tr)	0.08		250; 350; 500.

Tableau II.8 Conditions de coupe pour les essais de température de coupe

II.4 Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c , f , a_p), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ , r_e), sont considérés comme variables d'entrée. Les efforts et les pressions de coupe, la rugosité, l'usure de l'outil, la température dans la zone de

coupe..., représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant deux méthodes de planification des expériences qui sont :

- la méthode unifactorielle;
- la méthode multifactorielle.

Cette dernière permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes.

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

Dans notre étude, nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c, f, a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (efforts de coupe et rugosité). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires, nous appliquons la formule suivante :

$$N = q^k \dots\dots\dots (9)$$

Où ; N : nombre d'essais ;

q : nombre de niveau de variations des facteurs de base ;

k : nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ($k = 3$) et chaque facteur a trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), un niveau moyen (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 éléments du régime de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II.9.

Niveau de facteurs	Valeurs naturelles des facteurs		
	f (mm/tr)	ap (mm)	V_c (m/min)
Niveau supérieur (+1)	Valeur maximale	Valeur maximale	Valeur maximale
Niveau inférieur (-1)	Valeur minimale	Valeur minimale	Valeur minimale
Niveau moyen (0)	Valeur moyenne	Valeur moyenne	Valeur moyenne
N° des essais	Valeurs codifiées des facteurs		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	0	-1	-1
3	+1	-1	-1
4	-1	0	-1
5	0	0	-1
6	+1	0	-1
7	-1	+1	-1
8	0	+1	-1
9	+1	+1	-1
10	-1	-1	0
11	0	-1	0
12	+1	-1	0
13	-1	0	0
14	0	0	0
15	+1	0	0
16	-1	+1	0
17	0	+1	0
18	+1	+1	0
19	-1	-1	+1
20	0	-1	+1
21	+1	-1	+1
22	-1	0	+1
23	0	0	+1
24	+1	0	+1
25	-1	+1	+1
26	0	+1	+1
27	+1	+1	+1

Tableau II.9 Matrice de planification des expériences pour un plan 3^3

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les équipements indispensables aux essais, la composition chimique réelle des éprouvettes, les conditions expérimentales relatives au tournage dur à sec de cet acier ainsi que la matrice de planification des expériences pour un plan 3^3 ont été présentés.

Chapitre III

Résultats des essais d'usinage

III.1 Introduction

III.2 Evaluation des performances des outils

III.2.1 Evolution de l'usure en fonction du temps d'usinage

III.2.2 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage

III.2.3 Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage

III.3 Conclusion

III.1 Introduction

Les essais de coupe effectués sur l'acier X38CrMoV5-1, traité à 50HRC, usiné en tournage dur à sec par les matériaux de coupe suivants : les carbures non revêtus H13A, les carbures revêtus GC3015, les cermets non revêtus CT5015, les cermets revêtus GC1525, les céramiques noires (mixtes) CC650 et les céramiques composites « Whiskers » CC670 nous ont permis de déterminer les paramètres technologiques (l'usure, les efforts de coupe et la rugosité des surfaces usinées) pour différentes conditions de coupe (avance par tour, vitesse de coupe, profondeur de passe et temps d'usinage). L'évolution de ces paramètres de sortie a défini les performances des matériaux de coupe utilisés et les conditions de coupe adéquates pour optimiser le processus de coupe relatif à cet acier.

III.2 Evaluation des performances des outils

III.2.1 Evolution de l'usure en fonction du temps d'usinage

Les figures III.1 ((a)-(f)) présentent respectivement l'évolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=120\text{m/min}$ des outils: (a) CC650, (b) CC670, (c) CT5015, (d) GC1525, (e) GC3015 et (f) H13A. D'après la courbe de la figure III.1 (a) et pour un temps d'usinage de 740 secondes (12.33min), l'usure en dépouille VB de la plaquette CC650 atteint la valeur de 0.118mm. A la fin de l'usinage à $t=3700$ secondes (61.67min), l'usure en dépouille est de 0.374mm. Cette variation correspond à une augmentation de 217%. La tenue de cette plaquette est de 49 minutes. Pour une première opération de chariotage par la plaquette CC670 (figure III.1 (b)), l'usure VB est de 0.243mm. Cette dernière dépasse largement sa valeur admissible et vaut 0.429mm pour la deuxième opération de chariotage. En examinant l'allure de cette courbe, on enregistre une durée de vie de cet outil de 8 minutes seulement. Dans ces conditions de coupe, la tenue de la céramique composite ne dépasse pas le taux de 17% de celle de la céramique mixte. Pour l'usinage effectué par la plaquette en cermet non revêtu CT5015 (figure III.1 (c)), son usure VB est de 0.542mm ce qui signifie que l'arête de cet outil est sérieusement endommagée. Sa tenue est inférieure à 2 minutes. L'usure en dépouille du cermet

revêtu GC1525 dépasse sa valeur admissible et atteint 0.460mm pour trois opérations de chariotage. D'après la courbe de la figure III.1 (d), sa durée de vie est de 3 minutes.

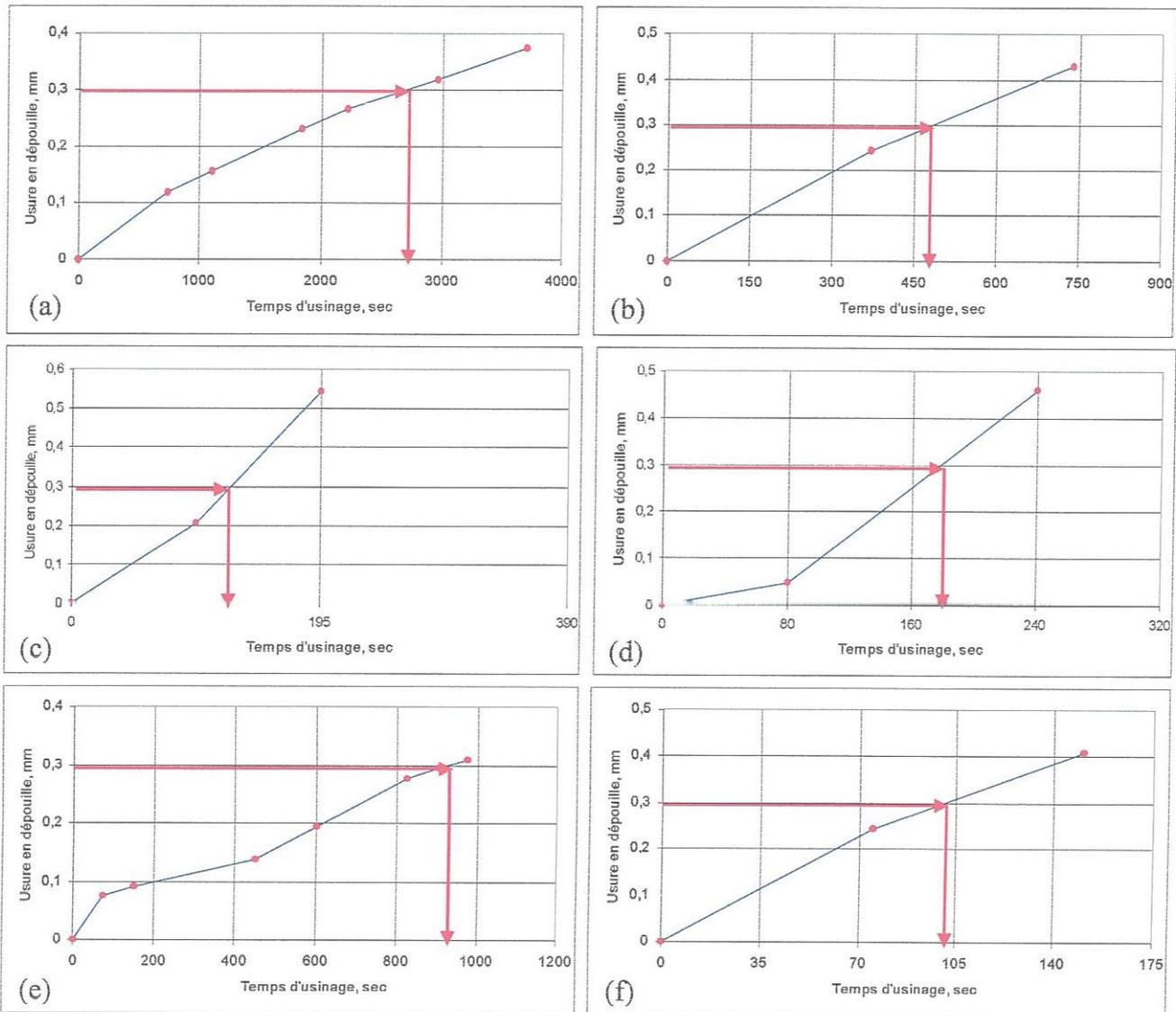


Fig. III.1 Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=120\text{m/min}$ pour les outils: (a) CC650, (b) CC670, (c) CT5015, (d) GC1525, (e) GC3015 et (f) H13A

Le premier essai de tournage fait par le carbure revêtu GC3015 (figure III.1 (e)) génère une usure en dépouille de 0.074mm. Pour un temps d'usinage de 975 secondes (16.25min), l'usure VB est de 0.309mm ce qui définit une durée de vie de cet outil de 16 minutes. A $t=75\text{secondes}$ (1.25min), l'usure en dépouille du carbure non revêtu H13A est de 0.244mm (figure III.1 (f)). Cette dernière dépasse sa valeur admissible et

vaut 0.408mm pour un temps d'usinage de 150 secondes (2.5min). La tenue du H13A est inférieure à 2 minutes.

Les figures III.2 ((a) et (b)) montrent successivement l'évolution de l'usure en dépouille VB des outils: (a) CC650 et (b) CC670 en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=90\text{m/min}$.

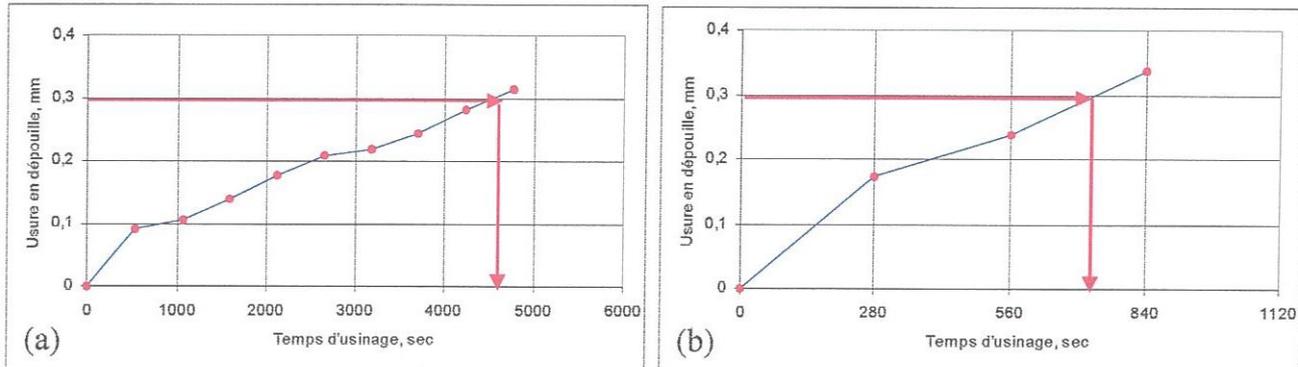


Fig. III.2 Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=90\text{m/min}$ pour les outils: (a) CC650 et (b) CC670

Pour un temps d'usinage de 530 secondes (8.83min), l'usure en dépouille VB de la céramique mixte est de 0.091mm. A un temps de 4770 secondes (79.5min), l'usure VB est de 0.315mm. Cette variation correspond à une augmentation de 246%. D'après la figure III.2 (a), la durée de vie de la plaquette CC650 est de 79 minutes. Pour une première opération de chariotage (figure III.2 (b)), l'usure VB de la céramique composite est de 0.173mm. Pour la troisième opération d'usinage, l'usure est de 0.338mm. La tenue de la plaquette CC670 n'est que de 12 minutes. On remarque que pour ces conditions de coupe, la durée de vie de la céramique composite est inférieure à 16% de celle de la céramique mixte.

Les histogrammes de la figure III.3 précisent les tenues des outils utilisés pour le régime de coupe sous mentionné. Les tenues de la céramique composite CC670, du cermet non revêtu CT5015, du cermet revêtu GC1525, du carbure revêtu GC3015 et du carbure non revêtu H13A sont respectivement (8; 1.67; 3; 16 et 1.58) minutes et ne représentent que (16.33; 3.41; 6.12; 32.65 et 3.22) % de celle de la céramique mixte CC650.

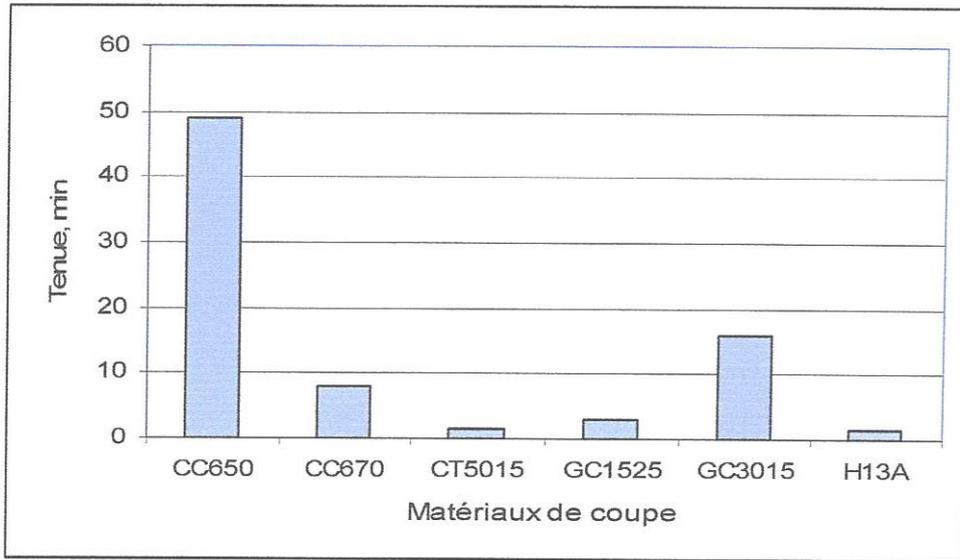


Fig. III.3 Durées de vie des outils de coupe utilisés pour une usure admissible
 $[VB]=0.3\text{mm}$, $V_c=120\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.15\text{mm}$

Les histogrammes exposés dans la figure III.4 indiquent les tenues des céramiques (mixte CC650 et composite CC670). Ces dernières sont successivement (79.5 et 12) minutes. Pour ces conditions de coupe, la durée de vie de la céramique composite CC670 ne dépasse pas 15.1% de celle de la céramique mixte CC650.

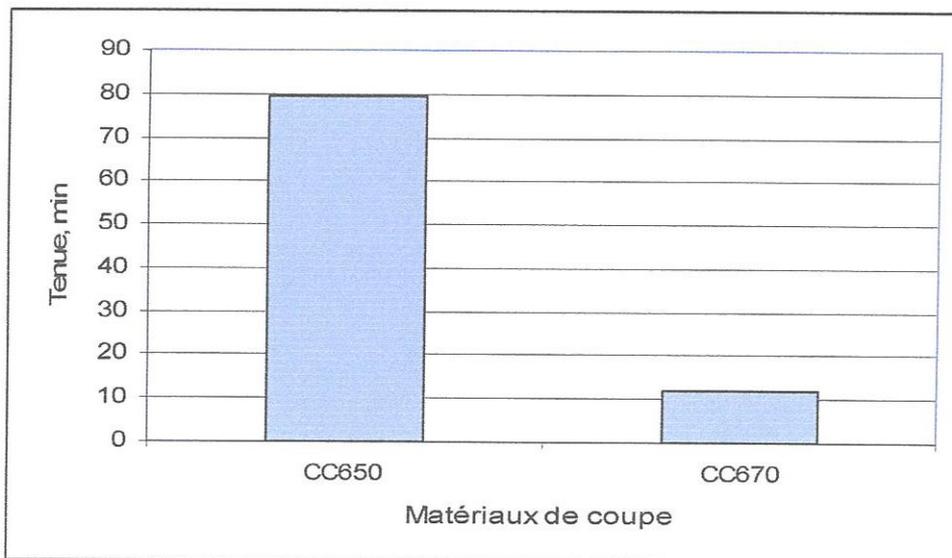


Fig. III.4 Durées de vie des céramiques (mixte et composite) pour une usure admissible
 $[VB]=0.3\text{mm}$, $V_c=90\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.15\text{mm}$

Ces résultats prouvent que la céramique mixte CC650 est plus performante que les autres nuances utilisées en terme de résistance à l'usure.

La figure III.5 expose les différentes étapes de propagation de l'usure en dépouille VB de la céramique mixte CC650 à $V_c=120\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.15\text{mm}$.

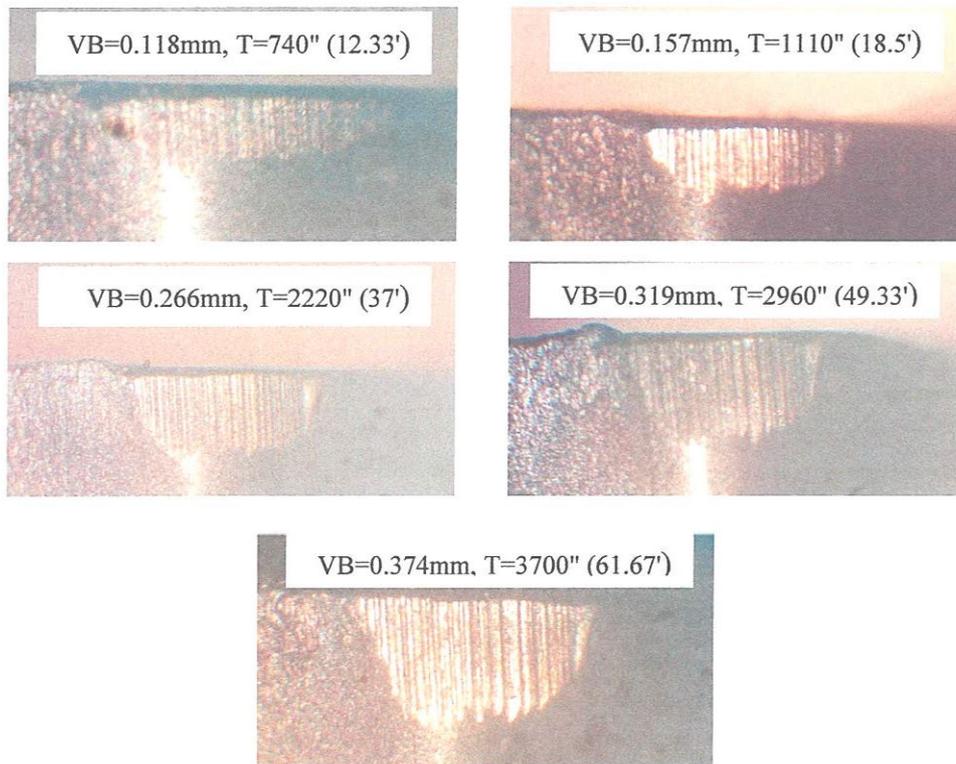


Fig. III.5 Photos de l'usure en dépouille VB de la céramique mixte CC650 pour $V_c=120\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.15\text{mm}$

III.2.2 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage

Les figures III.6 ((a)-(f)) illustrent par ordre l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=120\text{m/min}$ pour les outils: (a) CC650, (b) CC670, (c) CT5015, (d) GC1525, (e) GC3015 et (f) H13A.

Il ressort que pour toutes les conditions de coupe testées et quel que soit l'outil utilisé, l'effort principal est l'effort radial.

Il est à signaler que le temps d'usinage a un effet énorme sur la variation des efforts de coupe.

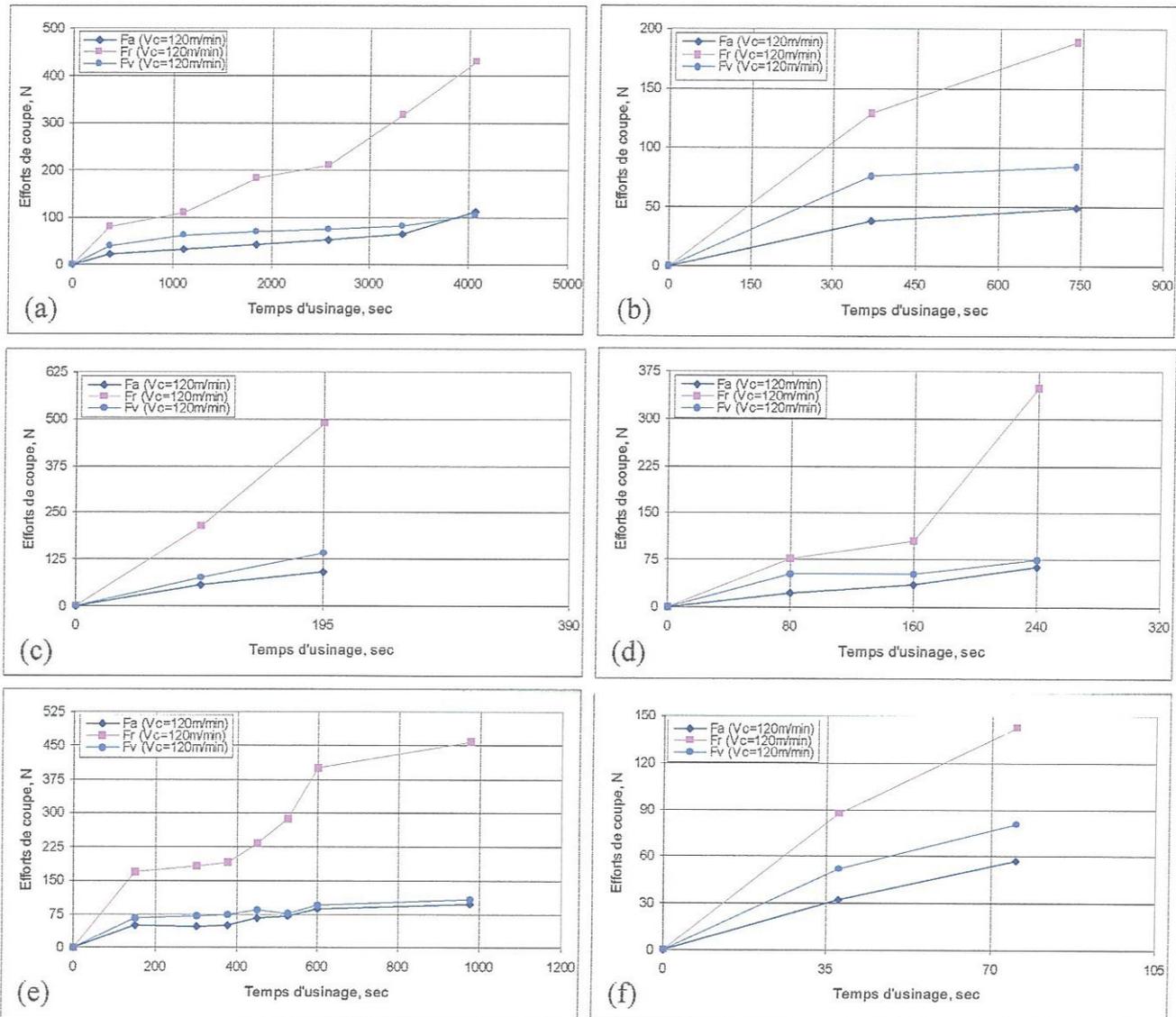


Fig. III.6 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à $f=0.08 \text{ mm/tr}$; $a_p=0.15 \text{ mm}$ et $V_c=120 \text{ m/min}$ pour les outils: (a) CC650, (b) CC670, (c) CT5015, (d) GC1525, (e) GC3015 et (f) H13A

Les courbes représentatives des efforts de coupe (F_a , F_r et F_v) de la figure III.6 (a) sont relatives au chariotage effectué par une plaquette de céramique mixte CC650. L'augmentation du temps d'usinage de 370 secondes (6.17min) à 4070 secondes (67.83min) induit une augmentation respective des efforts de coupe de l'ordre de (422.7; 436.5 et 159.6) %. Pour la plaquette en céramique composite CC670 (figure III.6 (b)), les efforts de coupe (F_a , F_r et F_v) sont successivement (48.62; 189.30 et 83.68) N. Pour le chariotage fait par le cermet non revêtu CT5015 (figure III.6 (c)), les valeurs des efforts de coupe (F_a , F_r et F_v) atteignent (89.52; 486.30 et 141.23) N. Pour

la plaquette de cermet revêtu GC1525 (figure III.6 (d)), les efforts de coupe (F_a , F_r et F_v) sont (64.92; 348.6 et 76.28) N. La figure III.6 (e) présente l'évolution des efforts de coupe (F_a , F_r et F_v) en fonction du temps d'usinage à $V_c=120\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ pour treize passes effectuées par le carbure revêtu GC3015. A la fin de l'usinage, les efforts de coupe sont respectivement (96.8; 459.01 et 108.55) N. La figure III.6 (f) montre l'influence du temps d'usinage sur les composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_v) pour l'usinage réalisé par le carbure non revêtu H13A. Les valeurs des efforts de coupe sont (57.03; 142.61 et 80.68) N.

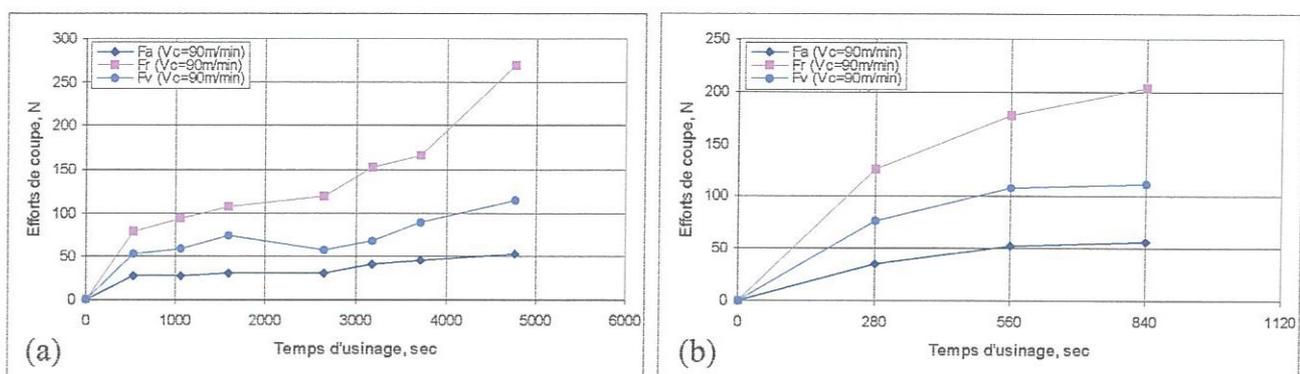


Fig. III.7 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=90\text{m/min}$ pour les outils: (a) CC650 et (b) CC670

La figure III.7 (a) illustre l'impact du temps d'usinage sur les efforts de coupe pour un chariotage effectué par une plaquette en céramique mixte CC650 à $V_c=90\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.15\text{mm}$. La variation du temps d'usinage de 530 à 4770 secondes (8.83 à 79.5 min) mène à un accroissement des efforts (F_a , F_r et F_v) de (99.3; 243 et 118) %.

L'influence du temps d'usinage sur les efforts de coupe dans les mêmes conditions pour une céramique verte CC670 est affichée dans la figure III.7 (b). Pour trois opérations de chariotage (de $t=280$ à $t=840$) secondes (4.67 à 14 min), les efforts de coupe (F_a , F_r et F_v) varient respectivement de (35.09; 125.98 et 76.95) N à (56.91; 204.06 et 111.39) N. Ce changement correspond à une augmentation de (62; 62 et 45) %. Pour un temps d'usinage inférieur à 840 secondes (14min), les efforts de coupe produits par la céramique verte sont largement supérieurs à ceux de la céramique mixte.

III.2.3 Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage

Les figures III.8 ((a)-(f)) présentent 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) CC650, (b) CC670, (c) CT5015, (d) GC1525, (e) GC3015 et (f) H13A à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=120\text{m/min}$. 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 à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=120\text{m/min}$ pour la céramique mixte CC650 sont exposées dans la figure III.8 (a). Pour un temps d'usinage variant de 370 à 3700 secondes (6.17 à 61.67) minutes, les critères de rugosité passent de (0.35; 3.32 et 2.19) μm à (1.71; 8 et 6.7) μm . Cette variation correspond à une augmentation de (388; 141 et 206) %.

La figure III.8 (b) montre l'effet du temps d'usinage sur les critères de rugosité pour la céramique composite CC670 dans les mêmes conditions de coupe. Il s'avère que pour deux opérations de chariotage, les critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) prennent directement les valeurs de (1.62; 7.8 et 6.3) μm .

Il est à signaler que pour un temps d'usinage inférieur à 740 secondes (12.33min), les rugosités relatives à la céramique composite CC670 sont largement supérieures à celles de la céramique mixte CC650.

Les courbes des rugosités trouvées lors du chariotage par le cermet non revêtu CT5015 dans les mêmes conditions de coupe sont illustrées dans la figure III.8 (c). Pour un temps d'usinage de 195 secondes (3.25min), les trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) prennent directement les valeurs de (1.59; 10.6 et 6.9) μm . Alors que pour le cermet revêtu GC1525 (figure III.8 (d)), les critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) ne sont successivement que (0.65; 6.9 et 2.5) μm à un temps d'usinage de 240 secondes (4min). La figure III.8 (e) met en évidence l'impact du temps d'usinage sur les critères de rugosité dans les mêmes conditions de coupe et pour un chariotage exécuté par un outil en carbure revêtu GC3015. Lorsque le temps d'usinage varie de 75 à 975 secondes (1.25 à 16.25min), les critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) passent de (0.5; 4.8 et 1.9) μm à (1.36; 6.2 et 4.8) μm . Cette augmentation est de (172; 29 et 153) %.

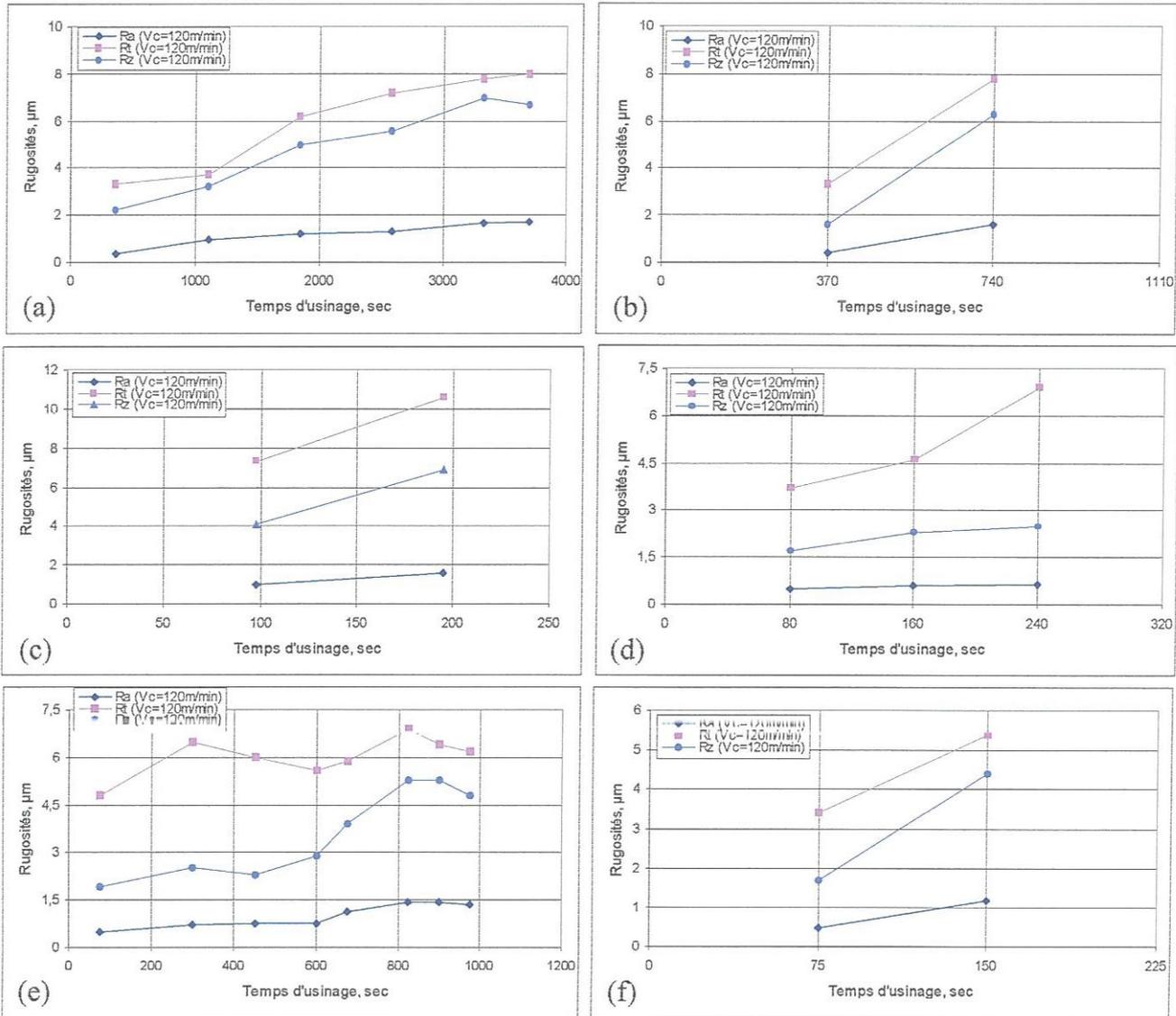


Fig. III.8 Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=120\text{m/min}$ pour les outils: (a) CC650, (b) CC670, (c) CT5015, (d) GC1525, (e) GC3015 et (f) H13A

La figure III.8 (f) montre l'évolution des critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction du temps d'usinage pour un carbure non revêtu H13A. Pour une première opération de chariotage à $t=75$ secondes (1.25min), les rugosités sont (0.48; 3.4 et 1.7) μm . A $t=150$ secondes (2.5min) :deuxième opération de chariotage, les critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) sont (1.19; 5.0 et 4.4) μm . Ce qui signifie que l'augmentation est de (148; 47 et 159) %.

Les figures III.9 ((a) et (b)) montrent l'influence du temps d'usinage sur les trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=90\text{m/min}$ pour les outils: (a) CC650 et (b) CC670.

On note que même pour ces conditions de coupe, les courbes de rugosité ont une allure ascendante. Cette synthèse confirme que le temps d'usinage a une énorme influence sur les critères de rugosité étudiés.

La figure III.9 (a) présente l'évolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=90\text{m/min}$ pour la céramique mixte CC650. Au début du chariotage à $t=530$ secondes (8.83min), les trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) sont respectivement (0.64; 3.5 et 2.3) μm . A la fin du chariotage à $t=4770$ secondes (79.5min), les rugosités atteignent les valeurs de (1.52; 13.1 et 6.1) μm . Ce qui signifie que cette augmentation est de (137.5; 274.3 et 165.2) %.

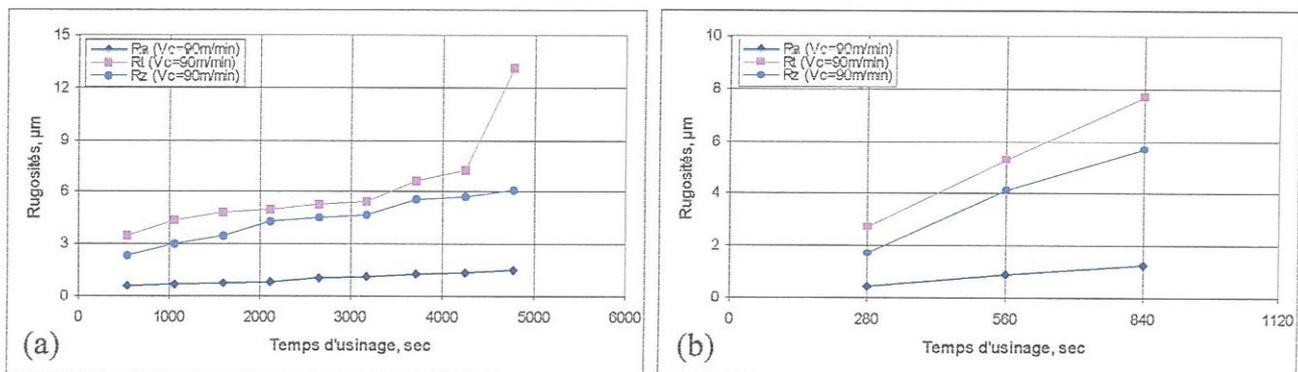


Fig. III.9 Evolution des rugosités en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=90\text{m/min}$ pour les outils: (a) CC650 et (b) CC670

L'évolution des critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $V_c=90\text{m/min}$ pour la céramique composite CC670 est illustrée dans la figure III.9 (b). A la première opération de chariotage à $t=280$ secondes (4.67min), les trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) sont successivement (0.45; 2.7 et 1.7) μm . A la troisième opération d'usinage à $t=840$ secondes (14min), les critères de rugosité sont (1.26; 7.7 et 5.7) μm . Ce qui correspond à une augmentation de (180; 185 et 235) %.

III.3 Conclusion

Les essais de coupe pratiqués sur l'acier X38CrMoV5-1, traité à 50HRC, usiné en tournage dur à sec par les matériaux de coupe suivants : les carbures non revêtus H13A, les carbures revêtus GC3015, les cermets non revêtus CT5015, les cermets revêtus GC1525, les céramiques noires (mixtes) CC650 et les céramiques composites « Whiskers » CC670 nous ont permis d'évaluer les performances de ces outils de coupe en termes d'usure en dépouille, d'efforts de coupe et de rugosité des surfaces usinées. Ainsi, les plages de conditions de coupe liées au fonctionnement correct des outils, les mieux adaptées et les durées de vie de chaque outil, ont été déterminées.

Il est à noter que pour les conditions de coupe suivantes: $V_c=120\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.15\text{mm}$, la tenue de la céramique mixte CC650 est de 49 minutes, celle de la céramique composite CC670 n'est que de 8 minutes, celles du cermet non revêtu CT5015 et du carbure non revêtu H13A sont inférieures à 2 minutes, celle du cermet revêtu GC1525 est de 3 minutes alors que celle du carbure revêtu GC3015 est de 16 minutes. On remarque que la durée de vie de la céramique mixte CC650 est largement supérieure à celles des autres outils et par conséquent elle est la plus performante en terme d'usure.

Il est à signaler que pour toutes les conditions de coupe et quel que soit l'outil de coupe utilisé, l'effort principal est l'effort radial.

Chapitre IV

Comportement de la céramique mixte (CC650) à la coupe

IV.1 Introduction

IV.2 Evolution de l'usure en fonction des conditions de coupe

IV.3 Evolution des efforts de coupe

IV.4 Evolution des pressions de coupe et de l'effort résultant

IV.5 Evolution des rugosités

IV.6 Evolution de la température dans la zone de coupe

IV.7 Conclusion

IV.1 Introduction

La céramique mixte CC650 s'est avérée plus performante que les autres outils, c'est pour cette raison que nous avons jugé utile d'approfondir l'étude sur le comportement de cette nuance à la coupe en termes d'usure, d'efforts et de pressions de coupe, de rugosité des surfaces usinées et de température dans la zone de coupe.

IV.2 Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction des conditions de coupe

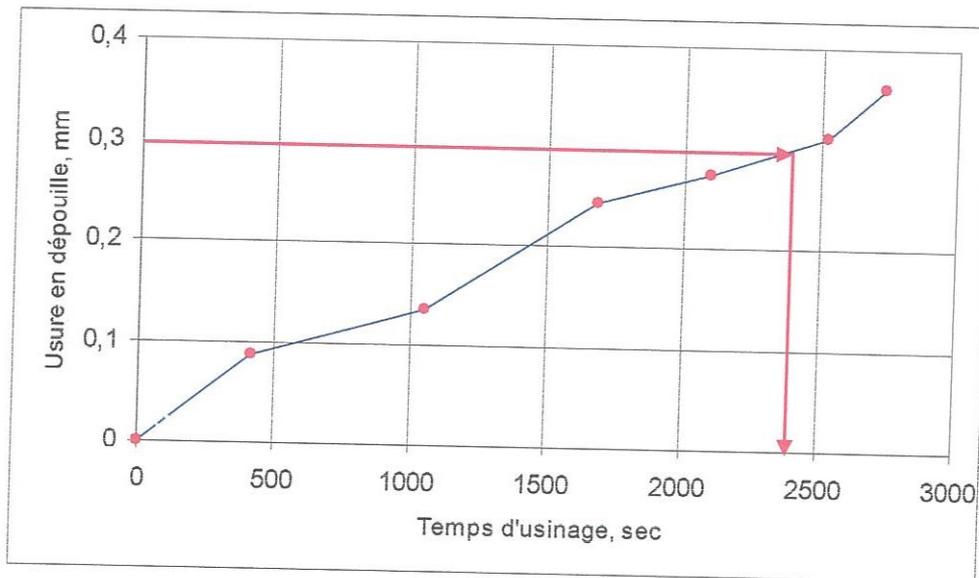


Fig. IV.1 Evolution de l'usure en dépouille VB de la plaquette CC650 en fonction du temps d'usinage à $f=0.16\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$; $V_c=120\text{m/min}$

La figure IV.1 met en évidence l'évolution de l'usure en dépouille VB de la céramique mixte CC650. Pour un temps d'usinage de 420 secondes (7min), l'usure en dépouille atteint la valeur de 0.087mm. Cette dernière est de 0.36mm à $t=2730$ secondes (45.5min). Ce qui correspond à une augmentation de 314%. D'après la courbe de la figure ci-dessus, la durée de vie de cette plaquette est de 42 minutes.

La figure IV.2 expose l'évolution de l'usure en dépouille VB de la céramique mixte CC650 à $V_c=180\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$ et $f=0.08\text{mm/tr}$. Pour la première opération de chariotage, l'usure en dépouille de cet outil est de 0.143mm. A la sixième opération d'usinage, l'usure dépasse sa valeur admissible et vaut 0.404mm. Cette variation correspond à un accroissement de 183%. La tenue de l'outil pour ces conditions de coupe n'est que de 26 minutes pour une usure admissible $[VB]=0.3\text{mm}$.

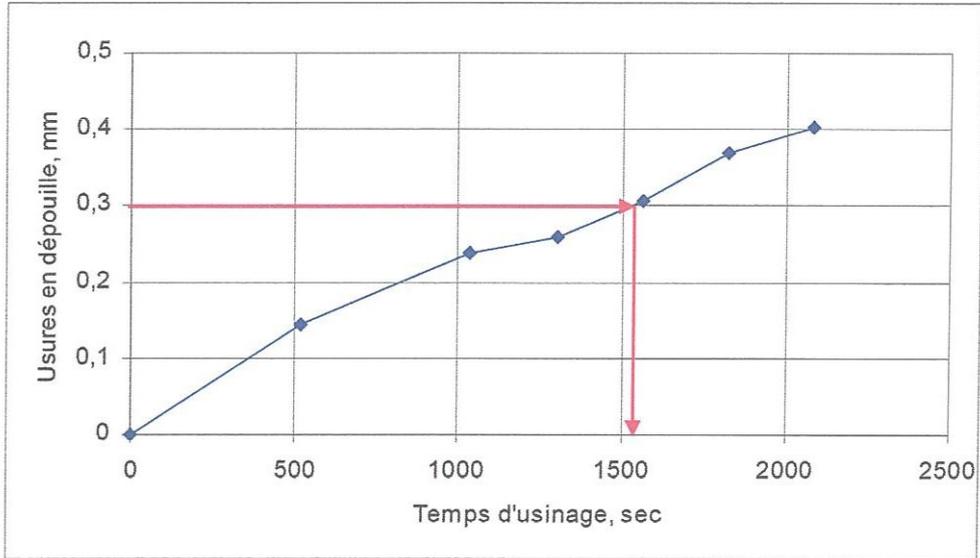


Fig. IV.2 Evolution de l'usure en dépouille VB de la plaquette CC650 en fonction du temps d'usinage à $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$; $V_c=180\text{m/min}$

L'évolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à $f=0.16\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$; $V_c=180\text{m/min}$ est illustrée dans la figure Fig. IV. 3. VB est de 0.1mm à $t=300$ secondes (5min). A $t=1650$ secondes (27.5min), l'usure de cette plaquette pour les conditions de coupe indiquées est de 0.394mm. Ce qui représente une augmentation de 294%. La durée de vie de la plaquette CC650 se réduit à 22.5 minutes. D'après ces résultats, on peut conclure que le temps d'usinage et la vitesse de coupe ont un impact énorme sur l'usure en dépouille de l'outil utilisé.

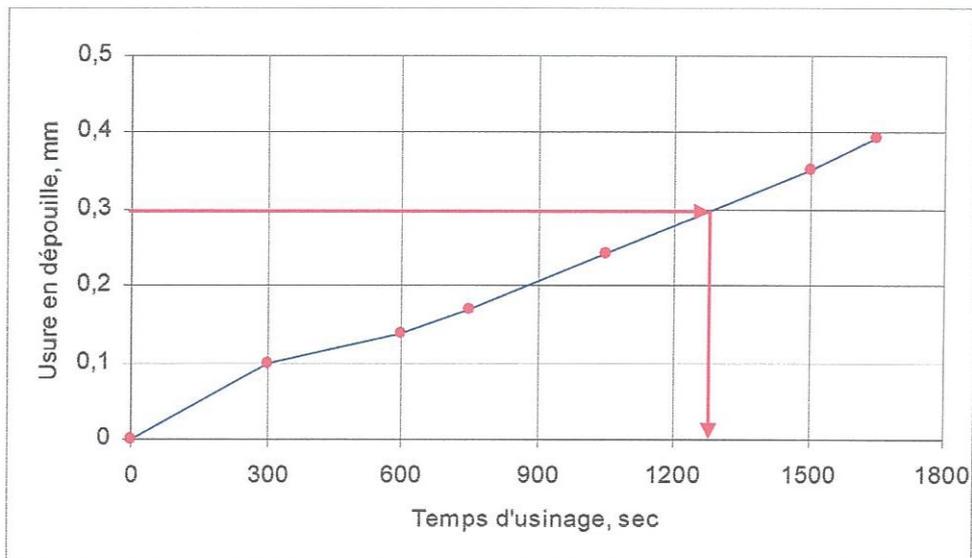


Fig. IV.3 Evolution de l'usure en dépouille VB de la plaquette CC650 en fonction du temps d'usinage à $f=0.16\text{mm/tr}$; $a_p=0.15\text{mm}$; $V_c=180\text{m/min}$

IV.3 Evolution des efforts de coupe

IV.3.1 Influence de l'avance

Les résultats présentés sur la figure IV.4 montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance. Si l'avance augmente, la section du copeau cisailé accroît, d'où le métal résiste plus à la rupture et nécessite des efforts plus grands pour l'enlèvement du copeau. On remarque que l'effort radial est prépondérant par rapport aux deux autres et cela pour toutes les avances testées. Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de l'avance sur les efforts de coupe sont comme suit : l'augmentation de l'avance de (0.08 à 0.24) mm/tr accroît les composantes de l'effort de coupe (F_r , F_v et F_a) successivement de (48.53; 188.7 et 124) %. On constate que l'effort tangentiel est très affecté par l'avance, suivi de l'effort axial et en dernier lieu de l'effort radial.

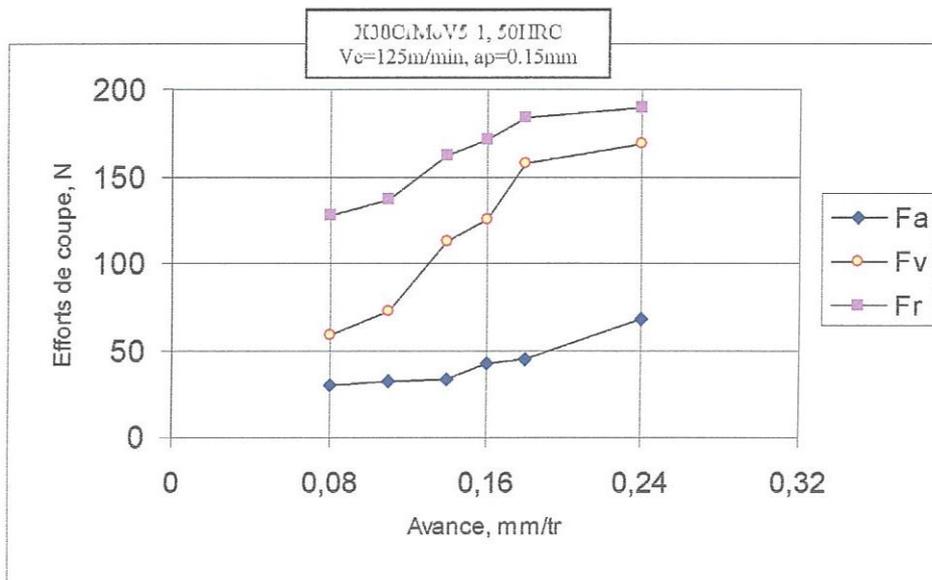


Fig. IV.4 Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance

IV.3.2 Influence de la vitesse de coupe

La figure IV.5 montre qu'une augmentation de la vitesse de coupe conduit généralement à une diminution des composantes de l'effort de coupe. Ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui rend le métal usiné plus plastique et par conséquent les efforts nécessaires à la coupe diminuent. En examinant l'allure des trois courbes, on enregistre une décroissance très nette de l'effort radial

jusqu'à la vitesse de 125m/min, au-delà de cette limite, il se stabilise et reprend légèrement une allure ascendante. Par contre les efforts axial et tangentiel diminuent jusqu'à la vitesse de 250m/min, au-delà de cette limite, ils se stabilisent légèrement.

On note que les valeurs maximales des efforts de coupe (F_a , F_r et F_v) sont respectivement de (42.28; 81.47 et 144.53) N. Elles ont été enregistrées à la vitesse de 45m/min.

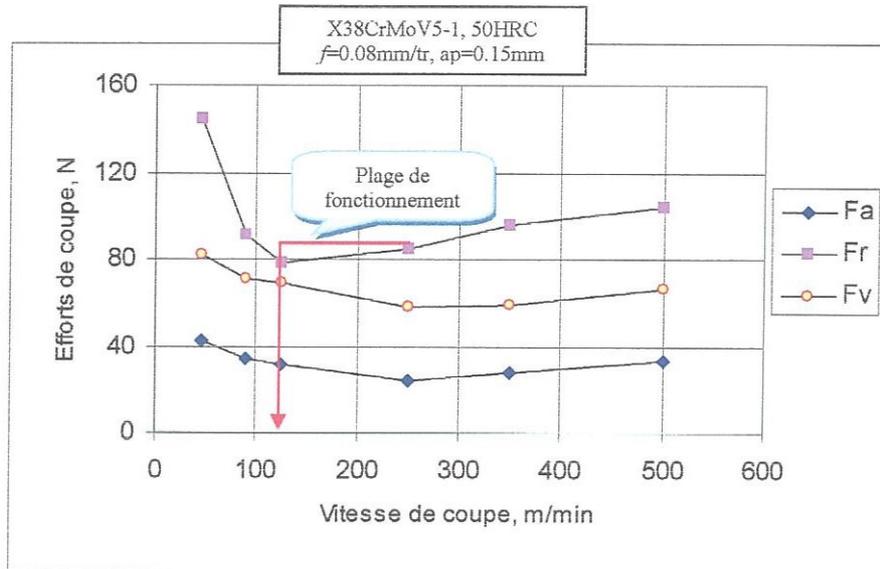


Fig. IV.5 Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe

IV.3.3 Influence de la profondeur de passe

Les résultats obtenus sur la figure IV.6 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe. Avec une augmentation de cette dernière, l'épaisseur du copeau devient importante ce qui cause une croissance de volume du métal déformé et cela nécessite d'énormes efforts de coupe pour tailler le copeau. Pour les valeurs de profondeur de passe prises entre (0.1 à 0.8) mm, on enregistre une augmentation des composantes de l'effort de coupe (F_r , F_v et F_a) successivement de (84; 481 et 528) %. D'après ces résultats, c'est l'effort axial qui est le plus sensible à l'augmentation de la profondeur de passe, suivi de l'effort tangentiel et en dernier lieu de l'effort radial.

Il est à signaler que parmi les paramètres de coupe (f , V_c et a_p), c'est la profondeur de passe qui affecte les efforts de coupe d'une manière considérable.

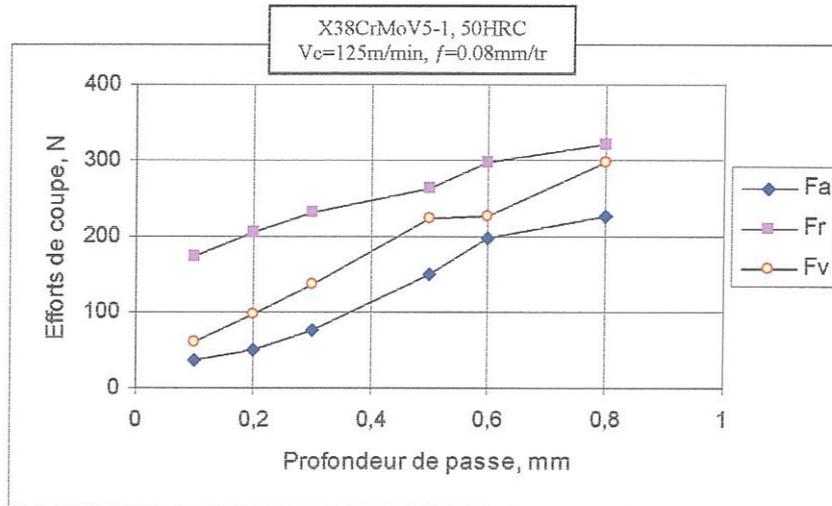


Fig. IV.6 Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe

IV.4 Evolution des pressions de coupe et de l'effort résultant

IV.4.1 Influence de l'avance

La figure IV.7 présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance.

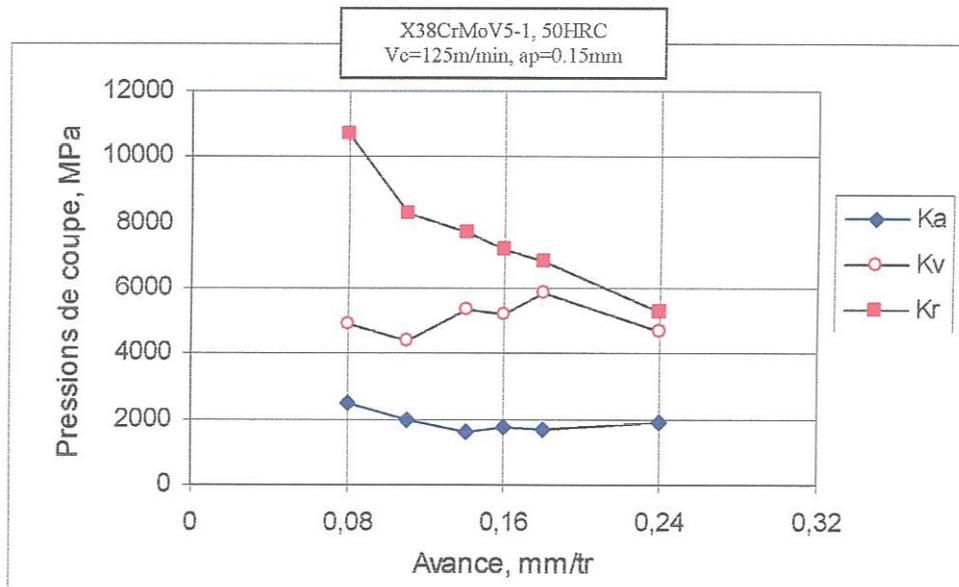


Fig. IV.7 Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance

On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance, les pressions de coupe diminuent. Pour les faibles avances, on enregistre des pressions extrêmement élevées. Avec une avance de 0.08mm/tr, les pressions de coupe (Ka, Kv et Kr) sont de l'ordre de (2521; 4870 et 10667) MPa. Pour une avance de 0.24mm/tr, les pressions chutent

successivement de (25.26; 3.78 et 50.49) %. C'est la pression de coupe radiale qui est la plus affectée.

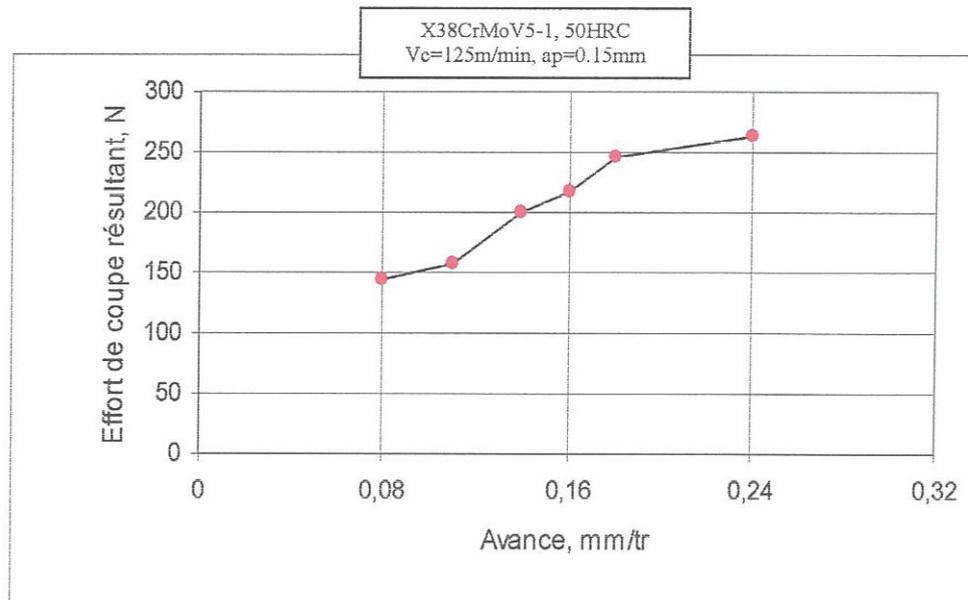


Fig. IV.8 Evolution de l'effort de coupe résultant en fonction de l'avance

La figure IV.8 présente l'évolution de l'effort de coupe résultant en fonction de l'avance. Les conséquences sur le plan pratique sont comme suit : l'augmentation de l'avance de (0.08 à 0.14) mm/tr, accroît l'effort de coupe résultant de 38.92%. L'augmentation de l'avance de (0.08 à 0.24) mm/tr, conduit à une élévation de l'effort de coupe résultant de 82.78%.

IV.4.2 Influence de la vitesse de coupe

La figure IV.9 montre l'évolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe. Il ressort que cette évolution s'effectue en trois zones distinctes. La première zone est décroissante. Elle s'étend de la vitesse de coupe de 45 à 125m/min. les valeurs maximales des pressions de coupe (K_a , K_t et K_r) sont de l'ordre de (3524; 6789 et 12044) MPa. Ces dernières on été enregistrées à la vitesse de coupe de 45m/min. La fin de cette zone conduit à la détermination de la vitesse minimale du domaine d'utilisation du couple outil matière. La deuxième se caractérise par un intervalle où les pressions de coupe se stabilisent, le décrochage s'effectue à partir de $V_c=125m/min$. En pratique, cette zone constitue la plage optimale d'utilisation de l'arête de coupe. Cela a pour effet de minimiser les contraintes qui provoquent les

sollicitations et la rupture brusque de l'arête de coupe. La troisième zone correspond à une vitesse $V_c \geq 250\text{m/min}$), les courbes de la pression de coupe prennent une allure légèrement ascendante à cause des vibrations.

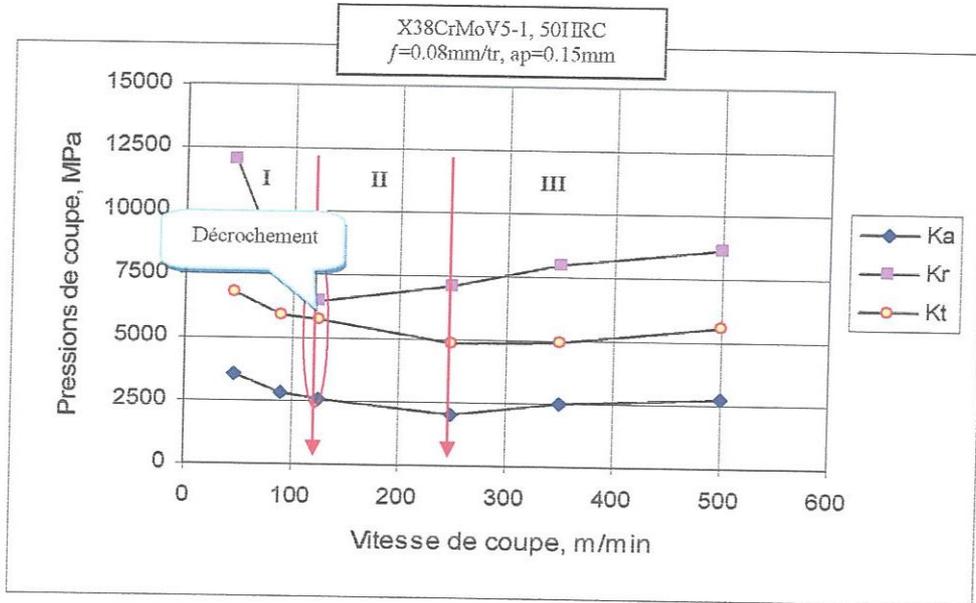


Fig. IV.9 Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe

La figure IV.10 illustre l'évolution de l'effort de coupe résultant en fonction de la vitesse de coupe.

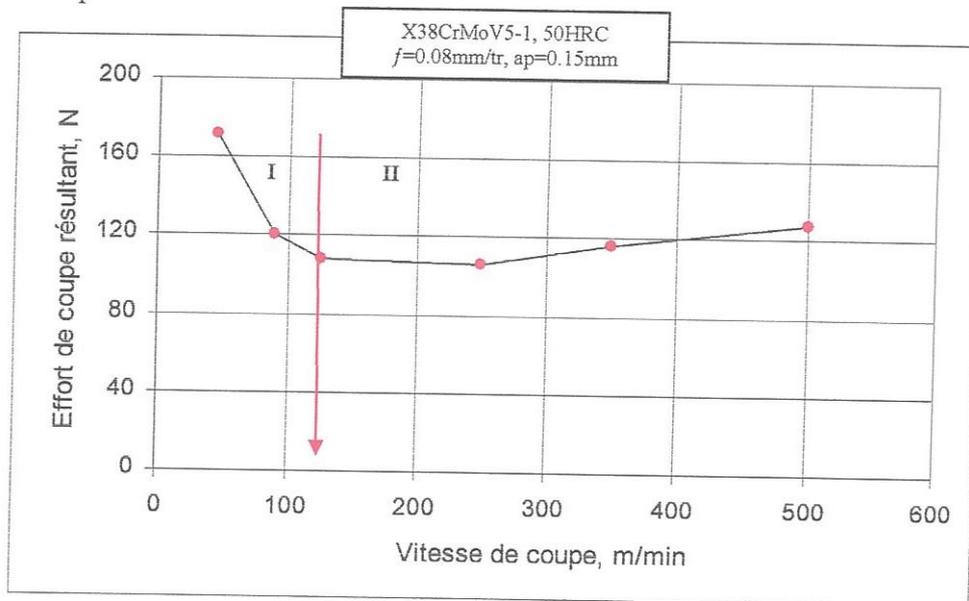


Fig. IV.10 Evolution de l'effort de coupe résultant en fonction de la vitesse de coupe

En analysant l'allure de cette courbe, on constate que l'effort résultant diminue jusqu'à la vitesse de 125m/min, au-delà de cette limite, il se stabilise légèrement. Une

élévation de la vitesse de coupe de 45 à 125m/min, conduit à une diminution de l'effort résultant de 36.70%. Pour la vitesse de 500m/min, l'effort résultant n'atteint que 74.44% de sa valeur maximale.

IV.4.3 Influence de la profondeur de passe

La figure IV.11 illustre l'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe. On remarque que l'augmentation de la profondeur de passe conduit à une chute des pressions de coupe et cela en deux périodes d'évolution différentes.

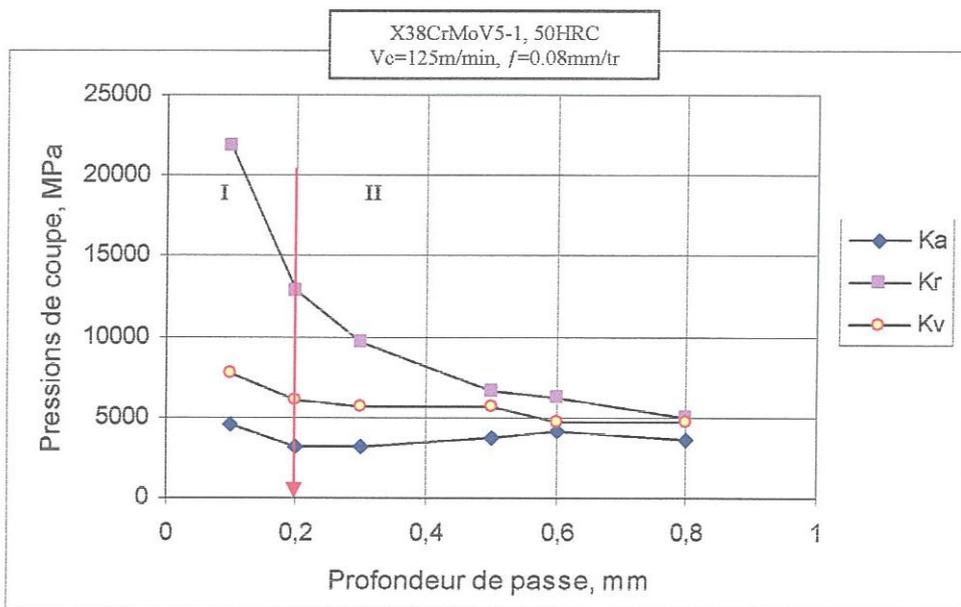


Fig. IV.11 Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe

La première zone décroissante correspond à un chargement énorme de l'arête de coupe. Les pressions enregistrées sont très élevées dans cette zone, à titre d'exemple, pour une profondeur de 0.10mm, on enregistre des pressions (Ka, Kv et Kr) de l'ordre de (4504; 7725 et 21844) MPa. Avec l'augmentation de la profondeur de passe à 0.2mm, les pressions de coupe chutent successivement de (30; 21 et 41.5) %. La deuxième zone est caractérisée par une stabilité des pressions de coupe axiale et tangentielle. La pression de coupe radiale continue sa décroissance jusqu'à la profondeur de passe de 0.5mm puis elle se stabilise. En résumé, il est déconseillé de travailler aux faibles profondeurs de passe parce que l'arête de coupe subit des pressions énormes qui causent et accélèrent son endommagement.

La courbe de la figure IV.12 illustre l'évolution de l'effort de coupe résultant en fonction de la profondeur de passe. La variation de la profondeur de passe de 0.1 à 0.8mm conduit à une augmentation de l'effort résultant de 199.97%, cette augmentation est presque linéaire.

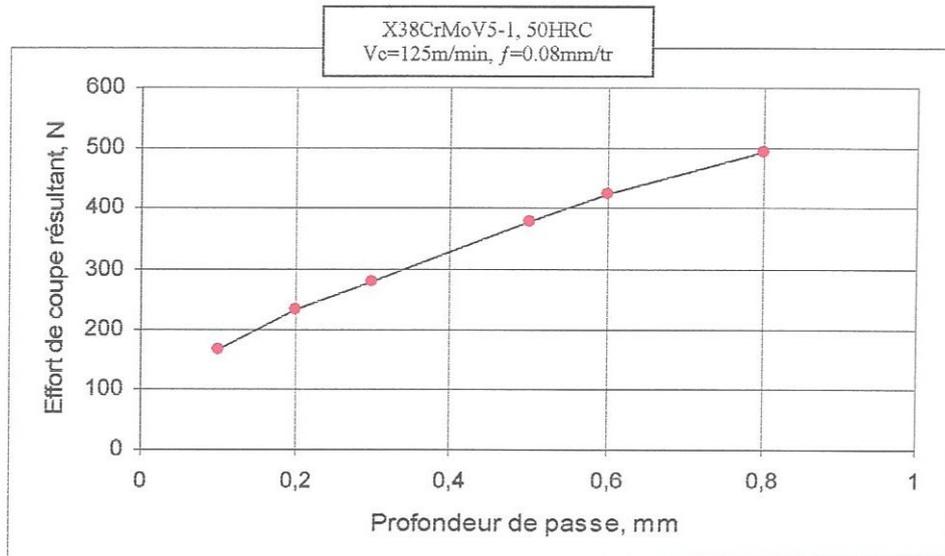


Fig. IV.12 Evolution de l'effort de coupe résultant en fonction de la profondeur de passe

IV.5 Evolution des rugosités

IV.5.1 Influence de l'avance

L'analyse de l'effet de l'avance sur la rugosité (figure IV.13), montre que ce paramètre a une influence très significative, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux résultat de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil pièce. Ces sillons sont autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée, d'où la nécessité d'employer de faibles avances lors du tournage de finition. 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 0.24mm/tr, fait accroître les critères de rugosité (Ra, Rz et Rt) respectivement de (432.54; 387 et 309.63) %. Il est à signaler que l'avance contribue largement à l'évolution de la rugosité.

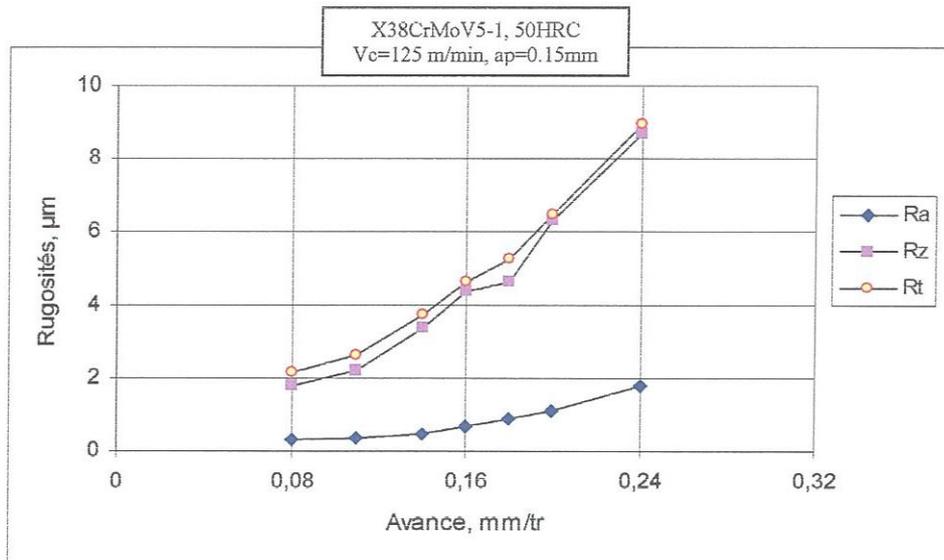


Fig. IV.13 Evolution de la rugosité en fonction de l'avance

IV.5.2 Influence de la vitesse de coupe

La figure IV.14 exprime l'évolution des critères de rugosité en fonction de la vitesse de coupe.

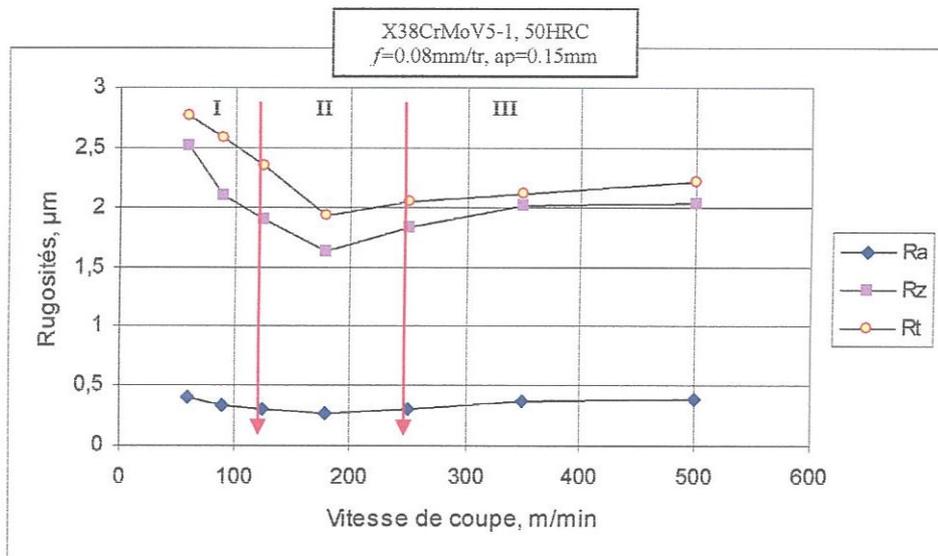


Fig. IV.14 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe

Dans la zone I, l'augmentation de la vitesse de coupe améliore la qualité de la surface usinée. Pour des vitesses allant de 60 à 125m/min, les critères de rugosité (Ra, Rz et Rt) chutent successivement de (27; 25 et 15) %. Dans la deuxième zone ($125 \leq V_c \leq 250$ m/min), la rugosité se stabilise légèrement à cause de la diminution des efforts de coupe traduisant une stabilité relative du système usinant. Dans la troisième

zone ($V_c > 250 \text{ m/min}$) les courbes relatives à la rugosité prennent des allures ascendantes à cause des vibrations liées aux grandes vitesses.

IV.5.3 Influence de la profondeur de passe

Le suivi de l'évolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe (figure IV.15), montre que ce paramètre a un effet très faible par rapport à celui de l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce. Celle-ci améliore les conditions d'évacuation de la chaleur de la zone de coupe et par conséquent elle freine le processus du mécanisme d'usure. Pour les profondeurs de passe de 0.05 à 0.6mm, on enregistre une augmentation de (R_z et R_t) respectivement de (9.96 et 16.45) %. Par contre la rugosité (R_a) reste pratiquement stable.

Ce constat nous permet, si on veut augmenter le débit de copeau, de recommander l'augmentation de la profondeur de passe au lieu de l'avance.

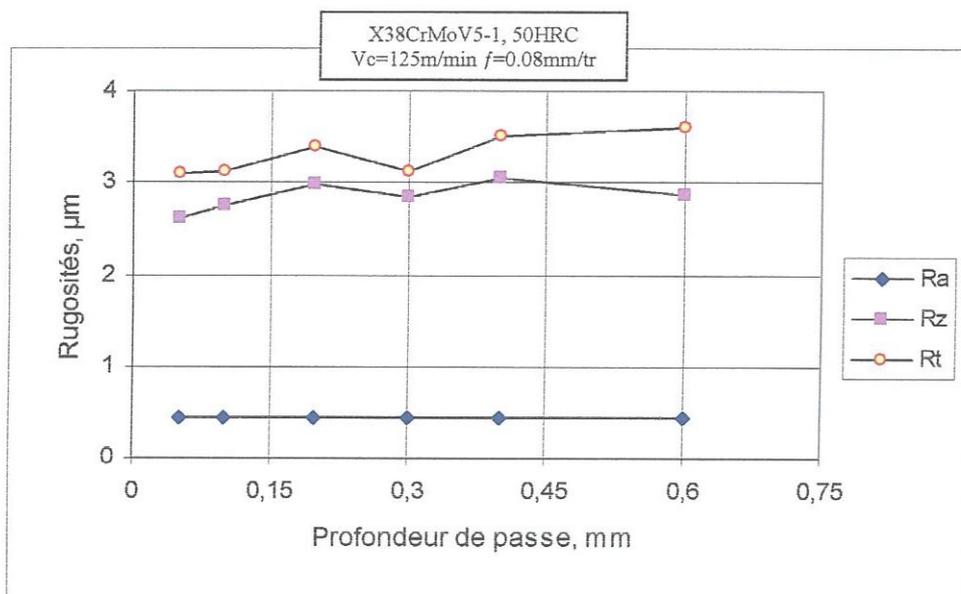


Fig. IV.15 Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe

IV.6 Evolution de la température dans la zone de coupe

IV.6.1 Influence de l'avance

La figure IV.16 montre l'évolution de la température dans la zone de coupe en fonction de l'avance $\theta = f(f)$ pour un temps d'usinage de 20 secondes ($t = 20 \text{ s}$). Avec l'augmentation de l'avance, la section du copeau augmente et par conséquent le frottement augmente, ce qui entraîne une augmentation de la température.

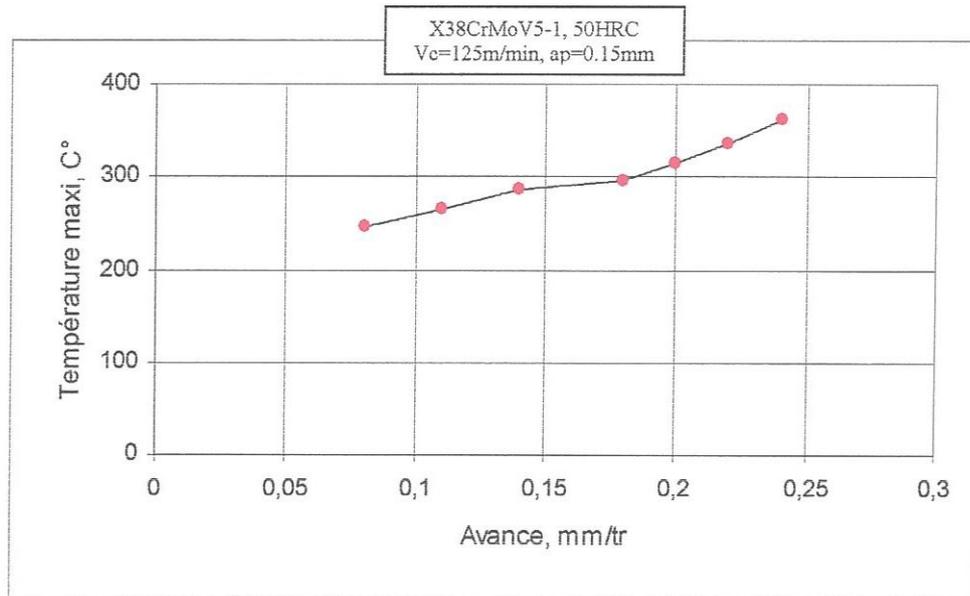


Fig. IV.16 Evolution de la température maximale en fonction de l'avance ($t=20s$)
 Pour une avance allant de (0.08 à 0.24) mm/tr, on enregistre des températures qui varient de (246 à 363) °C, ce qui représente une augmentation de 48%.

IV.6.2 Influence de la vitesse de coupe

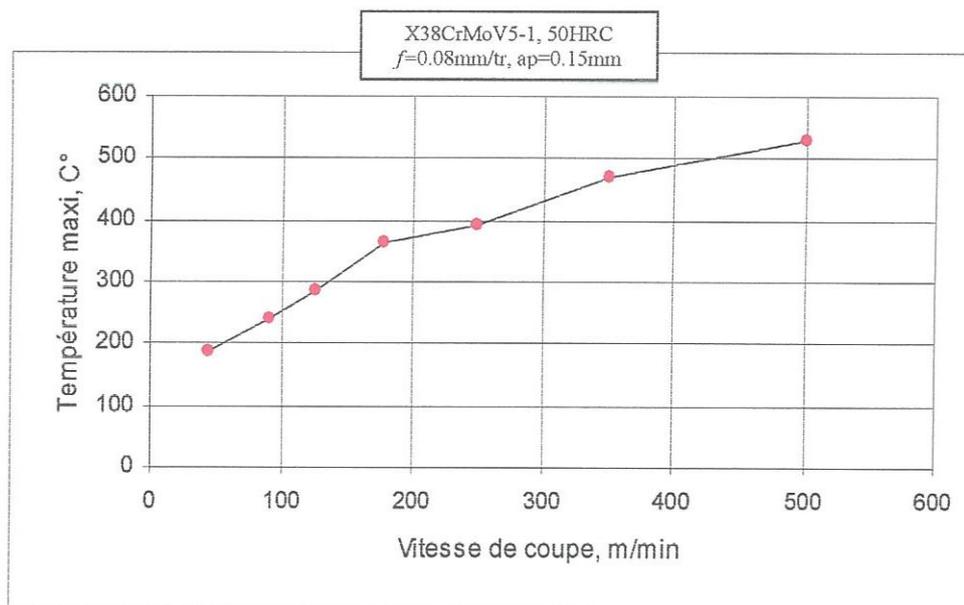


Fig. IV.17 Evolution de la température maximale en fonction de la vitesse de coupe
 ($t=20s$)

La figure IV.17 met en évidence l'effet de la vitesse de coupe sur la température maximale dans la zone de coupe $\theta=f(Vc)$ pour un temps d'usinage de 20s. Avec

l'accroissement de la vitesse de coupe, les frottements augmentent, ce qui induit une augmentation de la température dans la zone de coupe. A cet égard, la mesure de la température par pyromètre à infrarouge indique que pour une vitesse de 45m/min, la température maximale est 182°C. Pour une vitesse de coupe de 500m/min, on enregistre une augmentation de la température dans la zone de coupe de 182%.

IV.6.3 Influence de la profondeur de passe

La figure IV.18 montre l'évolution de la température maximale enregistrée dans la zone de coupe en fonction la profondeur de passe $\theta=f(ap)$ pour ($t=20s$).

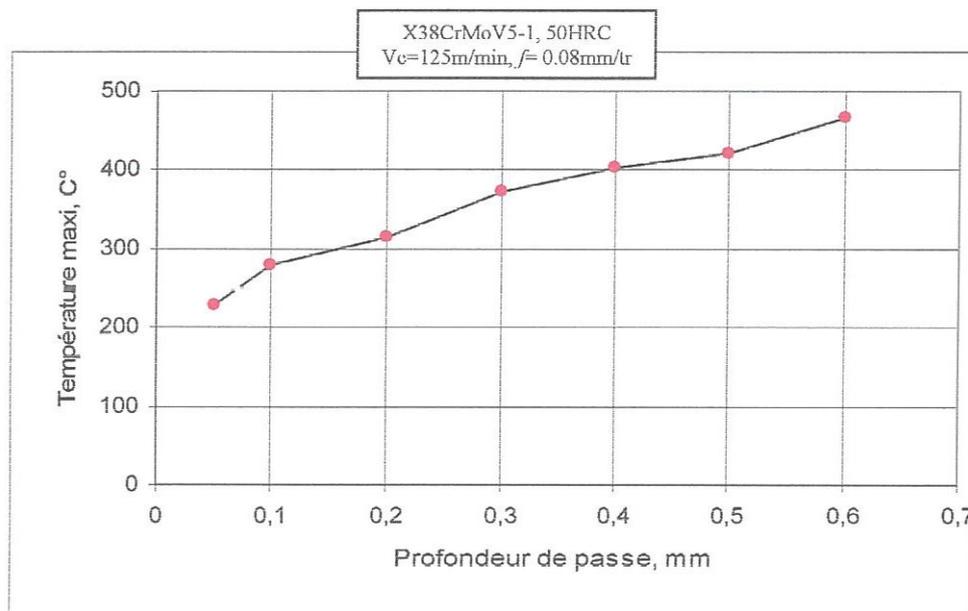


Fig. IV.18 Evolution de la température maximale en fonction de la profondeur de passe ($t=20s$)

Pour une profondeur de passe de 0.05mm, la température enregistrée est 229°C. Si la profondeur de passe augmente à 0.4mm, (soit 8 fois), la valeur de la température devient 404°C, (soit 1.76 fois), ce qui représente une augmentation de la température de 76.41%. Pour une profondeur de passe de 0.6mm, (soit 12 fois), la valeur de la température atteint 467°C, (soit 2.04 fois), on constate une augmentation de la température de 104%. Si la profondeur de passe augmente, la section du copeau augmente et le frottement copeau / outil augmente, ce qui conduit à une augmentation de la température.

IV.7 Conclusion

Les essais de chariotage relatifs au comportement de la céramique mixte (plaquette CC650) à la coupe nous ont permis d'étudier l'influence des conditions de coupe sur l'usure en dépouille, sur les efforts et pressions de coupe, sur la rugosité et sur la température dans la zone de coupe. Il est à noter que:

- le temps d'usinage et la vitesse de coupe ont un impact énorme sur l'usure en dépouille VB. Pour le régime de coupe ($V_c=120\text{m/min}$, $f=0.16\text{mm/tr}$ et $a_p=0.15\text{mm}$), la tenue de la céramique mixte CC650 est de 42 minutes alors que sa tenue se réduit à 22.5 minutes à $V_c=180\text{m/min}$, $f=0.16\text{mm/tr}$ et $a_p=0.15\text{mm}$. L'augmentation de la vitesse de coupe de 50% conduit à une diminution de la durée de vie de cet outil de l'ordre de 46.43%;
- la profondeur de passe affecte les efforts de coupe d'une manière considérable;
- la rugosité est très sensible à la variation de l'avance;
- la température est étroitement liée à la vitesse de coupe.

Cette étude confirme qu'en tournage dur à sec de cet acier et pour toutes les conditions de coupe testées, l'effort principal est l'effort radial et les rugosités trouvées sont proches de celles obtenues en rectification.

Chapitre V

Modèles mathématiques

V.1 Introduction

V.2 Modèles de l'effort de coupe en fonction des conditions de coupe

V.3 Modèles de la rugosité en fonction des conditions de coupe

V.4 Modèle de la durée de vie en fonction des conditions de coupe

V.5 Conclusion

V.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques des efforts de coupe, des rugosités et de la tenue de la plaquette CC650. Ces modèles permettent d'exprimer les relations entre les éléments du régime de coupe (f , V_c et a_p) et les paramètres technologiques étudiés.

V.2 Modèles de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe

Les valeurs des composantes de l'effort de coupe présentées dans le tableau V.1, ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan 3^3).

Facteurs							Paramètres		
Valeurs codifiées				Valeurs réelles			Composantes de l'effort de coupe		
N° Essais	X ₁	X ₂	X ₃	V _c (m/min)	f (mm/tr)	a _p (mm)	F _a (N)	F _r (N)	F _v (N)
1	-1	-1	-1	90	0.08	0.15	26.81	91.68	60.16
2	-1	-1	0	90	0.08	0.30	65.43	125.73	109.87
3	-1	-1	+1	90	0.08	0.45	129.97	185.70	170.42
4	-1	0	-1	90	0.12	0.15	58.99	153.09	118.03
5	-1	0	0	90	0.12	0.30	118.43	217.06	166.63
6	-1	0	+1	90	0.12	0.45	136.02	233.68	222.51
7	-1	+1	-1	90	0.16	0.15	65.46	171.77	147.86
8	-1	+1	0	90	0.16	0.30	105.91	186.16	170.60
9	-1	+1	+1	90	0.16	0.45	167.35	263.05	239.00
10	0	-1	-1	120	0.08	0.15	21.66	79.92	40.51
11	0	-1	0	120	0.08	0.30	45.14	112.91	84.12
12	0	-1	+1	120	0.08	0.45	97.45	138.10	123.98
13	0	0	-1	120	0.12	0.15	59.90	147.79	115.45
14	0	0	0	120	0.12	0.30	92.70	197.76	160.30
15	0	0	+1	120	0.12	0.45	114.55	202.91	195.72
16	0	+1	-1	120	0.16	0.15	56.46	161.51	143.50
17	0	+1	0	120	0.16	0.30	70.51	185.94	169.99
18	0	+1	+1	120	0.16	0.45	128.90	230.49	218.08
19	+1	-1	-1	180	0.08	0.15	32.80	70.23	35.67
20	+1	-1	0	180	0.08	0.30	42.34	100.33	83.67
21	+1	-1	+1	180	0.08	0.45	93.10	123.50	109.38
22	+1	0	-1	180	0.12	0.15	45.98	137.06	106.11
23	+1	0	0	180	0.12	0.30	80.00	164.82	152.99
24	+1	0	+1	180	0.12	0.45	92.14	194.87	189.38
25	+1	+1	-1	180	0.16	0.15	50.00	145.56	130.73
26	+1	+1	0	180	0.16	0.30	67.22	180.91	163.45
27	+1	+1	+1	180	0.16	0.45	105.97	208.31	197.10

Tableau V.1 Composantes de l'effort de coupe en fonction des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe

Analyse de régression : Fa en fonction de Vc; f; ap

L'équation de régression est:

$$Fa = 3.7 - 0.301 Vc + 365 f + 240 ap$$

$$R^2 = 85.6\%$$

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A (Vc, m/min)	2	4117.6	2058.8	161.22	0.000
B (f, mm/tr)	2	4782.1	2391.0	187.23	0.000
C (ap, mm)	2	23500.7	11750.4	920.12	0.000
AB	4	460.1	115.0	9.01	0.000
AC	4	1327.4	331.9	25.99	0.005
BC	4	1390.9	347.7	27.23	0.000
Erreur	8	102.2	12.8		
Total	26	35681.0			

Tableau V.2 Analyse de la variance ANOVA pour Fa

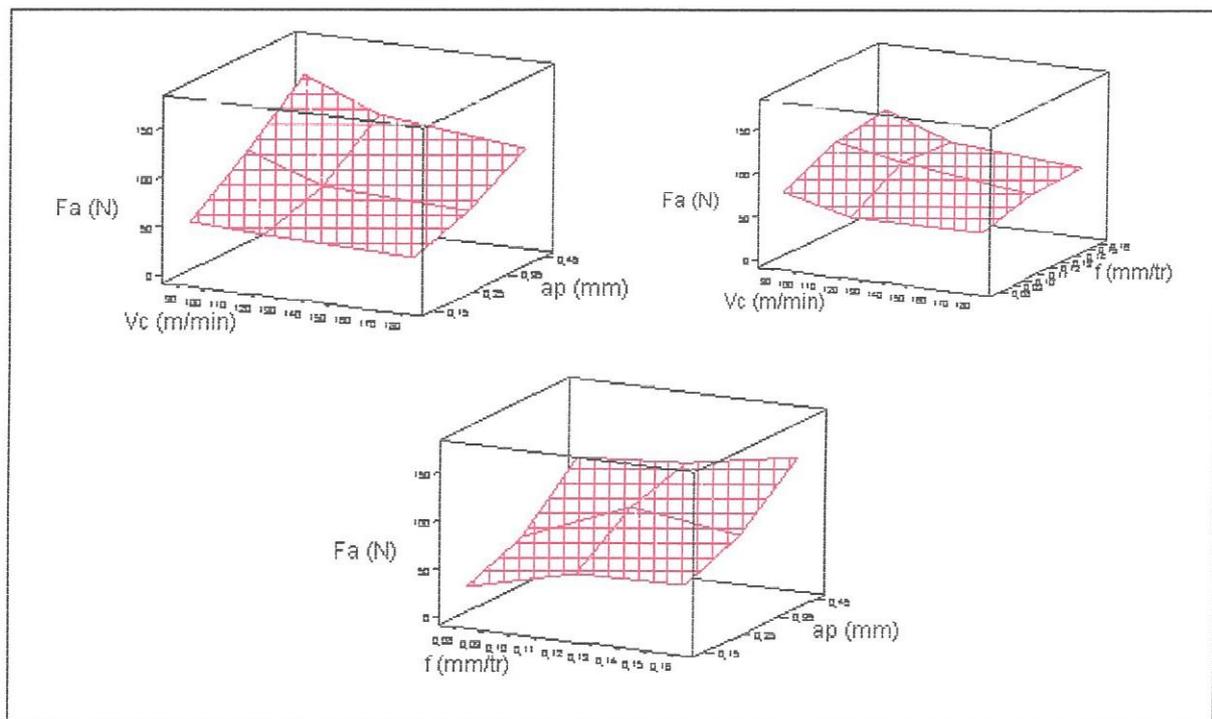


Fig. V.1 Evolution de l'effort axial Fa en fonction du régime de coupe

L'analyse détaillée des valeurs de l'effort axial présentées dans le tableau V.1 et des coefficients du tableau V.2 permet de classer les trois éléments du régime de coupe et leurs interactions par ordre d'influence sur l'effort axial Fa. La profondeur de passe vient en première position suivie de l'avance et de la vitesse de coupe. L'interaction

($ap-f$) a impact plus important que les interactions ($ap-Vc$) et ($f-Vc$). La figure V.1 illustre l'ordre d'influence de ces paramètres.

Analyse de régression : Fr en fonction de Vc ; f ; ap

L'équation de régression est:

$$Fr = 22.8 - 0.355 Vc + 980 f + 230 ap$$

$$R^2 = 86.6\%$$

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A (Vc , m/min)	2	5105.9	2553.0	29.40	0.000
B (f , mm/tr)	2	32985.4	16492.7	189.95	0.000
C (ap , mm)	2	21493.9	10746.9	123.77	0.000
AB	4	95.5	23.9	0.27	0.886
AC	4	1024.1	256.0	2.95	0.090
BC	4	838.6	209.6	2.41	0.134
Erreur	8	694.6	86.8		
Total	26				

Tableau V.3 Analyse de la variance ANOVA pour Fr

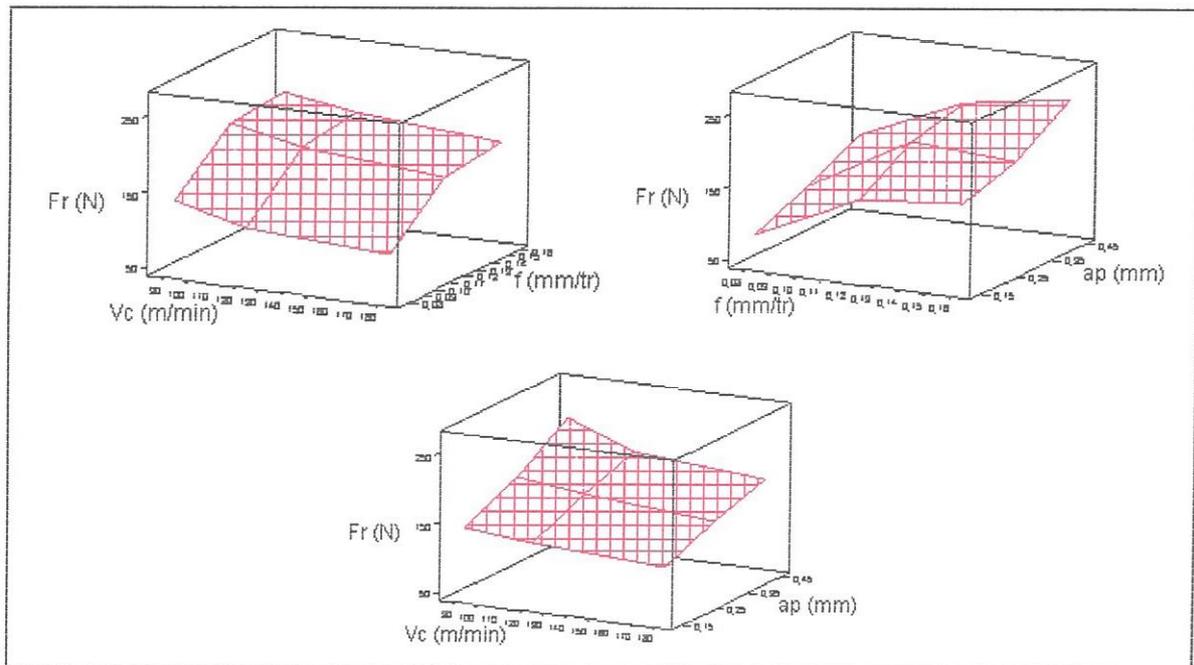


Fig. V.2 Evolution de l'effort radial Fr en fonction du régime de coupe

Les résultats présentés dans le tableau V.1 montrent que pour toutes les conditions de coupe testées, l'effort radial est l'effort principal. Selon le tableau V.3, les

paramètres (f , a_p et V_c) ont un impact significatif sur l'effort radial F_r alors que toutes leurs interactions ont un effet secondaire sur F_r .

Analyse de régression : F_v en fonction de V_c ; f ; a_p

L'équation de régression est:

$$F_v = - 35.3 - 0.272 V_c + 1059 f + 284 a_p$$

$$R^2 = 91.7\%$$

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A (V_c , m/min)	2	3201.4	1600.7	154.26	0.000
B (f , mm/tr)	2	36156.1	18078.0	1742.23	0.000
C (a_p , mm)	2	32759.8	16379.9	1578.58	0.000
AB	4	491.4	122.8	11.84	0.002
AC	4	900.6	225.1	21.70	0.000
BC	4	391.1	97.8	9.42	0.004
Erreur	8	83.0	10.4		
Total	26	73983.2			

Tableau V.4 Analyse de la variance ANOVA pour F_v

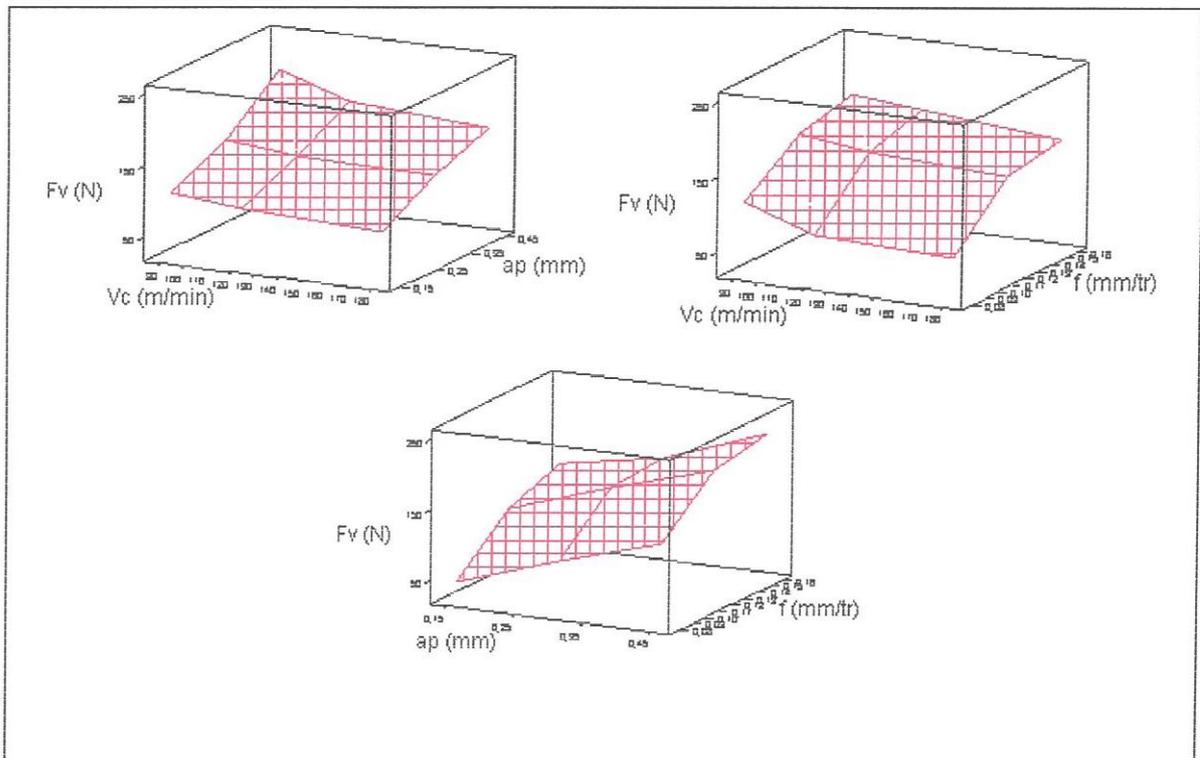


Fig. V.3 Evolution de l'effort tangentiel F_v en fonction du régime de coupe

Les valeurs de l'effort de coupe tangentiel F_v affichées dans le tableau V.1 et les constantes relatives du tableau V.4 indiquent que les trois paramètres de coupe (f , a_p et V_c) et leurs interactions affectent cet effort. La figure V.3 présente l'évolution de F_v en fonction de ces paramètres.

V.3 Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe

Les valeurs des critères de rugosité présentées dans le tableau V.5, ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan 3^3).

N° Essais	Facteurs						Paramètres		
	Valeurs codifiées			Valeurs réelles			Critères de la rugosité		
	X_1	X_2	X_3	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a (μm)	R_t (μm)	R_z (μm)
1	-1	-1	-1	90	0.08	0.15	0.64	3.50	2.30
2	-1	-1	0	90	0.08	0.30	0.64	3.80	2.50
3	-1	-1	+1	90	0.08	0.45	0.65	3.94	2.60
4	-1	0	-1	90	0.12	0.15	0.75	4.45	3.10
5	-1	0	0	90	0.12	0.30	0.74	4.60	3.20
6	-1	0	+1	90	0.12	0.45	0.73	4.80	3.30
7	-1	+1	-1	90	0.16	0.15	0.96	5.30	3.90
8	-1	+1	0	90	0.16	0.30	0.98	5.50	4.00
9	-1	+1	+1	90	0.16	0.45	0.97	5.50	4.10
10	0	-1	-1	120	0.08	0.15	0.35	3.32	2.19
11	0	-1	0	120	0.08	0.30	0.40	3.37	2.25
12	0	-1	+1	120	0.08	0.45	0.38	3.45	2.31
13	0	0	-1	120	0.12	0.15	0.50	3.87	2.96
14	0	0	0	120	0.12	0.30	0.51	3.88	3.00
15	0	0	+1	120	0.12	0.45	0.52	4.00	3.15
16	0	+1	-1	120	0.16	0.15	0.61	4.77	3.69
17	0	+1	0	120	0.16	0.30	0.60	4.78	3.71
18	0	+1	+1	120	0.16	0.45	0.59	4.83	3.84
19	+1	-1	-1	180	0.08	0.15	0.27	1.40	1.00
20	+1	-1	0	180	0.08	0.30	0.27	1.70	1.15
21	+1	-1	+1	180	0.08	0.45	0.28	1.95	1.31
22	+1	0	-1	180	0.12	0.15	0.46	2.80	2.00
23	+1	0	0	180	0.12	0.30	0.46	2.90	2.20
24	+1	0	+1	180	0.12	0.45	0.47	3.21	2.23
25	+1	+1	-1	180	0.16	0.15	0.55	3.74	3.48
26	+1	+1	0	180	0.16	0.30	0.56	3.87	3.51
27	+1	+1	+1	180	0.16	0.45	0.56	3.98	3.56

Tableau V.5 Critères de la rugosité en fonction des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe

Les valeurs de la rugosité R_a du tableau V.5 et les constantes du V.6 montrent que l'impact des paramètres (f et V_c) et leur interaction ($f-V_c$) sur R_a sont considérables

alors que la profondeur de passe et les autres interactions ont un effet secondaire sur Ra. La figure V.4 confirme cette analyse.

Analyse de régression : Ra en fonction de Vc; f; ap

L'équation de régression est:

$$Ra = 0.604 - 0.00352 Vc + 3.47 f + 0.022 ap$$

$$R^2 = 80.8\%$$

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A (Vc, m/min)	2	0.637363	0.318681	1840.51	0.000
B (f, mm/tr)	2	0.347230	0.173615	1002.70	0.000
C (ap, mm)	2	0.000319	0.000159	0.92	0.437
AB	4	0.022570	0.005643	32.59	0.000
AC	4	0.000281	0.000070	0.41	0.799
BC	4	0.000348	0.000087	0.50	0.736
Erreur	8	0.001385	0.000173		
Total	26	1.009496			

Tableau V.6 Analyse de la variance ANOVA pour Ra

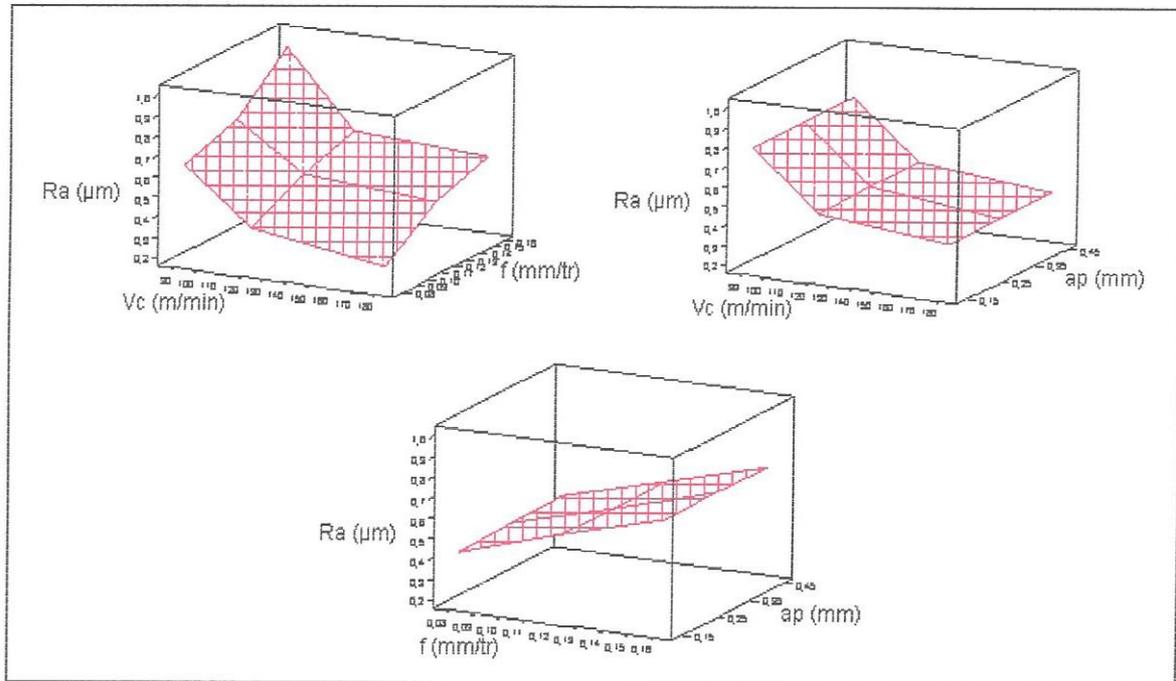


Fig. V.4 Evolution de la rugosité Ra en fonction du régime de coupe

Analyse de régression : R_t en fonction de V_c ; f ; a_p

L'équation de régression est:

$$R_t = 3.45 - 0.0196 V_c + 22.0 f + 0.930 a_p$$

$$R^2 = 97.5\%$$

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A (V_c , m/min)	2	14.5199	7.2600	5882.05	0.000
B (f , mm/tr)	2	13.9411	6.9705	5647.56	0.000
C (a_p , mm)	2	0.3500	0.1750	141.79	0.000
AB	4	0.5876	0.1469	119.02	0.000
AC	4	0.0786	0.0197	15.93	0.001
BC	4	0.0439	0.0110	8.90	0.005
Erreur	8	0.0099	0.0012		
Total	26	29.5311			

Tableau V.7 Analyse de la variance ANOVA pour R_t

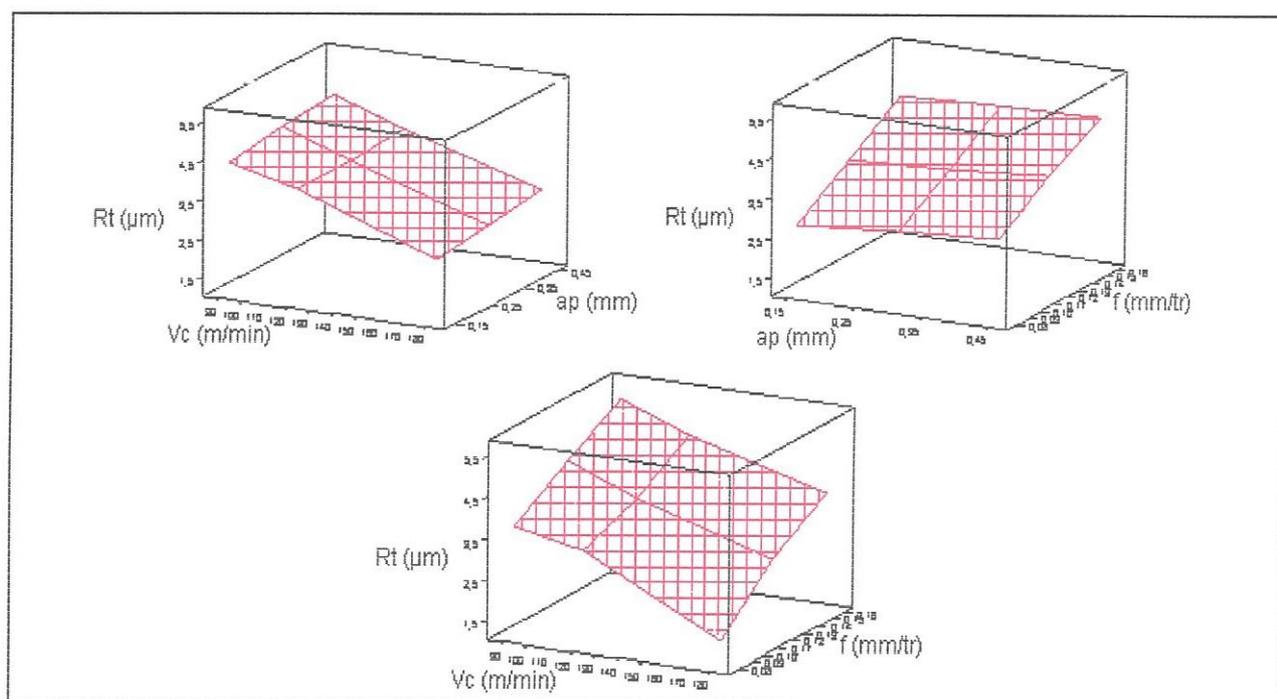


Fig. V.5 Evolution de la rugosité R_t en fonction du régime de coupe

Les valeurs de la rugosité totale R_t trouvées dans le tableau V.5 et les constantes du tableau V.7 indiquent que les variables de coupe (f , V_c et a_p) et leurs interactions ont un effet sur R_t . La figure V.5 illustre l'évolution de R_t en fonction des paramètres cités. La connaissance de ces modèles mathématiques permet d'optimiser le processus de coupe [17-21].

Analyse de régression : Rz en fonction de Vc; f; ap

L'équation de régression est:

$$Rz = 1.35 - 0.0108 Vc + 22.5 f + 0.659 ap$$

$$R^2 = 95.5\%$$

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A (Vc, m/min)	2	4.4903	2.2452	1181.09	0.000
B (f, mm/tr)	2	14.5673	7.2836	3831.62	0.000
C (ap, mm)	2	0.1760	0.0880	46.30	0.000
AB	4	0.7761	0.1940	102.07	0.000
AC	4	0.0093	0.0023	1.22	0.373
BC	4	0.0093	0.0023	1.22	0.375
Erreur	8	0.0152	0.0019		
Total	26	20.0435			

Tableau V.8 Analyse de la variance ANOVA pour Rz

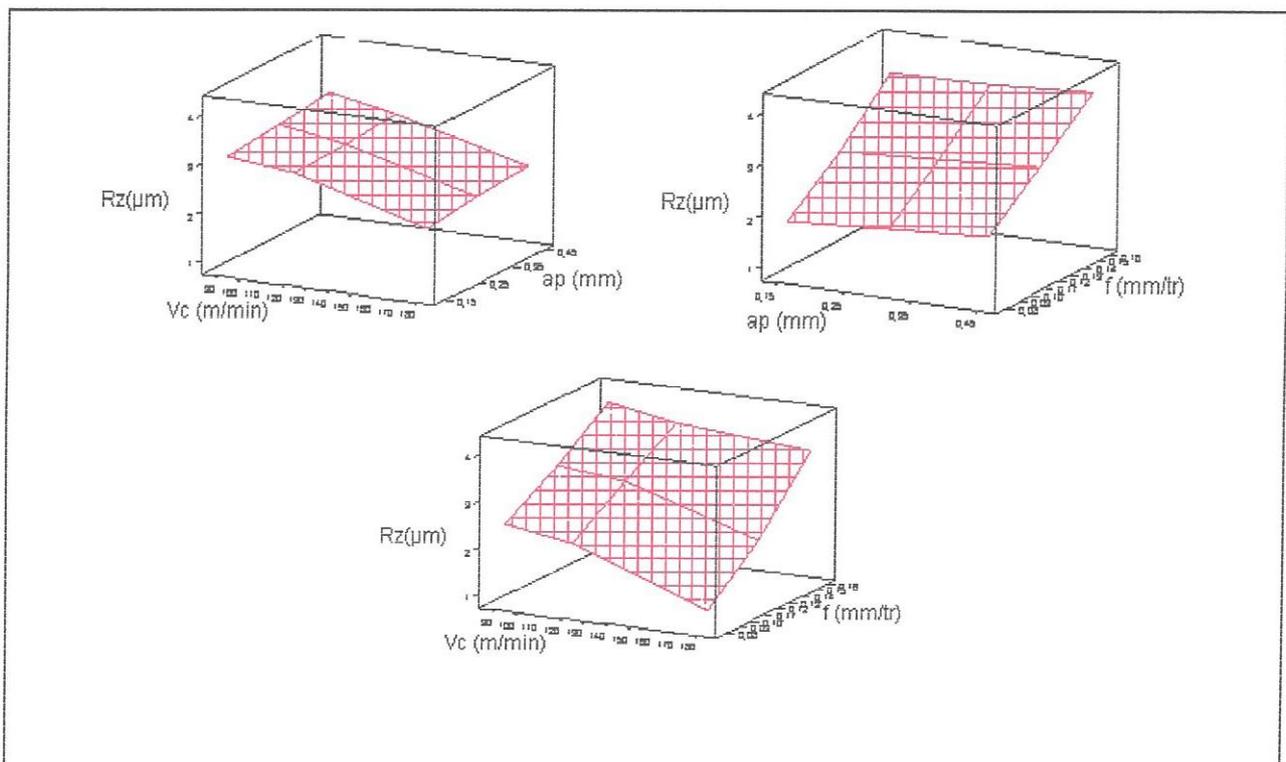


Fig. V.6 Evolution de la rugosité Rz en fonction du régime de coupe

Les coefficients du tableau V.8 relatifs à Rz précisent que l'avance a un effet énorme sur ce critère de rugosité. Les interactions (Vc-ap et f-ap) ont un effet secondaire sur Rz. La figure V.6 met en évidence l'évolution de Rz.

V.4 Modèle de la durée de vie T en fonction des paramètres de coupe

Facteurs					Paramètre
Valeurs codifiées			Valeurs réelles		Durée de vie
N° Essais	X ₁	X ₂	V _c (m/min)	f (mm/tr)	T (min)
1	-1	-1	120	0.08	49.00
2	-1	+1	120	0.16	42.00
3	+1	-1	180	0.08	26.00
4	+1	+1	180	0.16	22.50

Tableau V.9 Durées de vie de la plaquette CC650 pour [VB]=0.3mm et ap=0.15mm

Analyse de régression : T en fonction de V_c; f

L'équation de régression est:

$$T = 95.9 - 0.354 V_c - 65.6 f$$

$$R^2 = 99.4\%$$

Les résultats affichés dans le tableau V.9 montrent qu'à la vitesse de coupe de 120m/min et lorsque l'avance passe de (0.08 à 0.16) mm/tr, la durée de vie de cet outil ne diminue que de 14.286%. Tandis que cette dernière diminue de 47% à une avance de 0.08mm/tr et pour une augmentation de la vitesse de coupe de 50% (de 120 à 180 m/min). A une avance de 0.16mm/tr et lorsque la vitesse de coupe varie de (120 à 180) m/min, la tenue de l'outil diminue de 46.43%. Cette analyse confirme que l'influence de la vitesse de coupe sur la durée de vie de l'outil est plus importante que celle de l'avance. La figure V.7 montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la tenue de l'outil diminue.

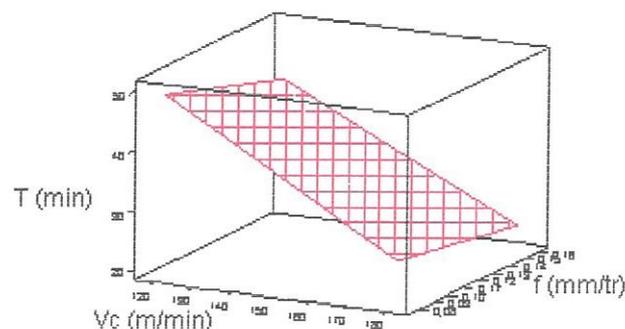


Fig. V.7 Durée de vie T de la céramique CC650 en fonction du régime de coupe

V.5 Conclusion

La détermination des coefficients de corrélation et des constantes des modèles mathématiques déduits permet de définir le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les efforts de coupe, la rugosité des surfaces usinées et la tenue de l'outil. La connaissance de ces modèles représente un intérêt économique et industriel très importants car elle précise les plages des conditions d'usinage pour optimiser le processus de coupe et faire les prédictions qui lui sont primordiales.

Conclusion générale

L'étude de l'évaluation des performances des matériaux de coupe utilisés tels que les carbures non revêtus H13A, les carbures revêtus GC3015, les cermets non revêtus CT5015, les cermets revêtus GC1525, les céramiques mixtes (noires) CC650 et les céramiques composites « Whiskers » (vertes) CC670 en tournage dur à sec de l'acier X38CrMoV5-1, traité à 50HRC, nous a permis d'une part, de mettre en évidence l'impact des conditions de coupe (avance par tour, vitesse de coupe, profondeur de passe et temps d'usinage) sur l'usure en dépouille, sur les efforts de coupe et sur la rugosité des surfaces usinées.

Ainsi les durées de vie et les domaines de performances de chaque outil ont été définis.

Il est à signaler que pour toutes les conditions de coupe testées, la céramique mixte comparée aux outils utilisés, est la plus performante.

D'autre part, ce travail a traité l'effet des conditions de coupe sur le comportement de la céramique mixte.

Les résultats obtenus ont abouti à la détermination des modèles mathématiques. Ces derniers ont montré le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe et ont donné les valeurs des constantes et des coefficients de corrélation.

Cette étude a mis en valeur les procédures expérimentales retenues pour déterminer les marges de conditions de coupe adéquates afin d'optimiser le processus de coupe relatif à cet acier.

A présent, la technique du tournage dur à sec est rentrée dans les mœurs grâce aux performances croissantes des matériaux de coupe. Elle a de l'avenir devant elle parce qu'elle est écologique : elle protège l'environnement et préserve la faune et la flore. Ce qui représente une action civique vis-à-vis des générations futures.

Les matériaux de coupe connaîtront certainement de nouveaux développements et ce qui nous paraît très difficile à usiner maintenant sera bientôt dans le domaine de l'usinage conventionnel.

Références bibliographiques

- [1] **M. REMADNA**, Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, Juin 2001.
- [2] **G. POULACHON**, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, Déc.1999.
- [3] **J. VIGNEAU**, Les outils de coupe en céramique : utilisation actuelle et perspectives, Mat-Méc-Elec, N°421, 1987.
- [4] **G. BRANDT**, Développement des outils de coupe en céramique, Matériaux et Techniques, N°9-10, pp3-12, 1997.
- [5] **G. POULACHON**, Usinabilité des matériaux difficiles, Techniques de l'ingénieur, BM 7 048 pp1-18, 2004.
- [6] **M. HABAK**, Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6. Thèse de doctorat, ENSAM d'Angers, Déc.2006.
- [7] **O. BARRAU**, Etude de frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. Thèse de doctorat, INP de Toulouse, Déc.2004.
- [8] **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, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 139-144.
- [9] **S. BISSEY**, Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités thermiquement. Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, Avril 2005.
- [10] **L. QIAN, M. ROBIUL HOSSAN**, Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts, Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 274–278.

- [11] **W. CHEN**, Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 455-466.
- [12] **L. BOULANOUAR, M. A. YALLESE, K. CHAOUI et S. DOMINIAK**, Etude comparative sur le comportement à l'usure des outils céramique et CBN lors du tournage dur d'un acier à roulement, *JM'EMP05*, 2006.
- [13] **M. A. YALLESE**, Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur. Thèse de doctorat, Université BADJI Mokhtar de Annaba, 2005.
- [14] Site internet : [http : //www. buderus-steel.com](http://www.buderus-steel.com)
- [15] Site internet : [http : //www. premium-stahl.de/1.2343ESU](http://www.premium-stahl.de/1.2343ESU)
- [16] SANDVIK Coromant, Catalogue Général : Tournage – Fraisage – Perçage – Alésage - Attachements, 2007.
- [17] **T. OZEL, Y. KARPAT, L. FIGUEIRA, J. PAULO DAVIM**, Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts, *Journal of Materials Processing Technology* 189 (2007) 192-198.
- [18] **J. PAULO DAVIM, L. FIGUEIRA**, Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques, *Journal of Materials and Design* 28 (2007) 1186-1191.
- [19] **M. A. YALLESE, J. F. RIGAL, K. CHAOUI et L. BOULANOUAR**, The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60HRC), *Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the ImechE part B*, Vol. 219, (2005), pp. 35-55.
- [20] **B. FNIDES, H. AOUICI, M. A. YALLESE**, Rugosité de surface et température en tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 usiné par une céramique mixte (Al_2O_3+TiC), 2^{ème} Congrès National de Mécanique, Constantine, 07-08 Avril 2008, F37.
- [21] **B. FNIDES, H. AOUICI, M. A. YALLESE**, Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic. – *Mechanika. – Kaunas: Technologija*, 2008, No. 2(70) p. 73-78.

Annexes

Communications et publications

1 Communications

Au 2^{ème} Congrès National de Mécanique qui s'est tenu les 07 et 08 Avril 2008 à Constantine, nous avons participé par la communication orale suivante: **Rugosité de surface et température en tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 usiné par une céramique mixte (Al₂O₃+TiC).**

Auteurs: B. Fnides, H. Aouici et M. A. Yallese

2 Publications

L'article intitulé: **Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic**, a été publié dans la revue "MECHANIKA" ISSN 1392-1207, 2008, No. 2(70) pp. 73-78.

Auteurs: B. Fnides, H. Aouici et M. A. Yallese

EDITORIAL BOARD:

Chief Editor

Dr.habil. MYKOLAS DAUNYS, *Mechanical Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania)

or

Dr.habil. JONAS SAPRAGONAS, *Mechanical Engineering and Transportation Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania)

Scientific Secretary

Dr. Prof. Dr. VIDMANTAS NENORTA, *Mechanical Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania)

Members of Editorial Board

Dr.habil. B.BAKŠYS, *Mechanical Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania),

Dr.habil. R.BANSEVIČIUS, *Mechanical Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania),

Dr. Ž.BAZARAS, *Mechanical Engineering and Transportation Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania),

Dr.Sc. I.BLECHMAN, *Mechanical Engineering* (Institute Problems of Mechanical Engineering of Russian Academy of Science, Russia),

Dr.habil. J.DULEVIČIUS, *Mechanical Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania),

J.DUHOVNIK, *Mechanical Engineering* (University of Ljubljana, Slovenia),

Dr.habil. A.FEDARAVIČIUS, *Mechanical Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania),

Dr.habil. G.HOEHNE, *Mechanical Engineering* (Ilmenau Technical University, Germany),

Dr.habil. R.JONUŠAS, *Mechanical Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania),

H.FUJII, *Mechanical Engineering* (Gifu University, Japan),

Dr.habil. R.KAČIANAUSKAS, *Mechanical Engineering and Informatics Engineering* (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania),

R.KAŠUBA, *Mechanical Engineering* (Northern Illinois University, USA),

J.KNIGHT, *Mechanical Engineering* (De Montfort University, UK),

Dr.habil. A.KUDZYS, *Mechanical Engineering* (Institute of Architecture and Construction, Lithuania),

Dr.habil. M.MARIŪNAS, *Mechanical Engineering* (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania),

Dr.habil. E.MACHA, *Mechanical Engineering* (Technical University of Opole, Poland),

Dr.Sc. N.MACHUTOV, *Mechanical Engineering* (Institute of Machine Science of Russian Academy of Science, Russia),

Dr.habil. V.OSTAŠEVIČIUS, *Mechanical Engineering and Transportation Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania),

PAULO M.S. TAVARES DE CASTRO, *Mechanical Engineering* (University of Porto, Portugal),

A.PREUMONT, *Mechanical Engineering* (Free University of Brussels, Belgium),

Dr.habil. K.RAGULSKIS, *Mechanical Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania),

A.ROVETTA, *Mechanical Engineering* (Politechnika of Milano, Italy),

R.F.SALANT, *Mechanical Engineering* (Georgia Institute of Technology, USA),

Dr.Sc. V.TROSHCHENKO, *Mechanical Engineering* (G.S. Pisarenko Institute of Problems of Strength, Ukraine),

R.VAIČAITIS, *Mechanical Engineering* (Columbia University, USA),

Dr.habil. V.VOLKOVAS, *Mechanical Engineering and Measurement Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania),

Dr.habil. A.ŽILIUKAS, *Mechanical Engineering and Transportation Engineering* (Kaunas University of Technology, Lithuania)

The journal is publishing scientific papers dealing with the following problems:

mechanics of solid bodies;

mechanics of fluids and gases;

dynamics of mechanical systems;

design and optimization of mechanical systems;

mechanical technologies.

The journal material is referred in databases: 1. Institute for Scientific Information (ISI Master Journal List)

<http://scientific.thomson.com>;

2. Elsevier Databases (Compendex, Fluidex, Scopus) <http://www.ei.org>;

3. Institution of Electrical Engineers (INSPEC) <http://www.iee.org.uk>;

4. Cambridge Scientific Abstracts Databases (CSA) <http://www.csa.com>;

5. Publishing Incorporation Databases (EBSCO) <http://www.epnet.com>;

6. All-Russian Institute of Scientific and Technical Information (VINITI) <http://www.viniti.ru>;

7. British Library Bibliographic Database <http://www.bl.uk>.

Address: Kaunas University of Technology, Kęstučio str. 27, 44312 Kaunas, Lithuania

Materials of the journal are available at internet <http://internet.ktu.lt/en/index3.html>.

Published since 1995.

Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic

B. Fnides, H. Aouici, M. A. Yallese

Laboratoire Mécanique et Structures (LMS), Université de Guelma 24000, Algérie, E-mail: fbrahim@yahoo.fr

Nomenclature

a_p	Depth of cut, mm.
f	Feed rate, mm/rev.
F	Resulting cutting force, N.
F_a	Feed force, N.
F_r	Thrust force, N.
F_v	Tangential cutting force, N.
HRC	Rockwell hardness.
R^2	Coefficient of determination.
R_a	Arithmetic mean roughness, μm .
R_t	Total roughness, μm .
R_z	Mean depth of roughness, μm .
r_e	Tool nose radius, mm.
VB	Flank wear, mm.
V_c	Cutting speed, m/min.
α	Relief angle, degree.
γ	Rake angle, degree.
λ	Inclination angle, degree.
χ	Major cutting edge angle, degree.

1. Introduction

Cutting forces and surface roughness are classified among the most important technological parameters in machining process.

Cutting forces are the background for the evaluation of the necessary power machining (choice of the electric motor). They are also used for dimensioning of machine tool components and the tool body. They influence the deformation of the workpiece machined, its dimensional accuracy, chip formation and machining system stability.

During cutting process, the workpiece acts on the tool with a certain force " F " whose decomposition in three privileged directions can be used as a basis for the definition of cutting forces [1-4].

Surface roughness is in relation to many properties of machine elements such as wear resistance, the capacity of fit and sealing [5]. Theoretical surface roughness achievable based on tool geometry and feed rate is given approximately by the formula: $R_a = 0.032f^2/r_e$.

2. Experimental procedure

The material used for experiments is X38CrMoV5-1, hot work steel which is popularly used in hot form pressing. Its resistance to high temperature and its aptitude for polishing enable it to answer the most severe requests in hot dieing and moulds under pressure [6 and 7]. Its chemical composition is given in Table 1.

Table1- Chemical composition of X38CrMoV5-1

Composition	(wt. %)
C	0.35
Cr	5.26
Mo	1.19
V	0.5
Si	1.01
Mn	0.32
S	0.002
P	0.016
Other components	1.042
Fe	90.31

The workpiece is of 400mm length and 75mm in diameter. It is hardened to 50HRC (quenching at 1020°C followed by oil tempering at 250°C). Its hardness was measured by a digital durometer DM2D. The lathe used for machining operations is TOS TRENCIN; model SN40C, spindle power 6.6KW. The cutting insert used is a mixed ceramic (CC650), removable, of square form having designation SNGN 120408 T01020. For three components measurement of cutting forces (F_a , F_v and F_r), we used a dynamometer KISTLER model 9257 B as shown in Fig. 1.

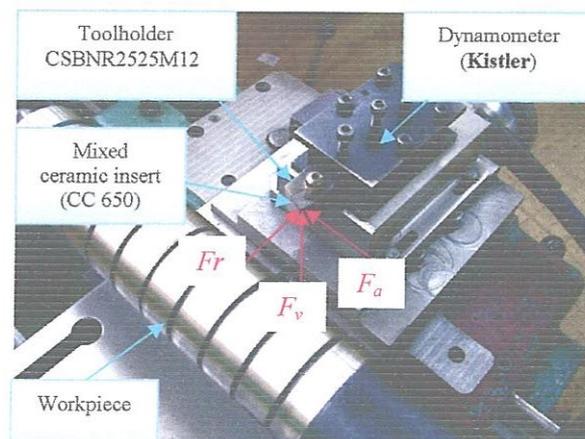


Fig. 1 Experimental configuration for measuring the components of cutting force

The toolholder adapted is of designation CSBNR2525M12 with the geometry of active part characterized by the following angles: $\chi = 75^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\gamma = -6^\circ$; $\lambda = -6^\circ$ [8]. A roughness meter (2d) Surftest 301 Mitutoyo was selected to measure different criteria of surface roughness (Ra , Rz and Rt).

3. Experimental results and discussion

3.1. Effect of feed rate on cutting forces

The results presented on Fig. 2 show the evolution of the cutting forces according to the feed rate. If the feed rate increases, the section of sheared chip increases because the metal resists the rupture more and requires larger efforts for chip removal. It is noticed that the thrust force is dominating compared to both others and that for all the feed rates tested. The effects of the feed rate on the cutting forces are as follows: the increase in the feed rate from 0.08 to 0.24mm/rev increases the components of the cutting forces (F_r , F_v and F_a) successively of (48.53 %; 188.7% and 124%). It is noted that the tangential cutting force is very affected by the feed rate, follow-up of the feed force and lastly of the thrust force.

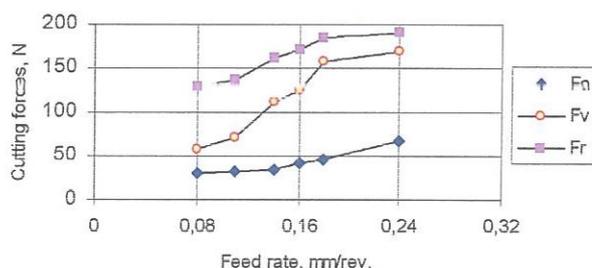


Fig.2 Cutting forces vs. feed rate at $V_c=125\text{m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$

3.2. Effect of cutting speed on cutting forces

Fig. 3 shows that an increase in cutting speed generally leads to a reduction in the components of cutting forces.

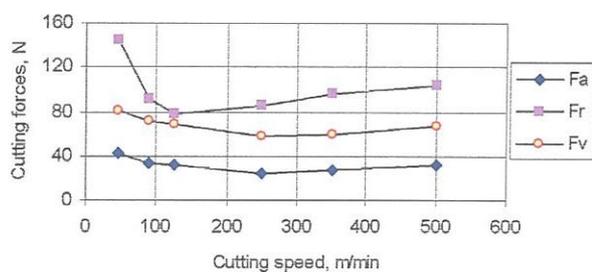


Fig.3 Cutting forces vs. cutting speed at $f=0.08\text{mm/rev}$; $a_p=0.15\text{mm}$

This is due to the rise in the temperature in the cutting zone which makes the metal machined more plastic and consequently the efforts necessary for machining decrease. By examining the shape of the three curves, we record a very clear decrease of the thrust force until the speed of 125m/min, beyond this limit, it stabilizes and

takes again slightly an ascending pace. On the other hand the feed force and tangential cutting force decrease until the speed of 250m/min, beyond this limit, they are stabilized slightly. It is noted that the maximum values of the cutting forces (F_a , F_r and F_v) are respectively (42.28; 81.47 and 144.53) N. They were recorded at the speed of 45m/min.

3.3. Effect of depth of cut on cutting forces

The results obtained (Fig. 4) illustrate the evolution of cutting forces according to the depth of cut. With its increase, chip thickness becomes significant what causes the growth of the volume of deformed metal and that requires enormous cutting forces to cut the chip. For the cut depth of (0.1 to 0.8) mm, we successively record an increase in the components of the cutting forces (F_r , F_v and F_a) from (84%; 481% and 528%).

According to these results, the feed force is the most sensitive to the cutting depth increase, follow-up of the tangential cutting force and lastly of the thrust force. It is to be concluded that from the cutting parameters (f , V_c and a_p), the depth of cut affects the cutting forces in a considerable way.

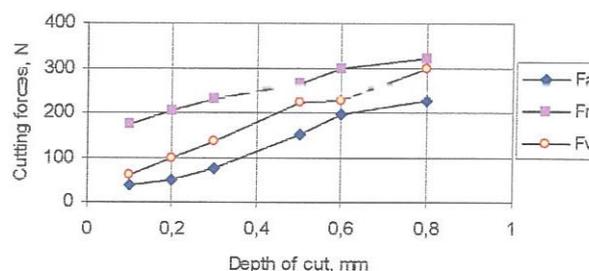


Fig.4 Cutting forces vs. depth of cut at $V_c=125\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/rev}$

3.4. Effect of feed rate on surface roughness

The analysis of the effect of feed rate on surface roughness (Fig. 5) shows that this parameter has a very significant influence, because its increase generates helicoid furrows the result tool shape and helicoid movement tool-workpiece. These furrows are deeper and broader as the feed rate increases. For this reason, we must employ weak feed rate during turning.

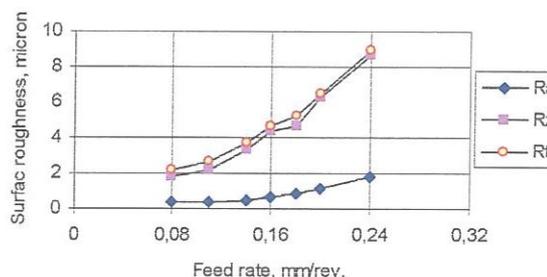


Fig.5 Surface roughness vs. feed rate at $V_c=125\text{ m/min}$; $a_p=0.15\text{mm}$

In practice, the consequences of the influence of the feed rate on surface roughness are as follows: the

increase in the feed rate from 0.08 to 0.24mm/rev makes respectively increase the criteria of roughness (Ra , Rz and Rt) from (432.54%; 387% and 309.63%). It is to be concluded that the feed rate contributes largely to the evolution of surface roughness.

3.5. Effect of cutting speed on surface roughness

Fig. 6 expresses the evolution of surface roughness criteria versus cutting speed. The increase in cutting speed improves the machined surface quality. For the speed from 60 to 125m/min, the criteria of surface roughness (Ra , Rz and Rt) fall successively of (27%, 25% and 15%). When the speed is between 125 and 350m/min, surface roughness is stabilized slightly because of the reduction in cutting forces stabilizing the machining system. If the speed is higher than 350m/min, the curves related to surface roughness take ascending forms because of the vibrations related to high speeds.

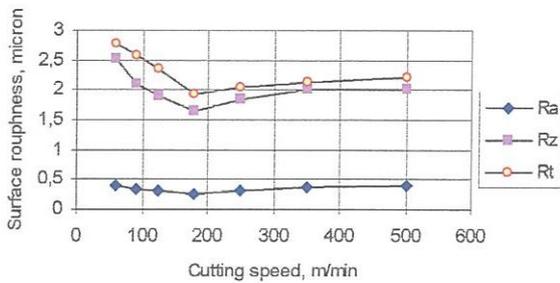


Fig.6 Surface roughness vs. cutting speed at $f=0.08\text{mm/rev}$; $ap=0.15\text{mm}$

3.6. Cutting depth effect on surface roughness

Evolution of surface roughness according to the depth of cut (Fig. 7) shows that this parameter has a very weak effect compared to that of the feed rate. This is due to the increased length of contact between the tool and the workpiece. This improves the conditions of heat flow from the cutting zone and consequently slows down the process wear. For the depths of cut from 0.05 to 0.6mm, we record an increase in (Rz and Rt) respectively of (9.96% and 16.45%). On the other hand roughness (Ra) remains practically stable.

This enables to conclude that, if we want to increase the removed amount of chip, it is recommended the increase depth of cut instead of the feed rate.

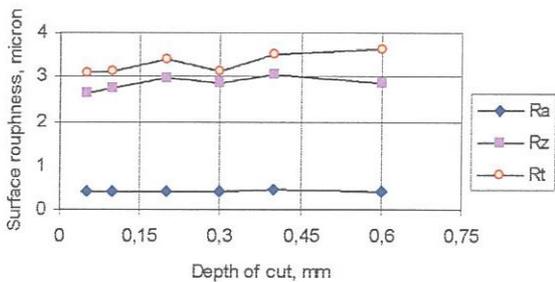


Fig.7 Surface roughness vs. depth of cut at $Vc=125\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/rev}$

3.7. Effect of flank wear on cutting forces

Fig. 8 shows the evolution of cutting forces according to flank wear (VB). Shape analysis of the curves shows that the cutting forces are not stable during machining but they evolve according to the flank wear. Three parts are seen in the evolution of the cutting forces. The first in the part where the flank wear reaches the value of 0.2mm, the increase in cutting forces (Fa , Fr and Fv) is 84.94%; 183.87% and 35.95%. The second is characterized by a light stability, the value of wear reaches 0.28mm, which generates an increase in the cutting forces, in 35.85%; 23.83% and 2.75%. The last in the part where the flank wear reaches the value of 0.44mm, a total rise in the cutting forces of 448.28%; 621% and 107.11% was recorded. The major cutting force is the thrust force. This synthesis confirms that the increase in cutting forces is in direct connection with the degradation of cutting edge of the tool.

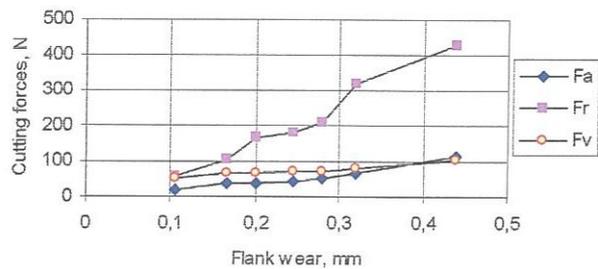


Fig.8 Cutting forces vs. flank wear at $Vc=125\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/rev}$; $ap=0.15\text{mm}$

3.8. Effect of flank wear on surface roughness

Fig. 9 presents the effect of flank wear (VB) on surface roughness. On the experimental plan, for a flank wear of 0.105mm, the values of roughness criteria (Ra , Rz and Rt) are respectively (0.32; 2.15 and 2.78) μm . For the wear of 0.20mm, the increase in roughness criteria is (81.25%; 59.07% and 28.42%). When the flank wear reaches 0.44mm, the increase in roughness criteria is significant (197%; 179% and 132%).

Surface roughness is proportional and closely related to the flank wear.

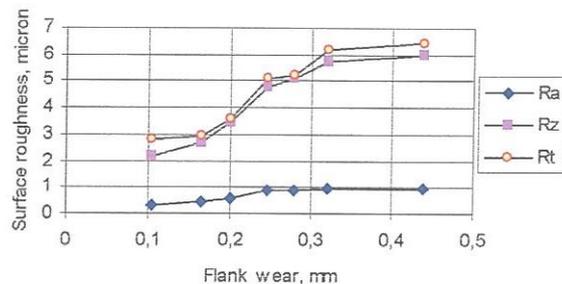


Fig.9 Surface roughness vs. flank wear at $Vc=125\text{m/min}$; $f=0.08\text{mm/rev}$; $ap=0.15\text{mm}$

4. Mathematical models

Table 2 presents the results of cutting force components and the criteria of surface roughness for various combinations of the elements of cutting regime

(feed rate, cutting speed and depth of cut) according to the multi factorial method.

Treatment of these experimental results defines statistical mathematical models (Tables 3, 4, 5 and 6).

To calculate the values of constants of these mathematical models and the coefficients of determination R^2 , we used a turbo Pascal program. These models make predictions to optimize the cutting process [9-16].

Table 2- Components of cutting force and roughness criteria vs. various combinations of cutting regime elements

Tests N°	f , mm/rev	ap , mm	Vc , m/min	Fa , N	Fr , N	Fv , N	Ra , μm	Rz , μm	Rt , μm
1	0.08	0.15	125	54.08	167.03	101.06	0.35	2.19	3.32
2	0.16	0.15	125	62.90	191.00	117.00	0.56	3.50	3.75
3	0.08	0.30	125	93.14	232.61	136.02	0.40	2.44	2.67
4	0.16	0.30	125	108.83	274.93	212.00	0.59	3.45	3.97
5	0.08	0.15	250	30.93	148.72	88.48	0.30	1.87	2.04
6	0.16	0.15	250	49.01	152.00	109.26	0.50	3.39	3.41
7	0.08	0.30	250	73.54	179.80	132.69	0.35	2.12	2.48
8	0.16	0.30	250	89.91	219.42	192.43	0.53	2.87	3.62

4.1. Mathematical models of cutting regime influence on cutting forces

The detailed analysis of the derived mathematical models (Table 3) confirms that the increase in cutting speed leads to the reduction in cutting forces and the increase in chip section ($f \times ap$) induces the cutting forces growth. The order of classification of the exponents of the determined models, in absolute value, highlights the degree of the influence of each factor of cutting regime on cutting forces. Indeed, the depth of cut is the most influential factor.

Table 3- Mathematical models of cutting forces vs. cutting regime

Mathematical models	Coef. of det.
$Fr = e^{8.164} f^{0.127} ap^{0.512} Vc^{-0.358}$	$R^2 = 0.937$
$Fv = e^{7.437} f^{0.423} ap^{0.761} Vc^{-0.116}$	$R^2 = 0.956$
$Fa = e^{8.531} f^{0.320} ap^{0.953} Vc^{-0.417}$	$R^2 = 0.948$

4.2. Mathematical models of cutting regime influence on surface roughness

Table 4- Mathematical models of surface roughness vs. cutting regime

Mathematical models	Coef. of det.
$Rt = e^{3.684} f^{0.509} ap^{0.033} Vc^{-0.269}$	$R^2 = 0.837$
$Rz = e^{3.310} f^{0.618} ap^{0.019} Vc^{-0.185}$	$R^2 = 0.927$
$Ra = e^{1.741} f^{0.644} ap^{0.143} Vc^{-0.183}$	$R^2 = 0.988$

The mathematical models presented in Table 4, confirm that the feed rate is the most influential factor on

different criteria of surface roughness because it has the highest exponent. The second parameter which influences the roughness is cutting speed. As for the depth of cut, its effect is not very significant.

4.3. Mathematical models of flank wear influence on cutting forces and on surface roughness

Table 5- Mathematical models of cutting forces vs. flank wear

Mathematical models	Coef. of det.
$Fr = 41.51 e^{5.7536VB}$	$R^2 = 0.921$
$Fv = 42.10 e^{1.8849VB}$	$R^2 = 0.905$
$Fa = 14.05 e^{4.7663VB}$	$R^2 = 0.972$

The mathematical models of the cutting force components and criteria of surface roughness according to flank wear (VB) expressed in Tables 5 and 6 were obtained starting from the tests worked out under the following cutting conditions: $f = 0.08\text{mm/rev}$, $Vc = 125\text{m/min}$ and $ap = 0.15\text{mm}$.

Table 6- Mathematical models of surface roughness vs. flank wear

Mathematical models	Coef. of det.
$Rt = 2.103 e^{2.9175VB}$	$R^2 = 0.850$
$Rz = 1.738 e^{3.3204VB}$	$R^2 = 0.834$
$Ra = 0.276 e^{3.4591VB}$	$R^2 = 0.744$

They show that the increase in flank wear leads to the increase in cutting forces and in criteria of roughness, because the surface of contact between the tool and the workpiece increases, what generates friction. This latter

degrades the surface quality and increases the forces of friction which are added to cutting forces.

5. Conclusion

The tests of slide-lathing carried out on X38CrMoV5-1 steel treated at 50HRC, machined by a mixed ceramic tool (insert CC650), enabled us to study the influence of the following parameters: feed rate, cutting speed, depth of cut and flank wear on cutting forces and on surface roughness.

It is to be noted that tangential cutting force is very sensitive to the variation of cutting depth what affects the cutting forces in a considerable way. It is also noted that surface roughness is very sensitive to the variation of feed rate and that flank wear has a great influence on the evolution of cutting force components and on the criteria of surface roughness. Thus, the ranges of best cutting conditions adapted, were given.

Mathematical models established defined the degree of influence of each cutting regime element on the studied technological parameters.

This study confirms that in dry hard turning of this steel and for all cutting conditions tested, the major force is the thrust force and the roughness criteria found are close to those obtained in grinding.

Acknowledgements

The authors would like to express their deepest gratitude to Pr. Mohamed NEMAMCHA, President of the University of Guelma (Algeria) and Dr. Smail BOUTABBA (El-Hadj Ahcene) for their help.

References

1. **Poulachon G.** Usinabilité des matériaux difficiles, Techniques de l'ingénieur, BM 7 048 pp1-18, 2004.
2. **Barrau O.** Etude de frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. Thèse de doctorat, INP de Toulouse, Déc.2004.
3. **Bissey S.** Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités thermiquement. Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, Avril 2005.
4. **Poulachon G., Bandyopadhyay B. P., Jawahir I. S., Pheulpin S., Seguin E.** The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003) 139-144.
5. **Yallese M. A., Rigal J. F., Chaoui K. and 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.
6. Site internet: <http://www.Buderus-steel.com>
7. Site internet: <http://www.premium-stahl.de/1.2343ESU>
8. SANDVIK Coromant, Catalogue Général : Tournage – Fraisage – Perçage – Alésage - Attachements, 2007.
9. **Ozel T., Karpat Y., Figueira L., Paulo Davim J.** Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts,

Journal of Materials Processing Technology 189 (2007) 192-198.

10. **Lima J. G., Avila R. F., Abrao A. M., Faustino M., Paulo Davim J.** Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel, Journal of Materials Processing Technology 169 (2005) 388-395.
11. **Boulanouar L., Yallese M. A., Chaoui K. et Dominiak S.** Etude comparative sur le comportement à l'usure des outils céramique et CBN lors du tournage dur d'un acier à roulement, JM'EMP05, 2006.
12. **Chen W.** Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40 (2000) 455-466.
13. **Dundulis R., Volskis R.** Cutting process analysis of rotary turning, ISSN 1392-1207. MECHANIKA. 2004. No. 1(45) pp. 52-57.
14. **Daunys M., Markauskas S., Staponkus V.** Investigation of surface quality for small diameter elements after electromechanical treatment, ISSN 1392-1207. MECHANIKA. 2004. No. 1(45) pp. 63
15. **Karabegović I., Jurković M., Bejdić M.** Mathematical modeling of the main cutting force at turning, ISSN 1392-1207. MECHANIKA. 2004. No. 3(47) pp. 59-63.
16. **Alabi B., Salau T. A. O., Oke S. A.** Surface finish quality characterisation of machined workpieces using fractal analysis, ISSN 1392-1207. MECHANIKA. 2007. No. 2(64) pp. 65-71.

B. Fnides, H. Aouici, M.A. Yallese

PJOVIMO JĖGA IR PAVIRŠIAUS ŠIURKŠTUMAS
KERMETU TEKINANT KARŠČIUI ATSPARŲ PLIENĄ
X38CrMoV5-1

Re z i u m ė

Darbo tikslas nustatyti pjovimo jėgą ir paviršiaus šiurkštumą tekinant karščiui atsparų plieną X38CrMoV5-1 [AISI H11]. Šis 50 HRC kietumo nevolframinis CrMoV pagrindu sukurtas karščiui ir susidėvimui atsparus plienas apdirbamas pjovimo įrankiu su kermetine plokštele (plokštelė CC650 cheminės sudėties 70%Al₂O₃+30%TiC). Jis naudojamas aukštas apkrovas atlaikančių formų gaminamų liejimu slėgiant, ilgaamžių kietlydinio plokštelių, plastinių liejinių veikiamų aukšto slėgio ir kaltų antgalių gamybai.

Tekinimo bandymai buvo atlikti naudojant eksperimento planavimo metodiką. Gauti rezultatai įgalino analizuoti pjovimo kintamųjų (pastūmos dydžio, pjovimo greičio ir gylio) įrankio antgalio nusidėvėjimo (VB) įtaką pjovimo jėgoms ir paviršiaus šiurkštumui. Siekiant nustatyti įvairių pjovimo režimų komponentų įtaką nagrinėjamiems technologiniams parametrams, buvo sudarytas matematinis modelis. Jo pagalba parinktas geriausių pjovimo sąlygų diapazonas.

Šie tyrimai patvirtino, kad prie įvairių bandymų sąlygų sausai tekinant šį plieną svarbiausia veikianti jėga yra nukreipta ašine kryptimi, o gautas paviršiaus šiurkštumas artimas šiurkštumui šlifuojant.

CUTTING FORCES AND SURFACE ROUGHNESS IN
HARD TURNING OF HOT WORK STEEL
X38CrMoV5-1 USING MIXED CERAMIC

S u m m a r y

The aim of this work is to evaluate cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 [AISI H11].

This steel is hardened to 50 *HRC*, machined by a mixed ceramic tool (insert CC650 of chemical composition 70%Al₂O₃+30%TiC), free from tungsten on CrMoV basis, insensitive to temperature changes and having a high wear resistance. It is employed for the manufacture of highly stressed diecasting moulds and inserts with high tool life expectancy, plastic moulds subject to high stress and forging dies.

The tests of slide-lathing were carried out according to the method of planning experiments. The results made it possible to study the influence of cutting variables (feed rate, cutting speed and depth of cut) and flank wear (*VB*) on cutting forces and surface roughness. Mathematical models were established to express the influence degree of each cutting regime element on the studied technological parameters. Thus, the ranges of the best cutting conditions adapted, were given.

This study confirms that in dry hard turning of this steel and for all cutting conditions tested, the major force is the thrust force and the found roughness criteria are close to those obtained in grinding.

СИЛА РЕЗАНИЯ И ШЕРОХОВАТОСТЬ
ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ЖАРСТОЙКОЙ
СТАЛИ X38CrMoV5-1 КЕРМЕТОМ

S u m m a r y

Цель работы установить силу резания и шероховатость поверхности при точении жаростойкой стали X38CrMoV5-1 [AISI H11]. Эта 50 *HRC* твердости безвольфрамовая жаро- и к износу стойкая сталь создана на основе CrMoV обрабатывается резцом с керметовой пластинкой (пластинка CC650 ее химический состав 70%Al₂O₃+30%TiC). Эта сталь используется для изготовления литейных форм под давлением и работающих под высокими нагрузками, износостойких твердотельных пластин, пластичных сплавов воздействуемых высоким давлением и наконечников долота.

Эксперименты по точению проводились по методу планирования экспериментов. Полученные результаты позволили анализировать влияние переменных точения (величины подачи, скорости и глубины точения), износ наконечника инструмента (*VB*), изменение силы точения и шероховатость поверхности. С целью установления влияния режимов резания на исследуемые технологические параметры, разработана соответствующая математическая модель. С ее помощью подобран наилучший диапазон режимов резания.

Исследования подтвердили, что при разных условиях сухого точения стали, главная составляющая силы направлена по осевому направлению, а шероховатость обрабатываемой поверхности приблизительно равна шероховатости поверхности получаемой при шлифовке изделия.