

République Algérienne Démocratique & Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 08 Mai 1945 de Guelma

Mémoire de magister



60

Département de Génie Mécanique

*Influence du matériau à outil sur les principaux paramètres  
technologiques d'usinage*

Option : Mécanique Productive

Présenté et soutenu par :  
M. ELBAH

Devant le jury composé de MM :

M. A. YALLESE  
L. BOULANOUAR  
M.Ch. DJAMAA  
A.R. BEAZI

M.C. Université de Guelma  
Pr. Université d'Annaba  
M.C. Université de Guelma  
M.C. Université de Guelma



Président  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur

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

---

*Influence du matériau à outil sur les principaux paramètres*

*technologiques d'usinage*

---

Option : Mécanique Productique

Présenté et soutenu par :  
M. ELBAH

Devant le jury composé de MM :

M. A. YALLESE  
L. BOULANOUAR  
M.Ch. DJAMAA  
A.R. BEZAZI

M.C. Université de Guelma  
Pr. Université d'Annaba  
M.C. Université de Guelma  
M.C. Université de Guelma

Président  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur

## Remerciements

J'adresse tout particulièrement ma reconnaissance à Mr. Lakhdar BOULANOUAR, professeur au département de génie mécanique à l'université de Annaba pour avoir encadré et dirigé ce travail. Mes sincères remerciements vont également aux membres de jury :

-Monsieur Med Athmane YALLESE, maître de conférences à l'université de Guelma, qui fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

-Mr BEZAZI .A.R et DJAMAA M.CH, maîtres de conférences à l'université de Guelma, pour avoir consacré de leur temps à l'examen de ce travail.

Que toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail trouvent ici ma reconnaissance la plus sincère et particulièrement MM : Med Aib, A. Aziz Madi et B.Fnides.

Un grand merci enfin à ma famille et à mes proches et particulièrement à ma femme et mes petits enfants Heythem et Amira pour leur soutien inconditionnel, et sans oublier mon petit né Ayyoub.

## ملخص

تعتبر الخراطة الصلبة من أحدث الطرق المستعملة. فهي متناوبة مع التجليخ الاتفاقي, الذي يعد بطينا و ثمينا أثناء تشغيل القطع الدقيقة.

فهي عملية رائدة جلبت انتباه عديد من الصناعيين بسبب الايجابيات التي تمتاز بها من حيث الإنتاجية والمرونة. من أجل التحكم في عمل الخراطة الصلبة والرفع من مردوديتها أثناء الاستعمال الصناعي ,بات من الضروري دراسة نوعية السطوح المحصل عليها وأيضا القوانين المسيرة للتغيرات بدلالة شروط القطع. لقد تناولنا في هذه الدراسة خمس مواد قطع مختلفة لتشغيل الفولاذ 42CrMo4 كبريدات مكسوة و غير مكسوة ,سرمي مكسو و السيراميك.

عناصر كثيرة تؤثر على نتائج الدراسة التجريبية للفولاذ 42 CrMo4 المصلد (50HRC) لتحديد و تخصيص نوعية السطح المشغل في الخراطة الصلبة مثل عناصر القطع (سرعة القطع, التغذية, و عمق التميرير) , التآكل و جهود القطع المولدة اثر تلامس الأداة بالقطعة المشغلة. بين تحليل النموذج الرياضي المحصل عليه للتآكل أن سرعة القطع و زمن التشغيل لهما تأثير متناسب مع مدة صلاحية (حياة) الأداة.

معالجة النتائج بواسطة التطبيق بالمقاربة الإحصائية (مساحة الأجوبة) سمحت لنا من نمذجة الخشونة و جهود القطع و التآكل بدلالة شروط القطع.

## RÉSUMÉ

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 des pièces de précision. C'est un procédé promoteur qui intéresse de nombreux industriels pour les avantages qu'il présente de point de vue productivité et flexibilité. A fin de maîtriser le procédé du tournage dur et de rentabiliser son utilisation industrielle, il est nécessaire d'étudier la qualité de la surface obtenue ainsi que les lois qui régissent sa variation en fonction des paramètres d'usinage.

Cette étude met en exergue l'évaluation de cinq matériaux de coupe pour l'usinage de l'acier 42CrMo4. Il s'agit des carbures revêtus et non revêtus, du cermet revêtu et des céramiques de coupe.

Plusieurs paramètres portant sur les résultats d'une étude expérimentale de l'acier 42CrMo4 durci (50HRC) pour caractériser la qualité de surface en tournage dur, tels que les paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de passe), l'usure et les efforts de coupe générés au contact outil-pièce.

L'analyse du modèle mathématique de l'usure obtenu a montré que la vitesse de coupe et le temps d'usinage ont une influence proportionnelle sur la durée de vie de l'outil. Le traitement des résultats par l'intermédiaire de l'application d'une approche statistique (surface de réponses) nous a permis de modéliser la rugosité, efforts de coupe et l'usure en fonction des paramètres de coupe.

## ABSTRACT

Hard turning is a new process in its use. It presents itself as an alternative to conventional grinding, often a long and expensive process during the machining of precision parts. It is a promoting process which interests many industrialists because of its advantages in terms of productivity and flexibility. In order to master the process of hard turning and make it profitable in industrial use, it is necessary to study the surface quality obtained as well as the laws governing its variation according to machining parameters.

This study is focused on the evaluation of five cutting materials for 42Cr Mo4, (4140) steel machining. These materials are coated and uncoated carbides and coated cermets and céramiques.

Several parameters related to the results of an experimental study of hardened steel 42Cr Mo4 hardened (50HRC) to characterize the surface quality in hard turning such as the cutting parameters (cutting speed, feed; depth of cut and the machining time) and the wear and cutting forces generated by contact tool-work piece are taken into account.

The analysis of the mathematical model of wear obtained showed that the cutting speed and the machining time had a proportional influence on the life of the tool. The processing of results through the application of a statistical approach (response surface) allowed us to model roughness, cutting forces and wear based on cutting parameters

## Table de matières

<b>Nomenclature</b>	8
<b>Introduction générale</b>	9
<b>I Etude et analyse bibliographique</b>	10
I.1 Evolution des matériaux a usiné .....	11
I.2 Evolution des outils de coupe .....	11
I.2.1 Evolution des matériaux des outils de coupe.....	12
I.2.1.1 Carbures de coupe non revêtus .....	13
I.2.1.2 Outils en carbures revêtus .....	14
I.2.1.3 Outils en céramiques .....	15
I.3 Les efforts de coupe .....	16
I.3.1 Rapport des composantes .....	17
I.4 Puissance de coupe .....	17
I.5 Rugosité .....	18
I.5.1 Principaux types d'états de surface.....	18
I.6 Usure et durée de vie des outils.....	19
I.6.1 Principales types d'usure des outils .....	20
I.6.1.1 Usure par adhésion.....	20
I.6.1.2 Usure par abrasion.....	21
I.6.1.3 Usure par diffusion .....	21
I.6.1.4 Usure par oxydation .....	22
I.6.1.5 Usure par fatigue.....	22
I.6.2 Description de l'usure des outils .....	23
I.6.2.1 Usure en dépouille .....	23
I.6.2.2 Usure en cratère.....	24
I.6.2.3 Usure du bec de l'outil.....	24
I.6.3 Evolution de l'usure .....	24
I.6.4 Mesure de l'usure des outils .....	25
I.6.5 Critères de durée de vie des outils.....	26
I.7 Surface de contact outil-copeau.....	28
<b>II. Procédure expérimentale</b>	31
II.1 Introduction .....	32
II.2 Matériels utilisés .....	32
II.2.1 Machine-outil.....	32
II.2.2 Matériau de pièces utilisées pour les essais d'usinage .....	33
II.2.3 Traitement thermique des éprouvettes .....	33
II.2.4 Plaquette de coupe .....	34
II.2.5 Porte outil .....	35

II.2.6 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe .....	36
II.2.7 Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille VB.....	39
II.2.8 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité .....	40
II.3 Planification des expériences .....	40
II.4 Conditions expérimentales.....	42
II.5 Conclusion .....	44
<b>III Résultats des essais d'usinage</b> .....	<b>45</b>
III.1 Introduction .....	46
III.2 Evolution de la rugosité de surface de l'acier 42CrMo4.....	46
III.2.1 Effet de la vitesse de coupe sur les critères de rugosité.....	46
III.2.2 Effet de l'avance sur la rugosité de la surface usinée .....	49
III.2.3 Effet de la profondeur de passe sur la rugosité de la surface usinée.....	51
III.3 Evolution des efforts de coupe et des pressions spécifiques .....	52
III.3.1 Effet de la vitesse sur les efforts et la pression de coupe .....	53
III.3.2 Effet de l'avance sur les efforts et la pression de coupe .....	61
III.3.3 Effet de la profondeur de passe sur les efforts et la pression de coupe.....	65
III.3.4 Conclusions .....	68
III.4 Evolution de l'usure des outils .....	69
III.4.1 Evaluation des durées de vie.....	72
III.4.2 Analyse des efforts coupe .....	73
III.4.2.1 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage .....	73
III.4.2.2 Evolution des efforts de coupe en fonction de VB .....	74
III.4.5 Analyse de la rugosité .....	77
III.4.5.1 Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage.....	77
III.4.5.2 Analyse de la rugosité en fonction l'usure VB .....	78
III.5 Conclusion .....	80
<b>IV Analyse et discussion des résultats</b> .....	<b>81</b>
IV.1 Introduction.....	82
IV.2 Modèles de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe .....	85
IV.2.1 Analyse de régression de l'effort axial (Fa) .....	86
IV.2.2 Analyse de régression de l'effort radial (Fr) .....	89
IV.2.3 Analyse de régression de l'effort tangentiels ( Ft) .....	92
IV.3 Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe.....	95
IV.3.1 Analyse de régression de la rugosité moyenne arithmétique (Ra) .....	95
IV.3.2 Analyse de régression : de la rugosité totale Rt .....	99
IV.3.3 Analyse de régression de la rugosité Rz .....	101
IV.4 Modèle de l'usure en dépouille en fonction des paramètres de coupe.....	104
IV.4.1 Analyse de régression de VB en fonction de $V_c$ ; $f$ et $t$ .....	104
IV.4.2 Analyse de régression des efforts de coupe en fonction de $V_c$ ; $f$ et $t$ pour la nuance C650 .....	107



IV.4.3	Analyse de régression des rugosités en fonction de $V_c$ ; $f$ et $t$ pour la nuance C650 .....	110
IV.5	Conclusion.....	113
	<b>Conclusion générale</b>	114
	<b>Perspectives</b>	116
	<b>Références bibliographiques</b>	117

## Nomenclature

$a_p$	Profondeur de passe (mm) ;
$f$	Avance par tour (mm/tr) ;
$F_R$	Effort de coupe résultant (N) ;
$F_a (F_x)$	Effort de coupe axial (N) ;
$F_r (F_y)$	Effort de coupe radial (N) ;
$F_t (F_z)$	Effort de coupe tangentiel (N) ;
HB	Dureté Brinell ;
HRC	Dureté Rockwell ;
HV	Dureté Vickers ;
K	Effort spécifique de coupe ( $N/mm^2$ ) ;
$K_a$	Effort spécifique de coupe axial ( $N/mm^2$ ) ;
$K_r$	Effort spécifique de coupe radial ( $N/mm^2$ ) ;
$K_B$	Largeur de cratère (mm) ;
$K_T$	Usure en cratère (mm) ;
$K_V$	Effort spécifique de coupe tangentiel ( $N/mm^2$ ) ;
$P_c$	Puissance de coupe (Watt) ;
$R^2$	Coefficient de détermination ;
$R_a$	Rugosité moyenne arithmétique ( $\mu m$ ) ;
$R_t$	Rugosité totale ( $\mu m$ ) ;
$R_z$	Profondeur moyenne de la rugosité ( $\mu m$ ) ;
T	Durée de vie (min) ;
$V_c$	Vitesse de coupe (m/min) ;
$V_{cop}$	Vitesse de copeau (m/min) ;
VB	Usure en dépouille (mm) ;
$r_\epsilon$	Rayon de bec de l'outil (mm) ;
$\alpha$	Angle de dépouille principal (degré) ;
$\gamma$	Angle d'attaque (degré) ;
$\lambda$	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré) ;
$\eta$	Rendement de la machine ;
$\chi$	Angle de direction principal (degré) ;
$\emptyset$	Angle de cisaillement (degré) ;
$\theta$	Température maximale dans la zone de coupe (degré).

## **Introduction :**

Dans le domaine de la production industrielle, l'usure des outils est l'un des problèmes fondamentaux. Elle a une influence sur la précision, le fini de la surface usinée et entraîne des frais élevés à cause des temps morts dus aux changements répétés d'outils, pour des achats renouvelés ou des affutages. De plus, les industries de production manufacturière telles que celles de l'aéronautique et de l'automobile, à cause des exigences de plus en plus fortes qui ont trait à la fiabilité et à la sécurité, des matériaux ayant des caractéristiques mécaniques particulières. Parmi ces matériaux, on peut citer les alliages à base de nickel. L'usinage de ces matériaux s'accompagne d'une usure rapide de l'outil de coupe.

Toutes ces raisons ont conduit de nombreux chercheurs à s'intéresser non seulement aux différents facteurs qui sont à l'origine de l'usure des outils, mais également à rechercher des voies et des moyens pour réduire celle-ci. Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans ce cadre.

Dans le premier chapitre est exposée l'étude et l'analyse bibliographique, qui présente l'état des connaissances sur l'usinage par tournage, les outils de coupe, les phénomènes d'usure des outils, les principaux paramètres technologiques d'usinage et l'interaction entre l'outil et la pièce.

Dans le deuxième chapitre sont donnés les matériaux et la technique expérimentale. Les diverses techniques de mesure utilisées, ainsi que le choix des outils et des matériaux d'usinage sont également décrits.

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans le chapitre III. Ils concernent le suivi de l'évolution des efforts et des pressions de coupe en fonction des paramètres de régime de coupe, et l'évolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction des éléments du régime de coupe ( $f$ ,  $V_c$ ,  $a_p$ ) et du temps d'usinage.

Une étude statistique (analyse de variance, interaction) basée sur la méthodologie de surface de réponse est présentée dans le quatrième chapitre. Le but est de déterminer des modèles mathématiques permettant la prédiction des efforts de coupe, de la rugosité et de l'usure VB en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $t$ ).

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale, des perspectives et d'une liste de références bibliographiques.

Introduction

**Etude et analyse bibliographique**

Matériaux et technique expérimentale

Résultats expérimentaux

Analyse et discussion des résultats

### I.1 Evolution des matériaux a usiné

L'industrie sidérurgique se veut une industrie très innovante qui travaille en collaboration avec ses clients afin d'améliorer ses produits. Un chiffre montre cette volonté : 50% de matériaux nouveaux tous les 5 ans. L'industrie a ainsi fait évoluer les matériaux d'usinage. Deux pistes ont été et sont toujours explorées :

- matériaux assurant une auto-lubrification des arêtes de coupe avec des éléments chimiques (Mn, Si, Cr) qui s'oxydent facilement et s'agglomèrent sur ces dernières [1].

- matériaux, avec inclusions de métaux (plomb, bismuth, calcium) ou de sulfures, favorisant la fragmentation des copeaux. Plusieurs travaux mettent en évidence l'amélioration apportée par ces matériaux [2] même si les phénomènes physiques ne sont pas encore totalement compris. On constate leur influence notable sur le cisaillement primaire et secondaire dans le cas de la formation de copeaux continus, ce qui permet ainsi une transition plus facile vers la segmentation des copeaux [3,4]. Les sulfures sont très étudiés, car ils engendrent des amorces de rupture qui facilitent la fragmentation des copeaux. On peut noter que cette influence dépend aussi de la vitesse de coupe [5].

Les inclusions qui posent des problèmes dans la formation du copeau et dans la modification du champ de contraintes, au sein de la pièce usinée, ont été aussi largement étudiées, dans le but de comprendre les phénomènes physiques qu'elles génèrent et leurs influences dans les opérations d'usinage [6, 7, 8].

### I.2 Evolution des outils de coupe

L'outil est le point faible de l'usinage. Il est fragile car sensible aux efforts et sa durée de vie est courte. Les outils ont connu une évolution importante. L'industrie est passée de l'outil monobloc en acier rapide à l'outil à plaquettes carbures rapportées évitant ainsi les ré-affutages nombreux et coûteux. Aujourd'hui, ce sont les plaquettes carbures revêtues qui se développent. Les participants à la 4<sup>eme</sup> conférence mondiale des outils coupant

Donnent des estimations du marché mondial des outils coupants pour l'année 2007 s'établissent à 12 milliards d'euros, dont 40% en Europe, 30% aux USA et 30% en Asie.

Bien qu'employant 90 000 personnes, la plupart des fabricants sont de taille limitée avec une moyenne de 150 employés par fabricant. Dans les coûts de production des clients finaux, le coût des outils ne représente que 4% du total mais l'importance de la qualité des outils et de leur bon usage fera de plus fortes différences encore entre un utilisateur ou un autre [9]. Les industriels des outils coupants deviennent de plus en plus des partenaires des producteurs de pièces avec la recherche de l'optimisation des coûts de fabrication et de la qualité des produits finis [9]. Le principal problème auquel doit faire face l'Industrie des outils coupants est la disponibilité des matières premières et leurs coûts. Par exemple le prix de l'APT (Ammonium Paratungstate) a été multiplié par 3 en deux ans et se trouve à 90% en Chine qui, elle-même, a un grand besoin de matières premières. A noter qu'entre 1996 et 2004, alors que l'économie américaine a cru de 50%, celle de la Chine a connu une augmentation de 1000%...

Face à cette situation, les fabricants développent actuellement des outils avec des matériaux différents entre la pointe et le corps [9].

### I.2.1 Evolution des matériaux des outils de coupe

L'évolution des matériaux constituant les outils de coupe a été une source de gain de productivité très importante pour l'industrie. Elle a entraîné, au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, un doublement de la productivité tous les dix ans [10] : figure I-1

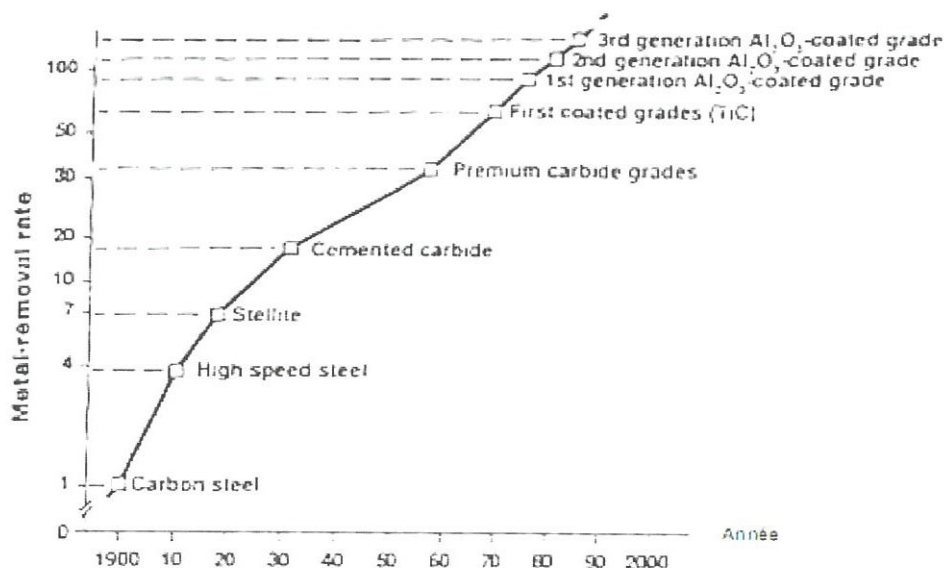


Figure I-1: Augmentation de la productivité due à l'évolution des matériaux des outils de coupe

Cette amélioration de la productivité résulte d'un accroissement important des vitesses de coupe permises, grâce à l'amélioration des performances des matériaux des outils [11]. Elle résulte aussi des études et travaux à la fois techniques et fondamentaux portant sur les propriétés des matériaux [12].

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

### **I.2.1.1 Carbures de coupe non revêtus**

Les carbures de coupe non revêtus restent parmi les matériaux de coupe les plus populaires. Une nuance à 6 pour cent de cobalt convient, ainsi, pour les opérations d'ébauche, tandis qu'une nuance micro grain à 6 pour cent de cobalt est indiquée pour les opérations de semi-finition et de finition. Pour les travaux d'ébauche les plus exigeants, on trouve des nuances micro grain à 10 pour cent de cobalt. Avec ces types de carbures, il est préférable d'utiliser des arêtes de coupe positives de manière à réduire les efforts de coupe et à minimiser les imperfections de surface. Les vitesses de coupe sont, en moyenne, identiques ou légèrement moindres que celles utilisées avec les carbures revêtus [13].

- Les cermets : sont des carbures, des nitrures, des carbonitrures ou des borures liés par un métal ou un alliage ferreux. Les liants sont donc de plusieurs types (cobalt, nickel, nickel-fer, nickel-chrome, etc.). La dénomination de cermets est peu utilisée dans l'industrie car souvent ils sont assimilés à des carbures cémentés. On obtient avec ces matériaux des outils pouvant avoir des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Leur dureté à chaud permet de faire des usinages dans des conditions extrêmes : 1000°C. Les cermets ont des applications très diverses (tournage, fraisage, etc.), et ont une très bonne résistance mécanique [14], une faible conductivité thermique et une bonne résistance à la diffusion et à l'usure. Ils sont donc souvent utilisés en tournage de semi-finition ou de finition des aciers.

### I.2.1.2: Outils en carbures revêtus

On utilise largement les revêtements effectués par dépôt chimique en phase vapeur (CVD), ainsi que par dépôt physique en phase vapeur (PVD). Les dépôts CVD sont exploités sur une diversité de super-alliages les moins durs à base fer et nickel. Les revêtements à base de titane comme le TiN et le TiC sont généralement les plus efficaces bien que, dans des circonstances inhabituelles où l'alliage est extrêmement réactif, un revêtement d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  soit le meilleur. On fait normalement appel à des substrats plus tenaces de manière à résister à l'usure en entaille et par écaillage. En général, les revêtements CVD représentent un bon choix pour les matières réactives sur lesquelles on peut pratiquer des vitesses de coupe allant jusqu'à 105 m/mn. Cependant, on fait rarement usage de revêtements CVD pour usiner les alliages de titane [14].

Les outils revêtus en PVD sont plus courants pour l'usinage des alliages de titane et les superalliages. Ils sont minces et lisses, et ne transmettent que de très faibles tensions résiduelles au carbure qu'ils recouvrent, ce qui aide à une bonne résistance à l'usure en entaille et par écaillage. Comparés aux revêtements CVD, ceux PVD suivent plus fidèlement le profil des arêtes de coupe très vives dont on tire largement profit aujourd'hui. Ceci veut dire que les arêtes des plaquettes revêtues PVD sont intrinsèquement plus tenaces que celles des plaquettes revêtues CVD.

À base nickel et cobalt les plus difficiles à usiner, jusqu'à 90 m/mn pour la finition des superalliages les moins durs et jusqu'à 180 m/mn pour le titane [14].

Les revêtements PVD apportent de la résistance à l'usure, une stabilité chimique à la surface de l'outil et une bonne résistance à la formation d'arêtes rapportées. Ces revêtements sont largement adoptés aujourd'hui que les ennuis d'adhésion et d'uniformité ont été palliés par rapport aux premières versions mises sur le marché. Les nuances revêtues PVD les plus répandues bénéficient d'un substrat micro grain pour résister à la déformation et accroître la ténacité.

Le premier revêtement à avoir été utilisé c'était le nitrure de titane TiN mais d'autres présentent des avantages spécifiques dans différentes applications. Par exemple, les revêtements de TiAlN sont plus durs et chimiquement plus stables, leur autorisant de travailler à des vitesses de coupe plus élevées.



Les revêtements de TiCN contribuent à une meilleure tenue des outils dans certaines applications. Les vitesses de coupe permises varient de 15 m/mn, pour l'ébauche des superalliages [14].

### **I.2.1.3 Outils en céramique :**

Les deux catégories de céramiques les plus courantes qui sont celles au nitrure de silicium et à base d'oxyde d'aluminium peuvent servir à usiner les aciers durcis et les alliages réfractaires. L'effet des outils en céramique sur la condition de la surface des pièces usinées en a limité l'utilisation pour des opérations de finition [13].

Les céramiques très dures en  $Al_2O_3$ -TiC permettent de travailler à des vitesses d'usinage élevées. Malgré tout, ces matériaux de coupe ont, aussi, une plus grande tendance à une usure en entaille au niveau de la ligne de coupe et à un écaillage, notamment lorsque l'on usine des pièces forgées à surface plus ou moins calaminée. Pour réduire le risque d'écaillage, on doit utiliser des géométries aussi robustes que possible, notamment des plaquettes de coupe rondes, ainsi que des angles d'attaque prononcés, des talus marqués et un abondant arrosage.

Les céramiques nitrure de silicium, les sialons et les céramiques renforcées de fibres de nitrure de silicium font toutes preuve d'une meilleure résistance à l'usure en entaille et à l'écaillage mais sont, par contre, moins dures et chimiquement plus réactives. Ces céramiques sont utilisées presque exclusivement pour des travaux d'ébauche. Les vitesses de coupe peuvent alors atteindre 150 m/mn pour les sialons et les céramiques renforcées et des vitesses jusqu'à 250m/min et, dans certaines circonstances, jusqu'à 305 m/mn peuvent être atteintes avec les céramiques en  $Al_2O_3$ -TiC. On précisera encore que les céramiques servent occasionnellement à l'ébauche des alliages de titane. Dans ce cas, le remplacement des outils en carbure par des céramiques a démontré que l'on pouvait augmenter la vitesse de coupe jusqu'à des 75 % [13].

### I.3. Les efforts de coupe

En plus des informations concernant la stabilité de la coupe, la connaissance des efforts de coupe nous renseigne sur les déformations plastiques et la puissance mécanique fournie nécessaire à l'enlèvement de matière. De plus, elle permet de délimiter la zone de coupe en choisissant des valeurs des efforts acceptables pour l'outil. La plage de fonctionnement autorisée est établie essentiellement en considérant l'évolution de la pression spécifique de coupe  $K_c$  en fonction de la variation de la vitesse de coupe, pour des conditions d'avance et de profondeur de passe correspondant à celles du domaine de validité de l'outil coupant. Cette méthodologie s'inscrit dans la démarche appelée Couple-Outil-Matière COM. Elle permet de définir le domaine de fonctionnement de l'outil de coupe lors de l'usinage d'une matière donnée en fonction des paramètres déterminant les limites d'utilisation de l'outil (déterminer les valeurs minimales et maximales de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe) indépendamment les uns des autres, des paramètres d'interaction entre les paramètres limites (débit de copeaux, déformation et couple autorisés, exposants et constante du modèle de Taylor) et des paramètres auxiliaires qui tiennent compte des caractéristiques des moyens de production et permettant la transposition des conditions de coupe d'un procédé à un autre par simple calcul de l'effort spécifique de coupe ( $K_c$ ).

#### I.3.2 Rapport des composantes

La résultante de coupe  $F_c$  est une diagonale de parallélépipède est égale à :

$$F_c = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \quad (\text{éq I-1})$$

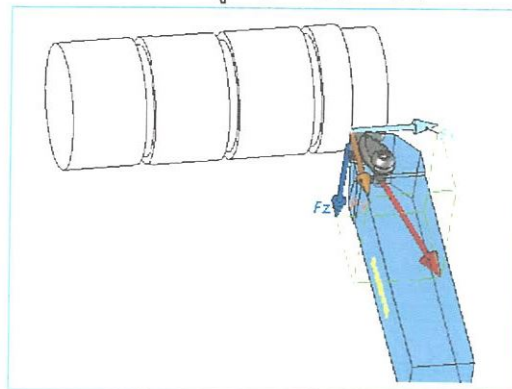


Figure I-3. Composantes de l'effort de coupe

L'effort axial ( $F_a$ ) ou effort d'avance : Il correspond à la force appliquée sur l'outil parallèlement à l'axe de rotation de la pièce à usiner. Il est pratiquement nul dans la configuration de coupe orthogonale.

L'effort radial ( $F_r$ ) qui est défini comme étant l'effort parallèle au rayon de la pièce. Il est appelé aussi effort de pénétration.

L'effort tangentiel ( $F_t$ ) ou l'effort de coupe : C'est l'effort parallèle à la tangente à la surface de la pièce au niveau de la pointe de l'outil.

#### I.4. Puissance de coupe

Elle est donnée par la relation :

$$P = F_c V_c \quad (\text{éq I-2})$$

Où :

$V_c$  : est la Vitesse de coupe [m/mn] ;  $F_c$  : est l'effort de coupe [N].

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

$$P_c = K_c a_p V_c f \quad (\text{éq I-3})$$

Où

$P_c$  : Puissance de coupe [W] ;  $V_c$  : Vitesse de coupe [m/mn] ;  $K_c$  : Effort spécifique de coupe [ $N/mm^2$ ] ;  $f$  : Avance [mm/tr] ;  $a_p$  : Profondeur de passe [mm].

La puissance absorbée par la machine se déduit de la puissance de coupe en fonction du rendement  $\eta$ .

$$P_b = P_c / \eta \quad (\text{éq I-4})$$

$P_b$  : Puissance sur la broche [W] et  $\eta$  : Rendement de la machine [ $\approx 0.8$ ].

### I.5. Rugosité

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 de ce 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, la durée de rodage des pièces mécaniques, etc....

#### I.5.1. Principaux types d'états de surface

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne [16].

##### a) Rugosité moyenne arithmétique Ra

Elle représente la valeur moyenne arithmétique de toutes les distances situées perpendiculairement à la médiane dans le segment mesuré.

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Y^L| dx \quad (\text{éq I-5})$$

##### b) Rugosité totale Rt

Elle représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.

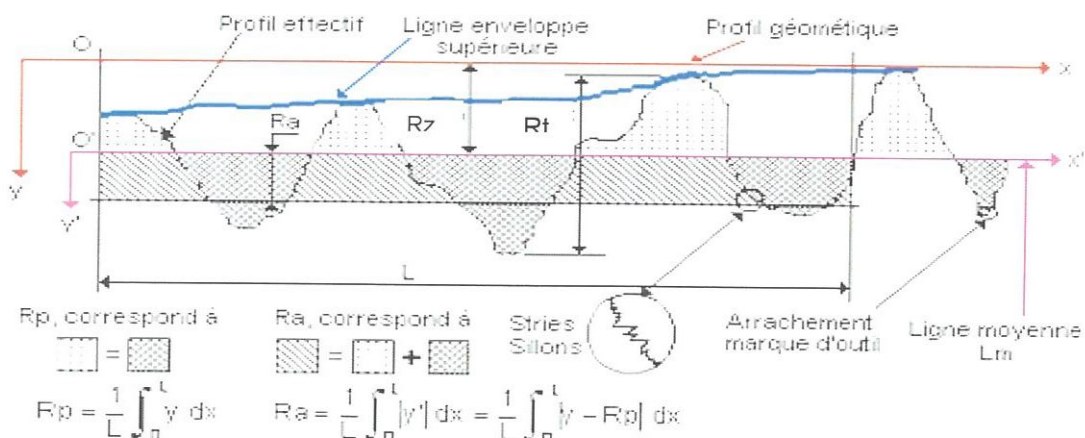


Figure I-4. Critères de rugosité Ra et Rt

**c) Rugosité  $R_z$** 

Représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas. (Figure I-4)

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i \quad (\text{éq I-6})$$

**I.6. Usure et durée de vie des outils**

La norme ISO 3685-1977 définit l'usure des outils comme étant tout changement lors de la coupe, de la forme de l'outil par rapport à sa forme initiale résultant de la perte progressive de matériau de l'outil ou de déformation. L'usure des outils a une très grande importance, tant du point de vue technologique qu'économique, parce qu'elle peut avoir une influence considérable sur la qualité des pièces et des ensembles mécaniques. La façon dont l'usure des outils a lieu, la partie de l'outil qui s'use le plus et les conséquences pratiques de l'usure des outils varient avec les conditions de coupe et la qualité des spécifications des parties usinées [17].

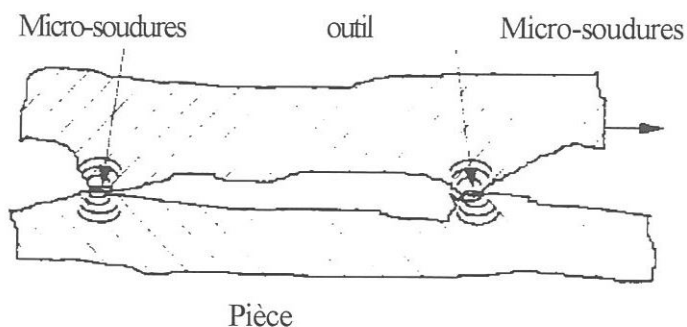
L'usure des outils est en général un processus graduel. Le taux d'usure des outils dépend essentiellement des matériaux d'outils et des pièces, de la géométrie des outils, des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe), des fluides de coupe utilisés et des caractéristiques des machines outils.

**I.6.1 Principales types d'usure des outils**

L'usure des outils est souvent classifiée selon les types qui la provoquent. Les mécanismes d'usure les plus communément rencontrés sont les mécanismes d'adhésion et d'abrasion. Toutefois, les importantes élévations de températures et de contraintes observées sur l'outil pendant les opérations d'usinage influencent la nature de ces deux mécanismes de base, mettant ainsi en jeu d'autres processus tels que la diffusion, l'oxydation, la fatigue et l'érosion. Les différents types d'usure sont décrits dans les paragraphes ci-après.

### I.6.1.1 Usure par adhésion

Les surfaces de l'outil et du copeau ont une micro-géométrie qui comporte des micro-soudures entre l'outil et le copeau qui sont rompues en continu grâce au mouvement relatif outil-copeau [17]. Des fragments de copeau viennent adhérer sur l'outil, formant ainsi une arête rapportée. Si ces jonctions sont moins résistantes que le métal voisin, les ruptures s'effectuent là où elles se forment et l'usure est alors négligeable. Par contre, si ces jonctions sont à la fois plus résistantes que le métal voisin et la surface du matériau de l'outil, les ruptures se produisent en majorité dans la masse du copeau et pour quelques uns à la surface de l'outil.



*Figure I.6 Illustration de l'usure par adhésion.*

Ce type d'usure a surtout tendance à se produire lors de l'usinage de l'aluminium à faible vitesse ou l'acier.

On peut réduire l'usure par adhésion en:

- ✓ choisissant des matériaux qui ne forment pas de liaisons adhésives fortes,
- ✓ choisissant un matériau de l'outil beaucoup plus dur que celui de la pièce,
- ✓ utilisant des matériaux qui s'oxydent facilement où des films d'oxydes peuvent agir comme un film protecteur,
- ✓ appliquant des revêtements durs sur la surface de l'outil.

### I.6.1.2 Usure par abrasion

Elle est causée par le glissement d'une surface dure et rugueuse (ou une surface contenant des particules anguleuses dures) sur une autre surface.

Elle se manifeste par l'arrachement sur la face de l'outil de particules sur la pièce occasionnant ainsi des sillons ou des rayures sur la pièce.

La résistance à l'usure par abrasion est directement proportionnelle au nombre, à la grosseur, à la distribution et à la dureté des particules du matériau usiné. L'usure par abrasion peut être réduite par une augmentation de la dureté des matériaux d'outils [18].

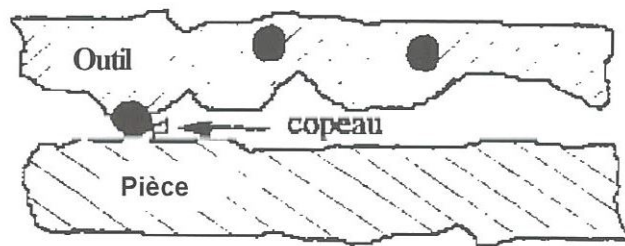


Figure I.7 Illustration du phénomène d'usure abrasive.

Les rayures longitudinales sur la surface de l'outil sont un indicateur d'une usure par abrasion.

### I.6.1.3 Usure par diffusion

Elle a lieu lorsqu'il y a un contact intime entre le matériau usiné et le matériau d'outil. Elle est intimement liée à un phénomène d'élévation de température dans la zone de coupe. Le taux de diffusion croît de façon exponentielle avec l'augmentation de la température. Il se passe des mouvements d'atomes des zones de grande concentration vers celles de moindre concentration, ceci a été proposé comme étant la principale cause de la formation du cratère lors de l'usinage à des vitesses de coupe élevées [18].

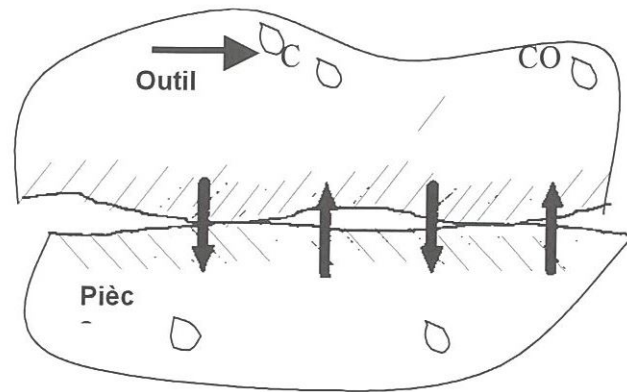


Figure I.8 Illustration de l'usure par diffusion.

#### I.6.1.4 Usure par oxydation

Aussi appelée usure par corrosion ou usure chimique, elle est causée par les réactions chimiques ou électrochimiques du matériau avec le milieu environnant. On peut la réduire en choisissant des matériaux qui résistent aux attaques du milieu environnant ou en réduisant les températures à l'interface de contact [18].

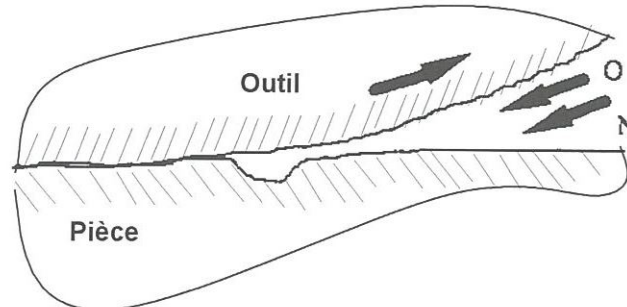


Figure I.9 Illustration de l'usure par oxydation.

#### I.6.1.5 Usure par fatigue

Elle est due à la fatigue superficielle du matériau et aux effets thermiques. La température de coupe joue un rôle très important dans l'usure des outils de coupe. Ceci a fait énoncer la loi suivante à Edward Herbert : "L'usure de l'outil n'est fonction que de la température de coupe". En effet, tous les phénomènes physiques et chimiques qui sont à la base de l'usure des outils sont étroitement liés à la température (frottement, abrasion, corrosion, diffusion).



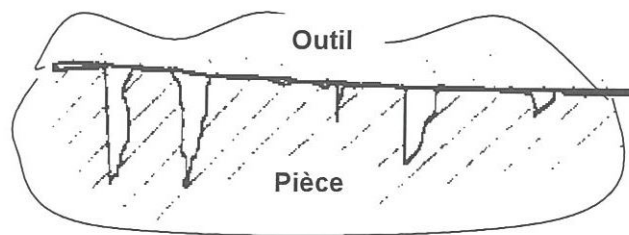


Figure I.10 Illustration de l'usure par fatigue.

### I.6.2 descriptions de l'usure des outils

Les outils de coupe sont principalement sujets à trois formes d'usure, l'usure en dépouille, l'usure en cratère et l'usure du bec de l'outil. Il est à noter que toutes les formes d'usure n'apparaissent pas toujours en même temps et que généralement, une seule forme va être prédominante [20]. Dans la pratique, l'usure en dépouille et l'usure en cratère sont les plus couramment utilisées pour quantifier l'usure de l'outil.

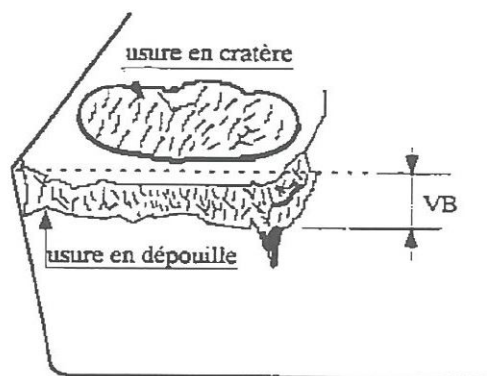


Figure I.11 Principales formes d'usure des outils.

#### I.6.2.1 L'usure en dépouille

Comme son nom l'indique, elle a lieu sur la face de dépouille de l'outil et elle est attribuée au frottement de l'outil le long de la surface usinée. L'usure en dépouille apparaît surtout lors de l'usinage à basses vitesses c'est-à-dire lors de l'usinage à faible température [20] et lors de l'usinage de matériaux ductiles ou ceux renfermant des carbures. A des vitesses de coupe élevées, l'usure en dépouille est à peu près uniforme après le taux d'usure initial. Lorsque l'usure en dépouille est uniforme, elle est facilement mesurable de façon optique sur n'importe quel point de sa largeur.

### **I.6.2.2 L'usure en cratère**

Elle est encore appelée usure de la face de coupe. Elle survient suite au frottement intense du copeau sur la face de coupe. Des particules de matière s'enlèvent continuellement sur la face de coupe formant ainsi une cuvette plus ou moins profonde appelée cratère.

Lors de l'usinage à faibles vitesses de coupe, l'usure en cratère est insignifiante devant l'usure en dépouille. Par contre à grandes vitesses de coupe, étant donné que l'usure en cratère croît avec la température, elle est fortement prédominante. Le point le plus profond du cratère apparaît approximativement au milieu de l'interface de contact outil-copeau qui correspond au point où la température est la plus élevée sur la face de coupe et les facteurs qui influencent le plus ce type d'usure sont la température à l'interface outil-copeau, les contraintes de contact et l'affinité chimique entre le matériau d'outil et le matériau usiné. Le rayon de courbure du cratère correspond au rayon du copeau [20]. L'usure en cratère est plus importante pour les outils en carbures métalliques que pour les outils en acier rapide ou en céramique [20].

### **I.6.2.3 L'usure du bec de l'outil**

Elle survient sur la pointe de l'outil de coupe par suite du frottement du bec sur le métal en voie d'usinage. On la définit souvent comme étant une continuation de l'usure en dépouille. Elle se traduit par une mauvaise qualité du fini de surface de la pièce. [21]. L'usure du bec de l'outil est généralement faible, c'est pourquoi elle est souvent négligée dans la plupart des études.

## **I.6.3 Evolution de l'usure**

L'usure en dépouille et en cratère des outils présentent une évolution caractéristique en fonction du temps de coupe. Ces usures se développent en trois phases :

Phase 1 : usure rapide, c'est la phase d'adaptation de la plaquette ;

Phase 2 : évolution lente et régulière, c'est la phase de stabilisation. Cette zone est plus ou moins grande dépendamment des conditions de coupe utilisées, et plus particulièrement de la valeur de l'avance ;

Phase 3 : usure accélérée conduisant à l'effondrement de l'outil.

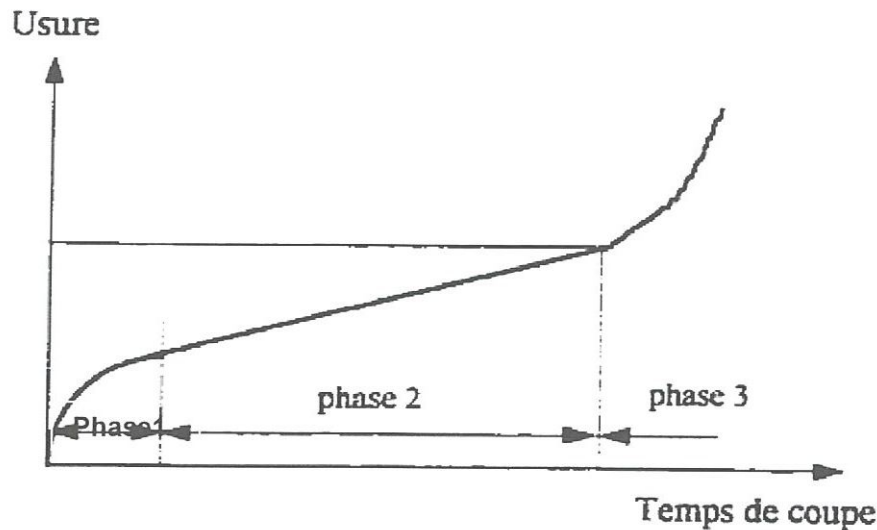


Figure I.12 Évolution de l'usure dans le temps.

#### I.6.4 Mesure de l'usure des outils

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour observer et mesurer l'usure des outils. Le choix d'une méthode donnée dépend du degré de précision désiré et des contraintes physiques sur le système.

La méthode la plus utilisée est visuelle ou tactile. La mesure des changements dimensionnels, le profil mètre ou la pesée est des méthodes plus précises. Trois grandeurs sont nécessaires pour déterminer complètement l'usure : la largeur de l'usure en dépouille la profondeur du cratère (KT) et la distance du centre du cratère à l'arête de l'outil (Figure I.13)

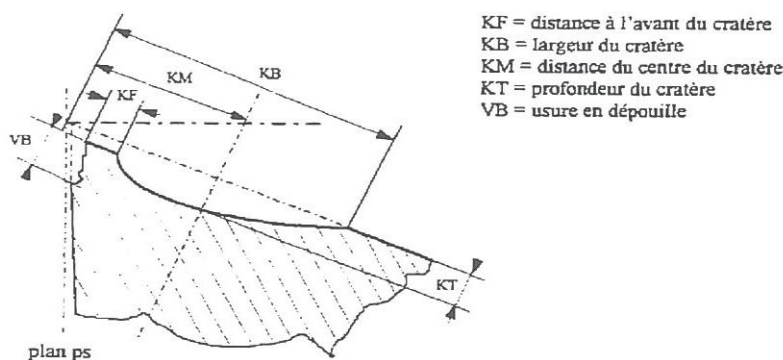


Figure I.13 critères d'usure des outils

Les dimensions du cratère ont une importance particulière, puisqu'elles ont pour on séquence l'affaiblissement continu de l'arête coupante par suite de l'affaiblissement de la section située sous l'arête de coupe.

### I.6.5 critères de durée de vie des outils

Dans la section précédente, nous avons passé en revue les différents types d'usure qui peuvent se développer lors de l'usinage. Nous nous demandons donc maintenant quelles peuvent en être les conséquences.

L'usure des outils affecte considérablement la qualité des surfaces usinées, la précision dimensionnelle et elle a une influence sur les coûts des opérations d'usinage.

Dans Machining Data Handbook [MDH] la durée de vie de l'outil est définie comme étant le temps, en minutes, pendant lequel on atteint une valeur donnée de l'usure dans des conditions de coupe bien définies. D'un point de vue purement fonctionnel, un outil peut être maintenu en service aussi longtemps qu'il continue à produire des pièces de façon satisfaisante. Toutefois, un outil peut être retiré prématurément en tenant compte de certaines considérations économiques. Suivant les contextes, la durée de vie des outils aura une signification différente et le taux d'usure également aura une signification différente selon les personnes. En 1907, TAYLOR montra que la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie de l'outil peut être exprimée de la façon suivante :

$$V_c T^n = C \quad (\text{éq I-7})$$

$V_c$  étant la vitesse de coupe et  $T$  la durée de vie de l'outil,  $C$  et  $n$  sont des constantes qui dépendent de la nature des matériaux de la pièce et de l'outil. La loi de TAYLOR ainsi énoncée permet de modifier la valeur de la vitesse de coupe en fonction de la vie souhaitée ou de calculer l'influence d'un changement de vitesse sur la durée d'une arête coupante.

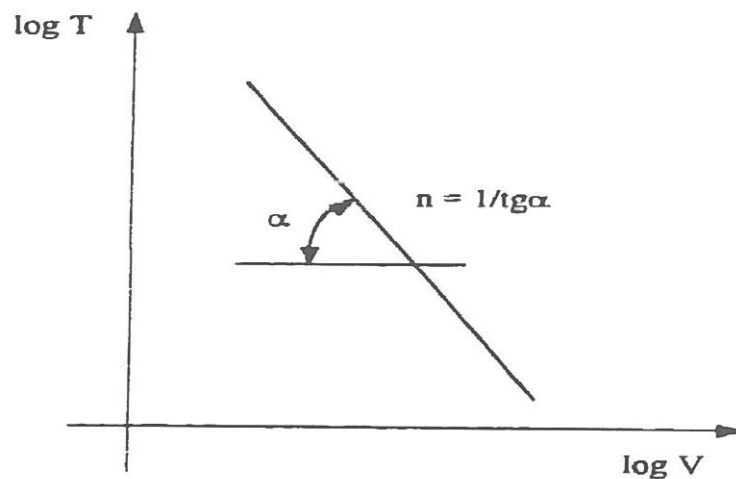
On utilise alors la relation :

$$V_1 T_1^n = V_2 T_2^n = C \quad (\text{éq I-8})$$

D'où l'on peut tirer :

$$\text{Soit : } V_2 = V_1 \left[ \frac{T_1}{T_2} \right]^n \quad (\text{éq I-9})$$

$$\text{où } T_2 = T_1 \left[ \frac{V_1}{V_2} \right]^{\frac{1}{n}}$$



**Figure I.14** Durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse d'après Taylor.

Le mode d'usure prédominant devra servir de critère pour déterminer la durée de vie de l'outil : Lorsque c'est l'usure en cratère qui est prédominante, on emploie la profondeur du cratère  $K_T$  comme critère. On peut aussi utiliser le rapport  $K = K_T/K_M$ , appelé rapport de cratère, Par contre lorsque c'est l'usure en dépouille qui prédomine, on emploie  $V_B$  ou  $V_{B_{max}}$  qui sont pris pour critère. On pourrait aussi utiliser le critère de rugosité  $R_a$  comme critère dans les travaux de finition.

### I.7 La longueur de contact outil-copeau

Sadek et al [22] définissent la longueur de contact outil-copeau comme étant la longueur de contact entre l'outil et le copeau dans la direction d'écoulement du copeau. Divers travaux rencontrés dans la littérature pertinente [22], [23] et [24] montrent que la longueur ou la surface de contact outil-copeau constitue un paramètre important de contrôle de l'usure lors de l'usinage des métaux. Takeyama et al. [24] montrent que la surface de contact outil-copeau a une influence sur l'angle de cisaillement et bien d'autres caractéristiques de coupe telles que les efforts de coupe, la rugosité de surface, la durée de vie de l'outil, la stabilité de l'outil et la température.

Takeyama et al [24] montrent également que l'effort de coupe tangentiel sur la face de coupe est proportionnelle à la surface de contact outil-copeau,

$$F_t = C + f A \quad (\text{éq I.11})$$

Avec  $f$  = coefficient de proportionnalité,  $A$  = surface de contact outil-copeau,

$C$  - Force tangentielle sur la face de coupe lorsque  $A = 0$ .

Lentz et al. [17] montrent que l'usure en cratère dépend directement de la longueur de contact entre l'outil et le copeau. Ils établissent que plus la longueur de contact est grande, plus le taux d'usure est élevé. Mondalski [17] note lors de l'étude de l'usure par fissuration thermique qu'il est possible d'améliorer la durée de vie de l'outil en faisant varier l'aire de contact du copeau sur la face de coupe de l'outil pendant l'usinage. Plusieurs méthodes sont utilisées pour améliorer l'usinage des métaux où l'objectif des concepteurs d'outils étant en général de produire des copeaux acceptables et de réduire les efforts de coupe. La plupart d'entre elles conduisent à la réduction de la surface de contact outil-copeau. Nous pouvons par l'utilisation d'un fluide de coupe qui permet de séparer le copeau de la face de coupe, l'utilisation d'un angle de coupe positif a fin de créer une surface de contact plus petite et par la croissance de la vitesse de coupe qui réduit la surface de contact par une localisation de l'effort de cisaillement due à une déformation plastique adiabatique [11].

Les facteurs qui influencent la longueur de contact outil-copeau sont:

- ❖ les paramètres de coupe
  - a) lorsque la vitesse de coupe augmente la longueur de contact décroît,
  - b) la longueur de contact augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance.
- ❖ la géométrie de l'outil de coupe notamment l'angle de coupe et le rayon du bec de l'outil,
- ◆ le matériau d'outil, le matériau de revêtement et le matériau usiné : la longueur de contact est plus grande avec un outil non revêtu qu'avec un outil revêtu. De plus la longueur de contact décroît avec l'augmentation du pourcentage en carbone dans la pièce.
- ◆ Le fluide de coupe utilisé,
- ◆ Le mode d'usinage utilisé.

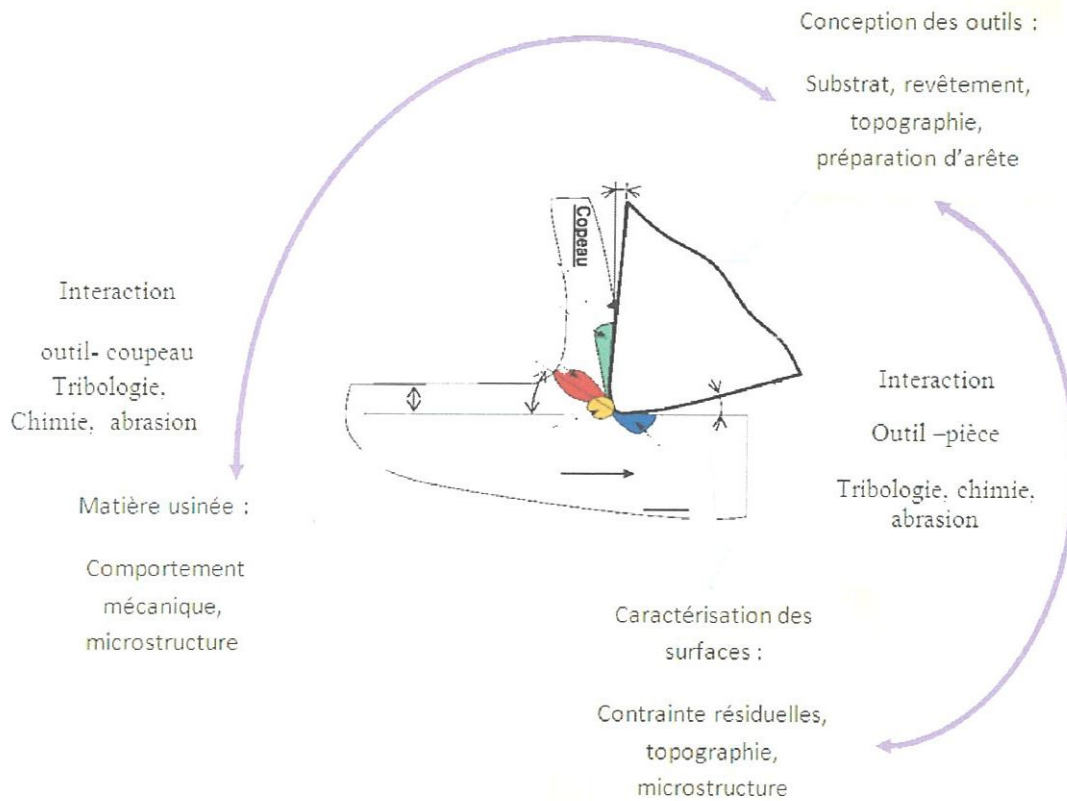
Par contre, la longueur de contact outil-copeau peut avoir une grande influence sur:

- ◆ La durée de vie de l'outil: une réduction de la longueur de contact, par exemple par l'utilisation des outils à contact réduit, diminue de façon significative l'usure en dépouille,
- ◆ La forme des copeaux,
- ◆ La température dans la zone de coupe,
- ◆ Les efforts de coupe,
- ◆ La stabilité de l'outil,
- ◆ Le fini de surface, etc.

Dans la conclusion à leurs travaux, SADIK et al. [22] montrent que parmi les différents paramètres de coupe, l'avance est celui qui a la plus grande influence sur la longueur de contact outil-copeau.

Ils montrent également que l'usure en dépouille est fonction de la longueur de contact outil-copeau et du temps d'engagement de l'outil. Une réduction de la longueur de contact outil-copeau réduit à la fois l'usure en dépouille, l'effort de coupe tangentielle et la température à l'interface outil-copeau. Ils font toute fois remarquer que si la longueur de contact est excessivement réduite (plus de 65%) on observe plutôt les effets contraires.

Un ensemble de chercheurs [25] montrent par la modélisation des phénomènes physiques lors d'une opération d'usinage, que les enjeux majeurs se situent dans la compréhension des interactions mécaniques-tribologiques chimiques aux interfaces pièce-outil-copeau (figure I.15).



**Figure I.15** Interactions Pièces-Outil-Matière en usinage



# Introduction

## Etude et analyse bibliographique

## **Matériaux et technique expérimentale**

- II.1 Introduction
- II.2 Matériels utilisé
  - II.2.1 Machine-outil
  - II.2.2 Matériau utilisé pour les essais d'usinage
  - II.2.3 Traitement thermique des éprouvettes
  - II.2.4 Plaquette de coupe
  - II.2.5 Porte outil
  - II.2.6 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe
  - II.2.7 Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille
  - II.2.8 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité
- II.3 Planification des expériences
- II.4 Conditions expérimentales
- II.5 Conclusion

## Résultats expérimentaux

## Analyse et discussion des résultats

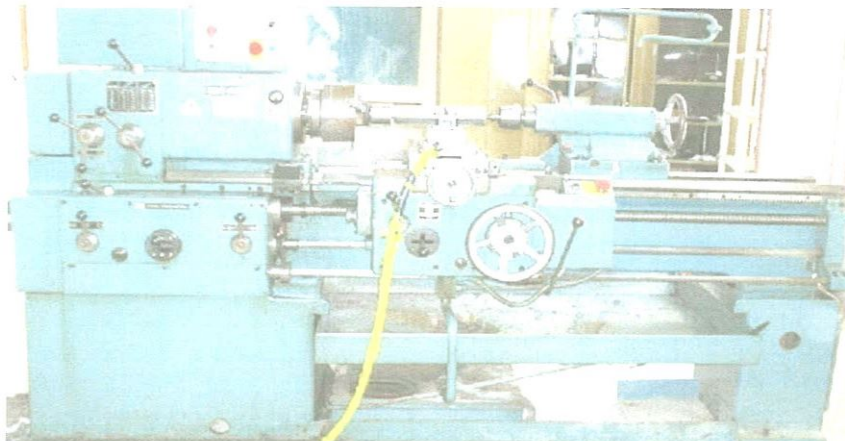
## II.1 introduction :

Les essais d'usinage de l'acier 42CrMo4, nécessaires à la réalisation de notre projet, ont été effectués au laboratoire de mécanique et structure à l'université 8 Mai 1945 de Guelma.

## II.2 Matériels utilisés :

### II.2.1 Machine-outil :

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40C (figure II-1) il procède une puissance sur la broche égale à 6.6KW, les fréquences de rotation disponibles suivantes : (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min et 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.



*Figure II-1. Tour parallèle modèle SN 40C*

### II.2.2 Matériau des pièces utilisées pour les essais d'usinage :

C'est un acier pour trempe à l'huile de sections moyennes ou fortes sous fortes contraintes. Il est utilisé parfois comme pièce trempées superficiellement.

Il est largement utilisé pour la fabrication de pièces à forte ou moyenne section ; tels que arbres, vilebrequins, engrenages, fusées à pivot, crémaillères, bielles hautement sollicitées, pignonnerie carbonitrurée et crochets de traction pour tracteur [26] .

Pour nos essais, nous avons usiné des éprouvettes de diamètre  $\Phi = 80\text{mm}$  et de longueur  $L = 400\text{ mm}$  (*Figure II-2*).

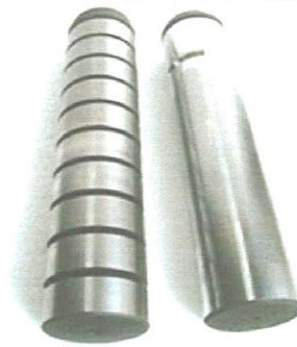


Figure II-2. Éprouvettes utilisées

La composition chimique de l'acier 42CrMo4 est représentée dans le *tableau II-1*:

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

Éléments	Pourcentage (%)
Carbone	0.43
Chrome	1.10
Molybdène	0.19
Vanadium	0.005
Silicium	0.24
Manganèse	0.79
Soufre	0.024
Cuivre	0.025
Aluminium	0.029
Titane	0.004
Niobium	0.001
Nickel	0.022
Etain Sn	0.002
Fer	96.315

Tableau II-1. Composition chimique de l'acier 42 CrMo4

### II.2.3 Traitement thermique des éprouvettes :

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	Traitement thermique		Temps de maintien
		trempe	Revenu	
42CrMo4	26HRC	850°C	500°C	45 minutes

*Tableau II-2. Conditions de traitement thermique*

Les traitements thermiques des éprouvettes ont été réalisés dans un four à gaz pour atelier de production (ENCYCMA), Guelma.

### II.2.4. Plaquettes de coupe :

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée. Certaines sont à fixation par trou central et d'autres par bride. Toutes les informations relatives aux plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau II-3 .

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Composition
Carbure métallique H13A	H13A	SNMG12-04-08-QF	Tricarbure 82%WC,8%Co,7%TaC et 3%TiC
Carbure métallique Revêtu Ti (CN)/ Ti N	GC3015 Sandvik	SNMA12-04-08-PF	Monocarbure 92%WC et 8% Co
Cermet Revêtu PVD TiC/TiN	GC1525 Sandvik	SNMG 12-04-08-MF	Carburecémenté + particules de carbonitruure de titane Ti(C,N)
Céramique Mixte	CC650 Sandvik	SNGN12-04-08 T01020	(70% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30% TiC) (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TIC)
Céramique verte	CC670	SNGN12-04-08 T01020	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiC <sub>w</sub>

*Tableau II-3. Informations relatives aux matériaux de coupe utilisés*

**Carbure H13A** : nuance de carbure non revêtu avec bonne résistance à l'usure par abrasion et a une bonne tenacité. Il est recommandé pour les opérations de semi-finition et ébauche des aciers réfractaires et des alliages de titane.

**Cermet GC1525** : Nuance cermet à revêtement PVD, qui possède une excellente résistance à l'usure et bonne ténacité d'arête. Il est utilisé pour la finition et la semi-finition des aciers bas carbone et faiblement alliés. Son utilisation est recommandée chaque fois qu'une bonne qualité de surface est requise pour des vitesses de coupe moyennes à élevées [27].

**Carbure GC3015** : Nuance de carbure métallique revêtue d'une couche d'épaisseur moyenne sur une couche épaisse de Ti (CN), ce qui assure une adhérence du revêtement et une excellente résistance à l'usure pour l'usinage de la fonte. La mince couche extérieure de Ti N colore la nuance en jaune pour faciliter la détection de l'usure. Le substrat supporte des températures élevées sans se déformer ce qui donne de bonnes propriétés pour l'usinage de la fonte de l'ébauche à la finition avec des vitesses élevées [28].

**Céramique CC650** : Nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnée de carbure de titane, principalement recommandée pour l'usinage de finition des fontes et des superalliages réfractaires, requérant une bonne résistance à l'usure associée à de bonnes propriétés thermiques.

**Céramique CC670** : C'est une nuance céramique à base d'oxyde d'aluminium renforcée de fibres de carbure de silicium (whiskers). Dans l'ensemble, elle a une excellente ténacité [27].

Elle est recommandée en premier lieu pour les superalliages réfractaires dans des conditions défavorables.

### II.2.5 Porte outil :

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux portes outils. Un à fixation mécanique des plaquettes par trou central et l'autre par bride. (Tableau II-4).

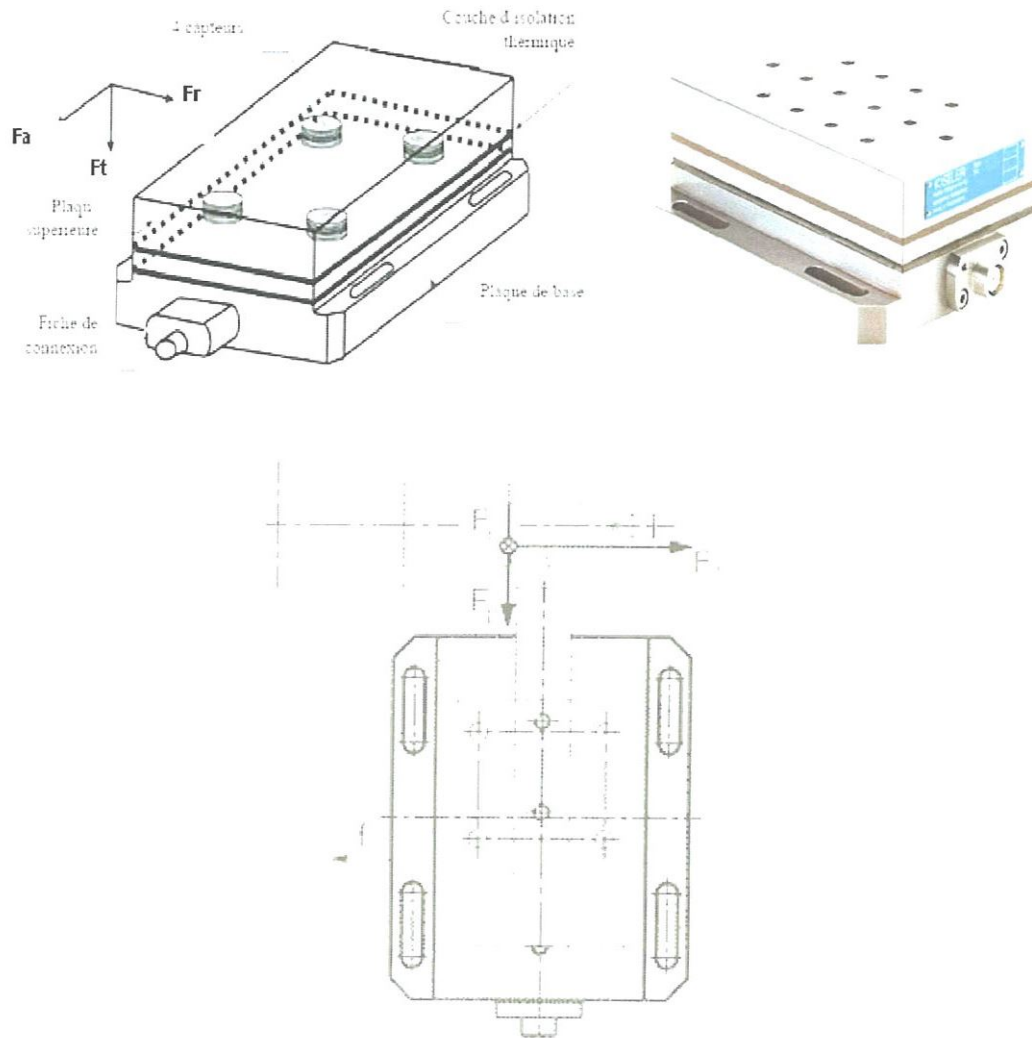
Désignation	Marque	$\alpha$	$\gamma$	$\kappa r$	$\lambda$
PSBNR 25×25 M12	TIZIT SIMPLEX	6°	-6°	75°	-6°
CSBNR25×25 M12	TIZIT SIMPLEX	6°	-6°	75°	-6°

*Tableau II-4. Caractéristiques des porte- plaquettes utilisés.*

### II.2.6 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe :

Nous avons utilisé une plate forme (*KISTLER*). Elle est considérée parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on cite: le dynamomètre, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou 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 reçoit le mouvement d'avance. Ce dernier est monté sur la plateforme, 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. Car elle est constituée de quatre capteurs en quartz (figure II-3). Les deux portes outils sont employés pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26. Les forces qui agissent sur la plaque du dynamomètre lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. et sont ensuite acquies 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 :  
Force axiale :  $F_x$  ( $F_a$ ) ; Force radiale :  $F_y$  ( $F_r$ ) ; Force tangentielle :  $F_z$  ( $F_t$ ).



**Figure II-3.** Plateforme KISTLER.

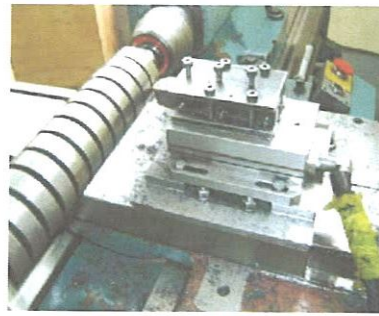
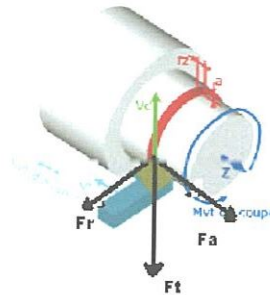


Plate forme Kistler modèle 9257 B



Détermination des trois composantes de l'effort de coupe



Traceur



Amplificateur multicanaux



Ordinateur PC avec logiciel dynoware

Figure II-4 Chaîne de mesure des efforts de coupe

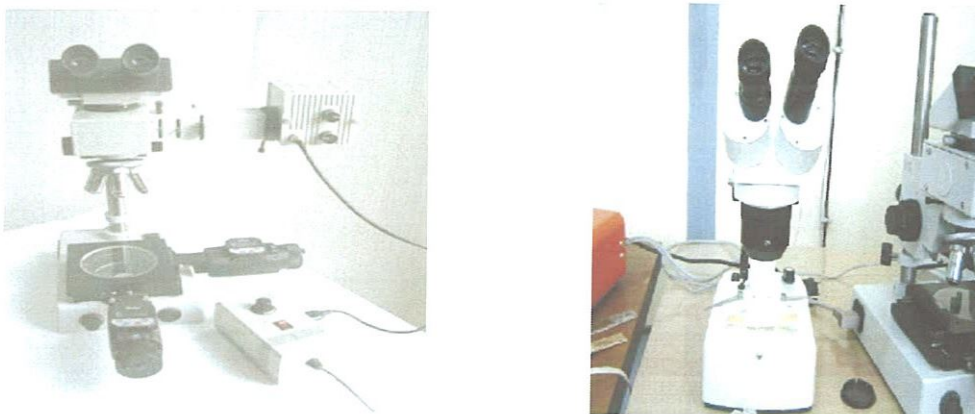


Les caractéristiques de la chaîne sont :

- ◆ grande rigidité, fréquence propre très élevée.
- ◆ large gamme de mesure.
- ◆ bonne linéarité, sans hystérésis.
- ◆ faible interaction (<1%).
- ◆ résistant au lubrifiant selon mode de protection IP67.
- ◆ câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre).
- ◆ amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe.

### II.2.7 Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille :

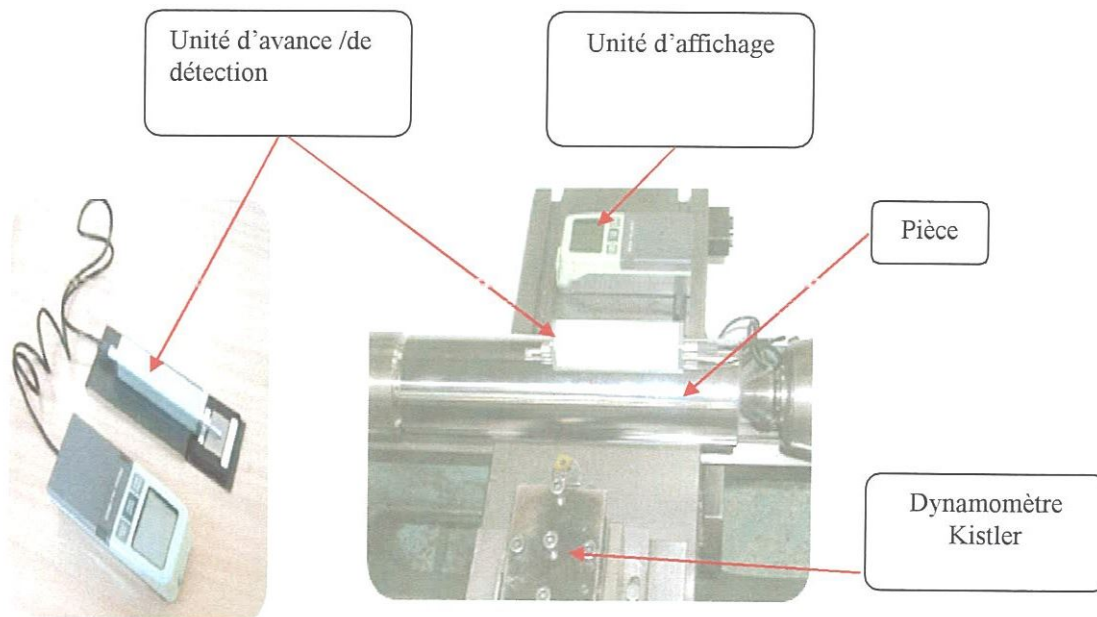
Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) est du type HUND (W AD). La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0.001mm. La ligne de référence 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 (figure II-5).



*Figure II-5. Microscopes pour la mesure de l'usure*

### II.2.8 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité :

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 301 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante de profil de rugosité (figure II-6). Il est constitué d'un palpeur en diamant, 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.



*Figure II-6. Mesure de rugosité sans démontage de la pièce*

### II.3. Planification des expériences :

Les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité, ... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant deux méthodes de planification des expériences qui sont, la méthode uni factorielle et la méthode multifactorielle.

#### a) Méthode uni factorielle :

Cette méthode est indispensable lorsqu'il s'agit de caractériser l'action d'un seul facteur  $X$  sur un paramètre  $Y$ . Pour cela, on donne une série de valeurs discrètes au facteur examiné  $X$  [ $X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$ ] tout en maintenant tous les autres facteurs constants (tableau II-5).

Pour chaque  $X=X_i$ , on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de  $Y_i$ , ( $i = 1 \div N$ ). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation  $Y = f(X)$ .

N° des essais	Facteur variable	Paramètre de sortie						
		X	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	-	Y <sub>k</sub>	-	Y <sub>n</sub>
1	X <sub>1</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>	-	Y <sub>k1</sub>	-	Y <sub>n1</sub>	Y <sub>moy1</sub>
2	X <sub>2</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>22</sub>	-	Y <sub>k2</sub>	-	Y <sub>n2</sub>	Y <sub>moy2</sub>
3	X <sub>3</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>23</sub>	-	Y <sub>k3</sub>	-	Y <sub>n3</sub>	Y <sub>moy3</sub>
i	X <sub>i</sub>	Y <sub>1i</sub>	Y <sub>2i</sub>	-	Y <sub>ki</sub>	-	Y <sub>ni</sub>	Y <sub>moyi</sub>
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X <sub>N</sub>	Y <sub>1N</sub>	Y <sub>2N</sub>	-	Y <sub>kN</sub>	-	Y <sub>nN</sub>	Y <sub>moyN</sub>

**Tableau II-5.** Réalisation d'essais d'après la méthode unifactorielle

### b) Méthode multifactorielle :

Cette méthode 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 ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante :

$$N = q^k \quad \text{éq II-1}$$

Où ;

N : Nombre d'essais ; q : Nombre de niveau de variations des facteurs de base et k : Nombre des facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ( $k=3$ ) et chaque facteur à deux niveaux de variation un niveau supérieur (+1) et un niveau inférieur (-1). Nous avons alors :  $N=2^3=8$

Les résultats représentés dans les tableaux des deux chapitres III et IV sont sous la forme du tableau II-6, sont analysés par le logiciel MINITAB 15 en appliquant l'analyse de Surface des Réponses. L'objectif de cette étude est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les efforts de coupe, l'usure en dépouille VB et la rugosité.

Niveau de facteurs	Valeurs naturelles des facteurs		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	a <sub>p</sub> (mm)
Niveau supérieur (+1)	Valeur maximale	Valeur maximale	Valeur maximale
Niveau inférieur (-1)	Valeur minimale	Valeur minimale	Valeur minimale
N° des essais	Valeurs codifiées des facteurs		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

**Tableau II-6.** Matrice de planification pour un plan 2<sup>3</sup>

#### II.4 Conditions expérimentales :

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe (Vc, f et a<sub>p</sub>), 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-7 à II-10. Tous les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification.

Pour les matériaux de coupe GC3015; H13A et GC1525, les conditions de coupe utilisées sont regroupés dans le tableau II-7.

Paramètres constants	Valeurs	paramètres variables	valeurs
Vc (m/min)	45	f (mm/tr)	0,08 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,24.
a <sub>p</sub> (mm)	0,25		
Vc (m/min)	45	a <sub>p</sub> (mm)	0.1; 0.25; 0.3; 0.4; 0.5.
f (mm/tr)	0,08		
a <sub>p</sub> (mm)	0,25	Vc (m/min)	20; 30; 45; 60; 80.
f (mm/tr)	0,08		

**Tableau II-7** Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe, et de rugosité  
Pour (GC3015; H13A; GC1525)

Pour les matériaux de coupe CC650; CC670 Les conditions de coupe utilisées sont regroupés dans le tableau II-8.

Paramètres constants	Valeurs	Paramètres variables	valeurs
Vc (m/min)	120	f (mm/tr)	0,08 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,24.
a <sub>p</sub> (mm)	0,25		
Vc (m/min)	120	a <sub>p</sub> (mm)	0.1; 0.25; 0.3; 0.4; 0.5.
f (mm/tr)	0,08		
a <sub>p</sub> (mm)	0,25	Vc (m/min)	60; 80; 120;180;230;320.
f (mm/tr)	0,08		

**Tableau II-8** Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe, et de rugosité  
Pour (CC650; CC670) (b)

Les essais d'usure des cinq matériaux de coupe testés ont été réalisés dans les conditions suivantes :

Conditions de coupe	Vc (m/min)	f (mm/tr)	a <sub>p</sub> (mm)
Pour les cinq matériaux de coupe	90	0,08	0,25

**Tableau II-8.** Conditions de coupe pour les essais d'usure.

Les essais réalisés, selon la méthode de planification des expériences, ont été effectués conformément à la plage de variation des facteurs suivante :

Conditions de coupe	Vc (m/min)	f (mm/tr)	a <sub>p</sub> (mm)
(GC3015; H13A; GC1525)	20 - 60.	0,08 - 0,16.	0,25 - 0.5.
(CC650; CC670)	90 -180	0.08 - 0.16	0.25 - 0.5

**Tableau II-9.** Intervalle de variation de facteurs selon la matrice de planification des expériences.

## II. 5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le matériel utilisé (machine-outil, éprouvettes, plaquette de coupe, porte-outil, dynamomètre, microscope optique, rugosimètre). La planification des expériences et les conditions de coupe ont été également illustrées.

# Introduction

Etude et analyse bibliographique

Matériaux et technique expérimentale

## **Résultats expérimentaux**

- III.1. Introduction
- III.2. Evolution de la rugosité
- III.3. Evolution des efforts de coupe et des pressions spécifiques
- III.4. Evolution de l'usure
- III.5. Conclusions de l'analyse expérimentale de la coupe

---

Analyse et discussion des résultats

---

### III.1. Introduction

Les essais effectués sur l'acier 42CrMo4, traité à 50HRC, usiné par deux ensembles d'outils. Le premier ensemble comprend les outils en carbure H13A; GC3015 et le cermet GC1525 et le deuxième comprend les outils en céramique CC650 et CC670. Ils ont permis d'étudier l'évolution de la rugosité des éprouvettes usinées et des efforts en fonction des paramètres de coupe ( $V_a$ ,  $f$  et  $a_p$ ).

### III.2. Evolution de la rugosité de surface

La caractérisation de la qualité de surface usinée a été limitée aux critères de rugosité totale (Rt), moyenne arithmétique (Ra) et moyenne des hauteurs des irrégularités (Rz).

#### III.2.1. Effet de la vitesse de coupe sur les critères de rugosité.

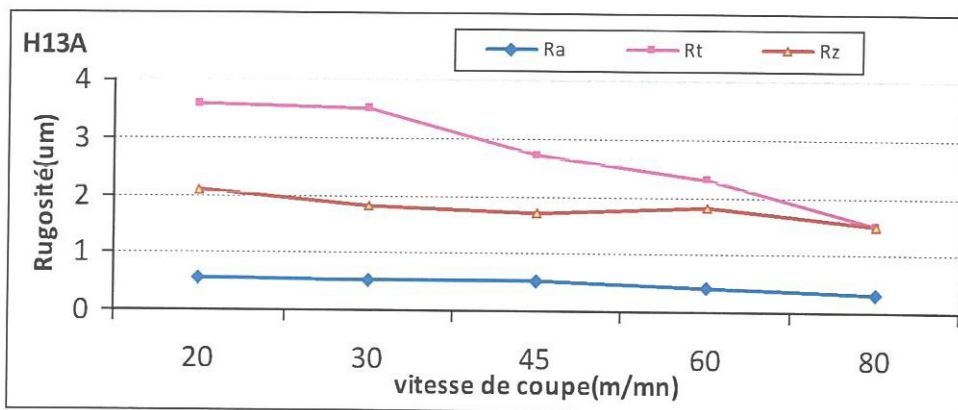


Figure III-1.a Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec H13A pour  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$

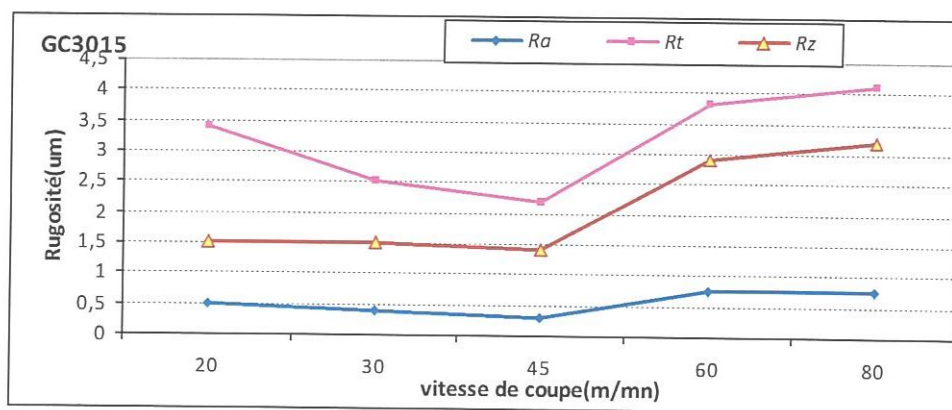


Figure III-1. b Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec la nuance GC3015 pour  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$



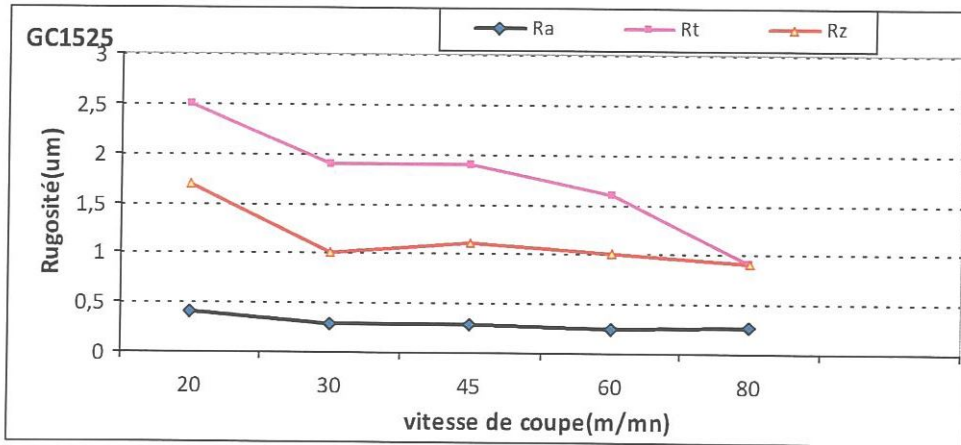


Figure III-1. c Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec la nuance GC1525 pour  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$

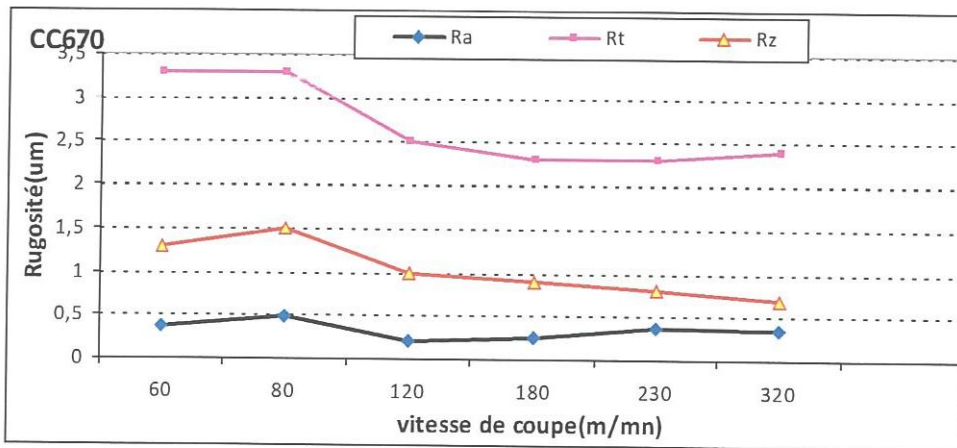


Figure III-1. d Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec la nuance CC670 pour  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$

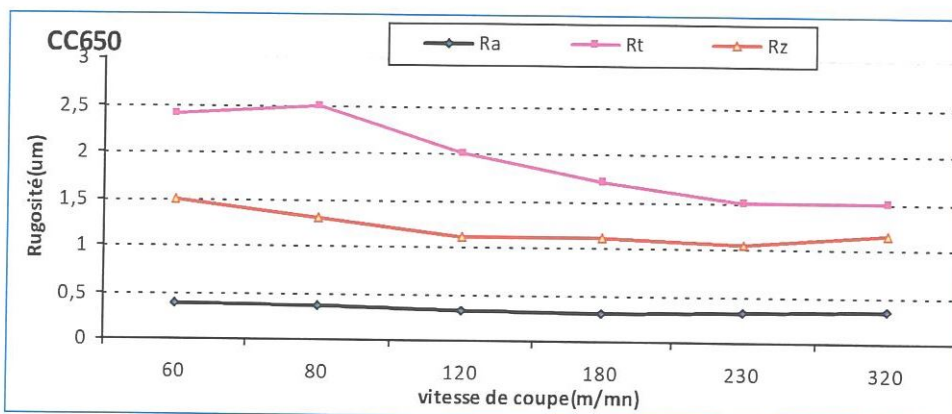
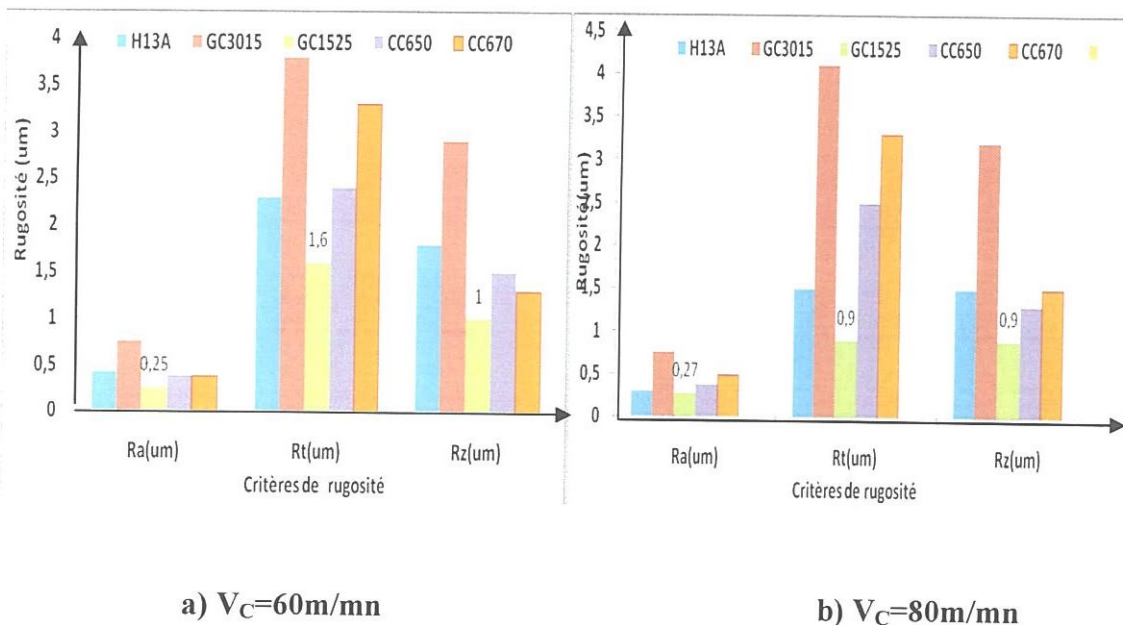


Figure III-1. e Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec la nuances CC650 pour  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$

Les figures III-1 illustrent l'influence de la vitesse de coupe sur les différents critères de la rugosité lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4. L'analyse montre que l'état de la surface s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Les trois courbes des critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) présentent une décroissance lorsque  $V_c$  augmente. Ces courbes montrent qu'à des vitesses de coupe inférieures à 45m/min, les critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) chutent successivement de (10 ; 11.11 et 23.5)% pour la nuance H13A ; de (66.66 ; 54.54 ; 7) % pour la nuance de coupe GC3015 ; de (11 ; 31.57 ; 54.54) % pour le cermet GC1525. Dans la deuxième zone, la pente de la rugosité s'établit légèrement à cause de la diminution des efforts de coupe traduisant une stabilité relative du système usinant. On peut expliquer cette stabilité de l'inclinaison de la courbe qui revient à la faible déformation de la pièce pour des vitesses plus élevée (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 valeurs de la rugosité diminuent) [29]. Sauf ici pour le cas de la nuance GC3015 on a constaté que la rugosité augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe, ceci peut être dû à l'augmentation de l'usure qui fait dégrader l'état de surface. On a enregistré aussi une diminution des valeurs de rugosité de (76.19 ; 32 ; 30) % pour la céramique CC670 et de (6.25 ; 20.0 ; 36.36) % pour la nuance CC650.



**Figure III-2 (a et b).** Effet du matériau à outil sur la rugosité de la surface usinée à différentes vitesses de coupe ( $f=0.08$ mm/tr,  $a_p=0.25$  mm).

Les figures III-2 (a et b) montrent la différence entre les rugosités de surface des différents matériaux. On a constaté que le cermet GC1525 donne de bonne qualité de surface pour les deux vitesses choisies puis au deuxième lieu la céramique CC650

**III.2.2. Effet de l'avance sur la rugosité de la surface usinée.**

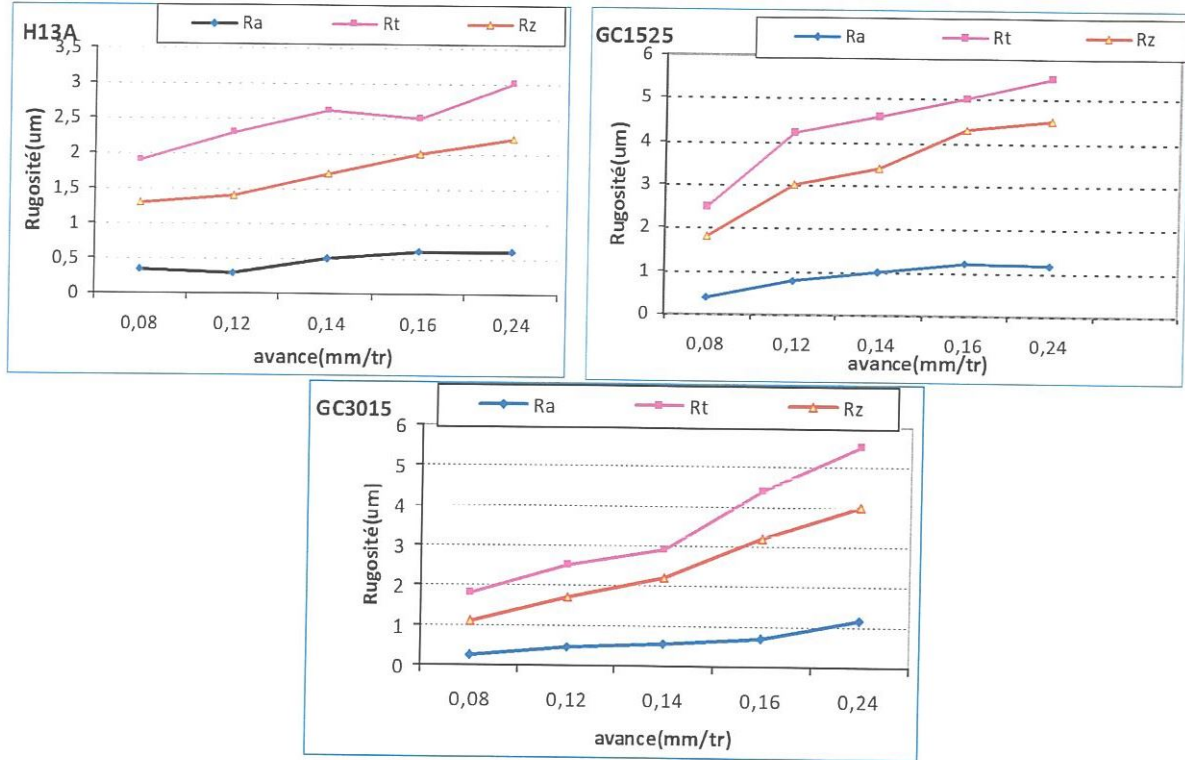


Figure III-3. a. Evolution de la rugosité en fonction de l'avance pour les 3 matériaux à outil en carbures avec  $V_c=45m/mn$  et  $a_p=0.25mm$

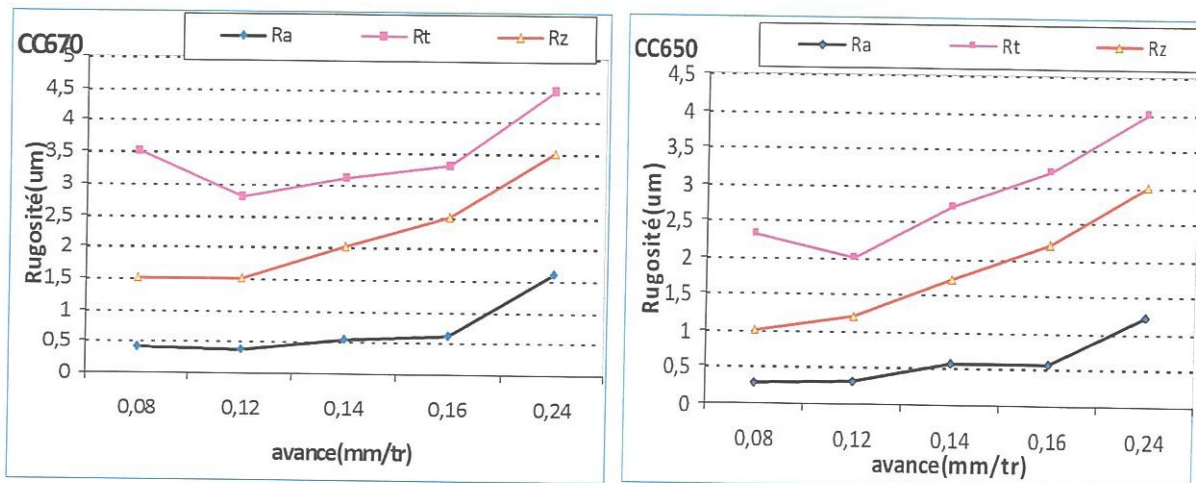
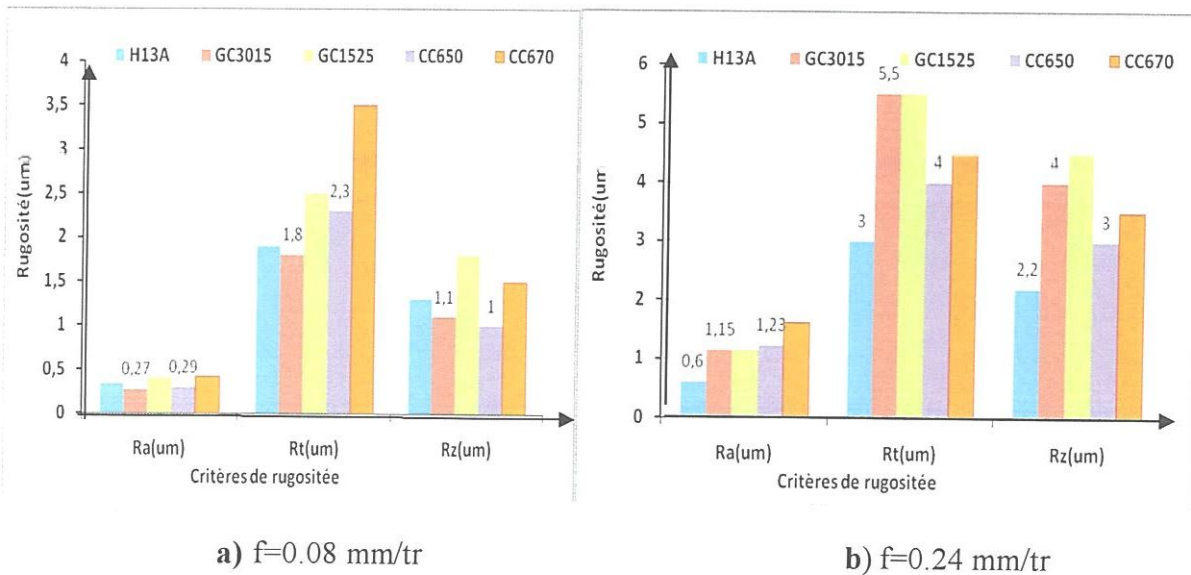


Figure III-3. b. Evolution de la rugosité en fonction de l'avance pour les 2 matériaux à outil en céramiques avec  $V_c=120m/mn$  et  $a_p=0.25mm$

Les figures III-3(a et b), III-4 (a et b) montrent que l'avance a une influence très significative sur la rugosité, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux résultants de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal pièce-outil. Ces sillons sont plus profonds et plus larges que l'avance est élevée. 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, conduit a une augmentation des critères de rugosité (Ra, Rt et Rz) successivement de (81.81 ;57.89 ;69.23)% pour le carbure H13A , (187.5 ;120.0 ;150)% pour le cermet GC1525, (325.92 ;205.55 ;263.63)% pour le carbure GC3015,(292.68 ;28.57 ;133.63) % pour la céramique CC670 et de (324.94 ;73.91 ;200.0) % pour la céramique CC650. On remarque que le critère Ra est le plus affecté par l'avance.



**Figure III- 4 (a et b).** Effet du matériau à outil sur la rugosité de la surface usinée à différentes vitesses d'avance ( $V_c = 45\text{m/mn}$ ,  $a_p = 0.25\text{ mm}$  pour les nuances H13A ; GC1525 et GC3015) ; ( $V_c = 120\text{m/mn}$ ,  $a_p = 0,25\text{mm}$  pour les céramiques CC650 et CC670).

Les figures III- 4 (a et b) illustrent la différence des rugosités des différents matériaux à outil. Le rapport entre les valeurs de rugosité (Ra, Rt et Rz) de la figure (b) sur les valeurs de rugosité de la figure (a) successivement de (1.81 ;1.57 ;1.69) pour le carbure H13A , (4.26 ;3.05 ;3.63) pour le carbure GC3015, (2.87 ;2.2 ;2.5) pour le cermet GC1525, (4.24 ;1.73 ;3) pour la céramique CC650 et de (3.92 ;1.28 ;2.33) pour la céramique CC670.

III.2.3. Effet de la profondeur de passe sur la rugosité de la surface usinée.

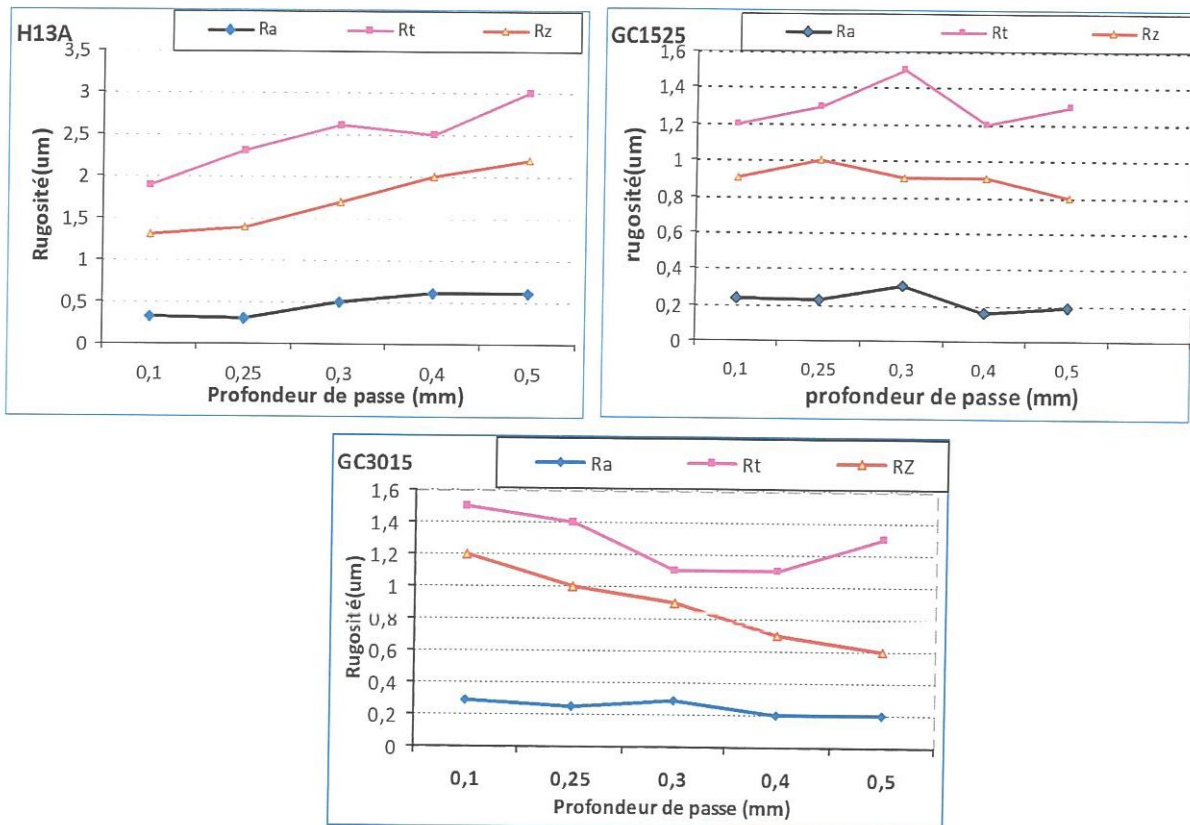


Figure III-5. a. Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour les 3 matériaux à outil testés avec  $V_c=45m/mn$  et  $f=0,08mm/tr$

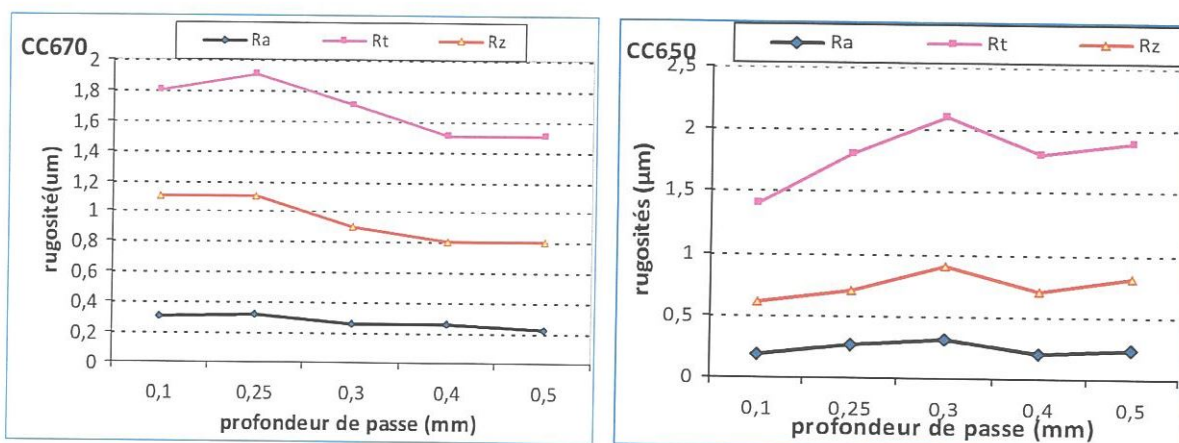


Figure III-5. b. Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour les 2 matériaux à outil testés avec  $V_c=120m/mn$  et  $f=0.08mm/tr$

Les figures III-5 (a, b) montrent l'évolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe. Toutes les courbes de la rugosité montrent 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 0, 1 à 0,5mm, on enregistre une augmentation de (Ra, Rt et Rz) pour les nuances (H13A et CC650) respectivement de (81.81 et 27.77) % pour Ra, (57.89 et 35.71) % pour Rt et de (69.23 et 33.33) % pour Rz. Par contre une légère diminution de (Ra, Rt et Rz) pour les nuances (GC1525 ; GC3015 ; CC670) respectivement de (20.83; 31.03; 25.8) % pour Ra, (08.33 ; 13.33 ; 16.67) % pour Rt et de (11.11 ; 50.0 ; 27.27) % pour Rz.

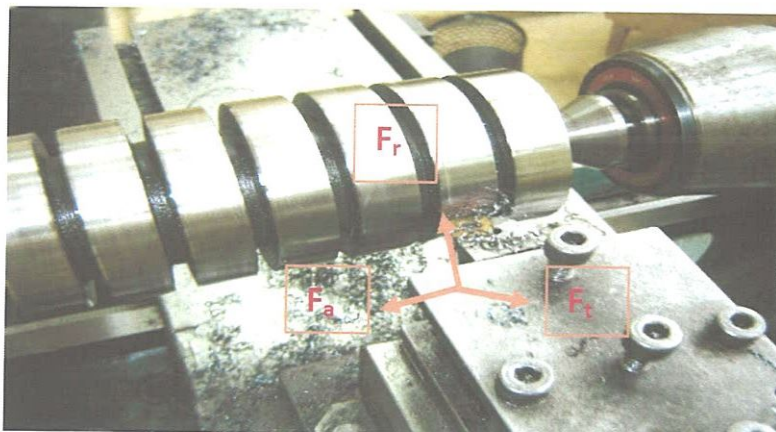
### III.3. Evolution des efforts de coupe et de la pression spécifique

Le but de cette partie est de déterminer l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe, l'effort résultant et la pression spécifique en fonction des paramètres principaux de coupe. La pression spécifique de coupe ( $K_i$ ), définie comme étant l'effort tangentiel, l'effort radial et l'effort axial ramené à la section du copeau non déformé, a été déterminée en utilisant

l'équation suivante :

$$K_i = \frac{F_i}{f a_p} \quad \text{éq III-1}$$

$K_i$  : Pression de coupe [MPa], avec ;  $i = (a, r \text{ et } t)$ ,  $F_a$  : Effort axial [N] ;  $F_r$  : Effort radial [N]  
 $F_t$  : Effort tangentiel [N] ;  $f$  : Avance [mm/tr] ;  $a_p$  : Profondeur de passe [mm].



*Figure III-6. Configuration expérimentale pour l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur l'effort de coupe*

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage (figure III-6).

La résultante de coupe  $F_R$ , peu utilisée en pratique est la somme de 3 composantes :

$$F_R = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \quad \text{eq III-2}$$

La configuration d'essais sur la machine de tour : L'outil est fixé sur platine dynamomètre de mesure d'efforts dont le principe de mesure est basé sur l'utilisation de quartz piézoélectriques, elle-même liée à la table de tour, et la pièce est entraînée en rotation grâce au mouvement de la broche de la machine.

### III.3.1. Effet de la vitesse sur les efforts et la pression de coupe

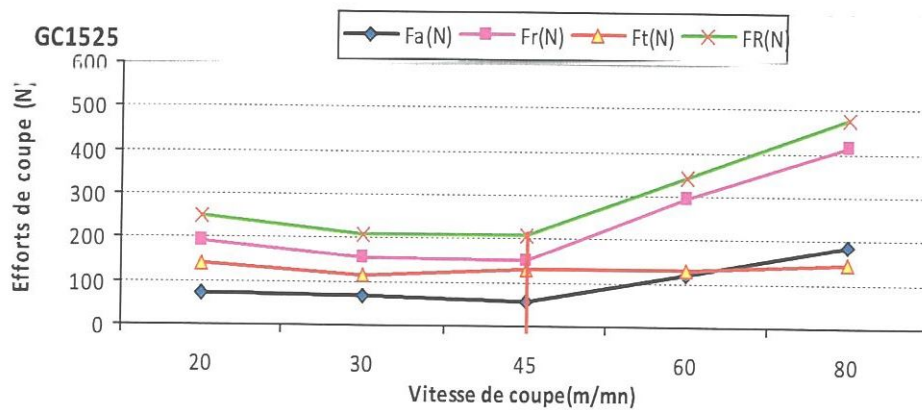


Figure III-7.a Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe pour la nuance GC1525

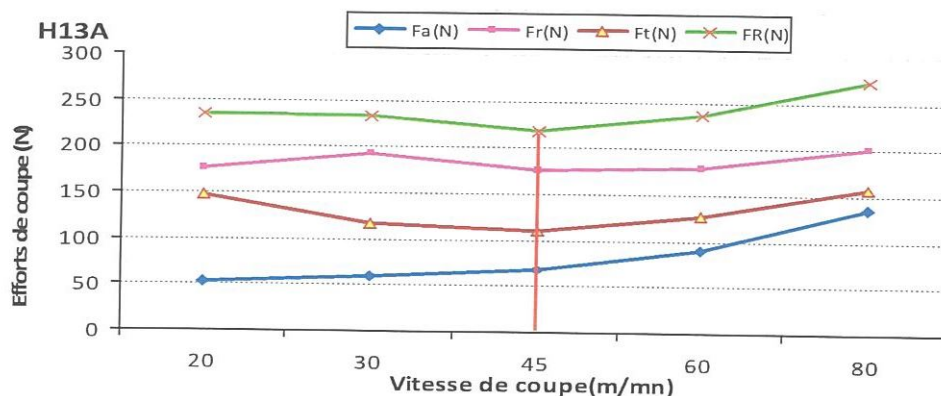


Figure III-7. b Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe pour la nuance H13A

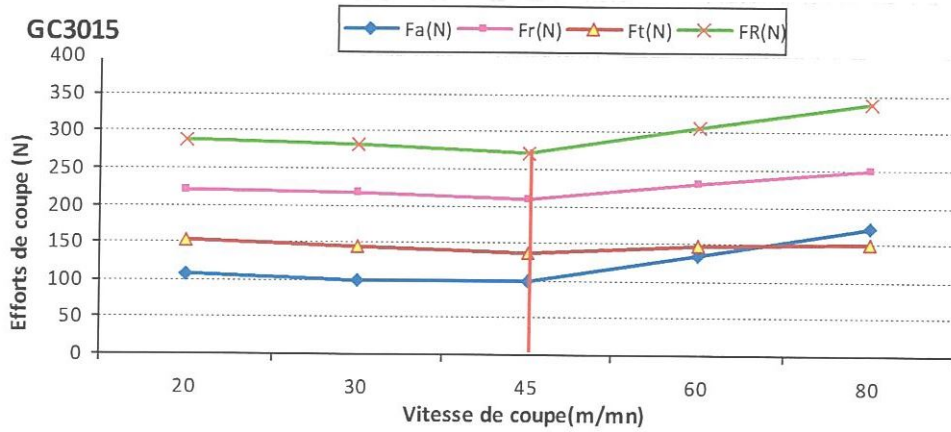


Figure III-7. c Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe pour la nuance GC3015

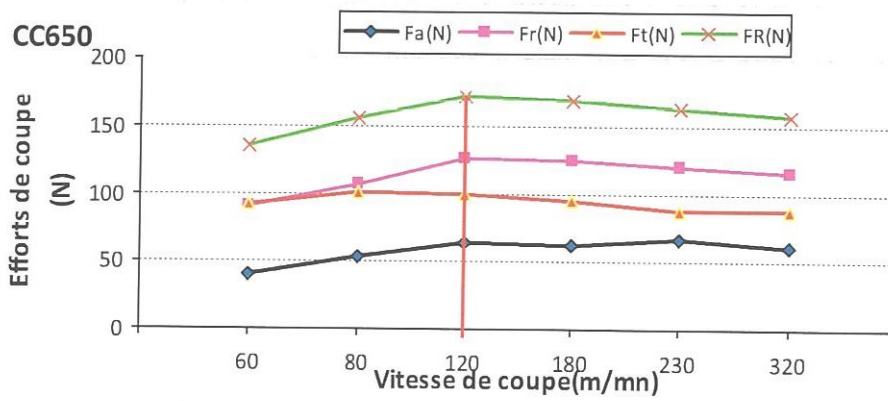


Figure III-7. d Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe pour la nuance CC650

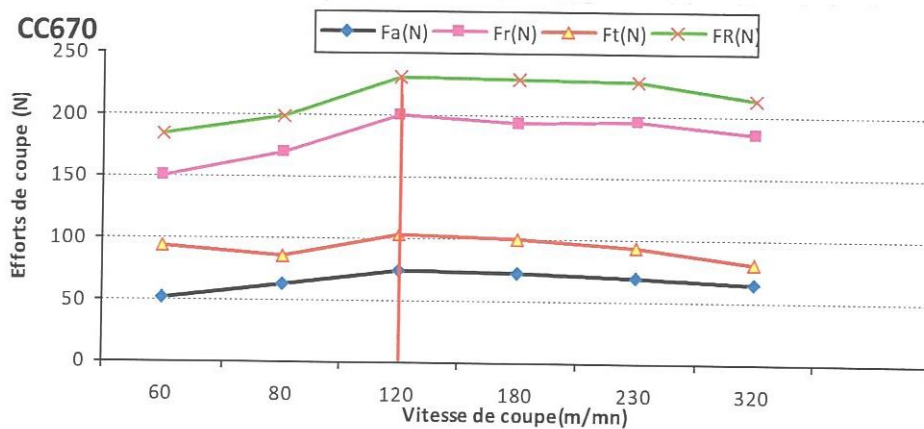


Figure III-7. e Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe pour la nuance CC670



Les figures III-7 montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les cinq matériaux testés. Dans le cas des carbures les efforts présentent une décroissance jusqu'à la vitesse de coupe de 45 m/mn puis une légère augmentation avec des pentes différentes à cause de l'usure en dépouille accéléré. Ceci montre que lorsqu'on travaille à des vitesses au dessous de 45m/mn et avec ( $f$ ;  $a_p$ ) constants on est dans le domaine de fonctionnement de ces outils de coupe, ce qui explique Le concept couple outil -matière [30].

Mais on a remarqué pour les trois nuances un léger changement de l'allure vers l'augmentation à cause de l'usure en dépouille accéléré de ces matériaux.

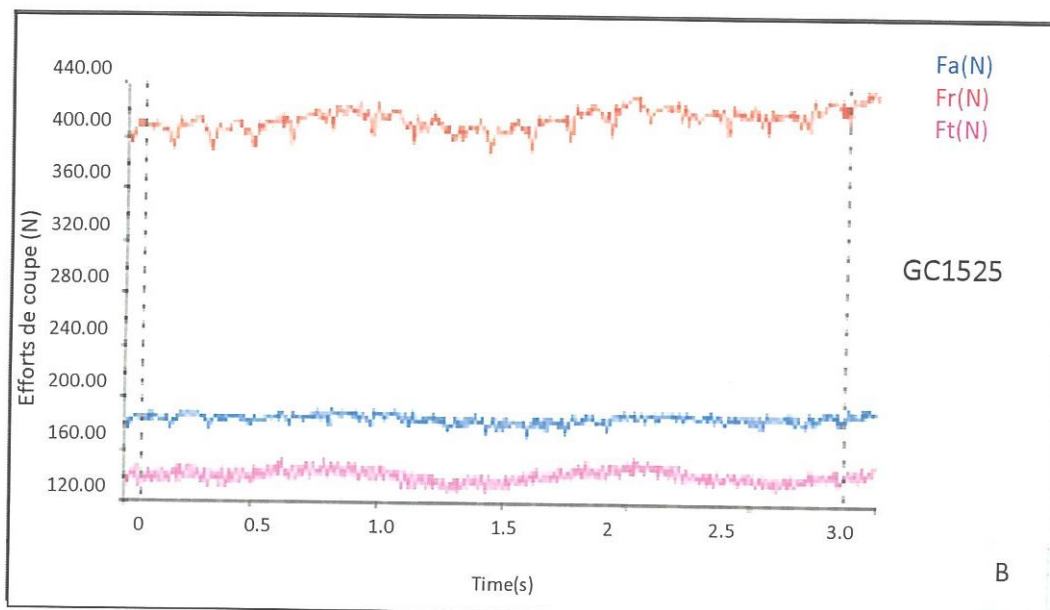
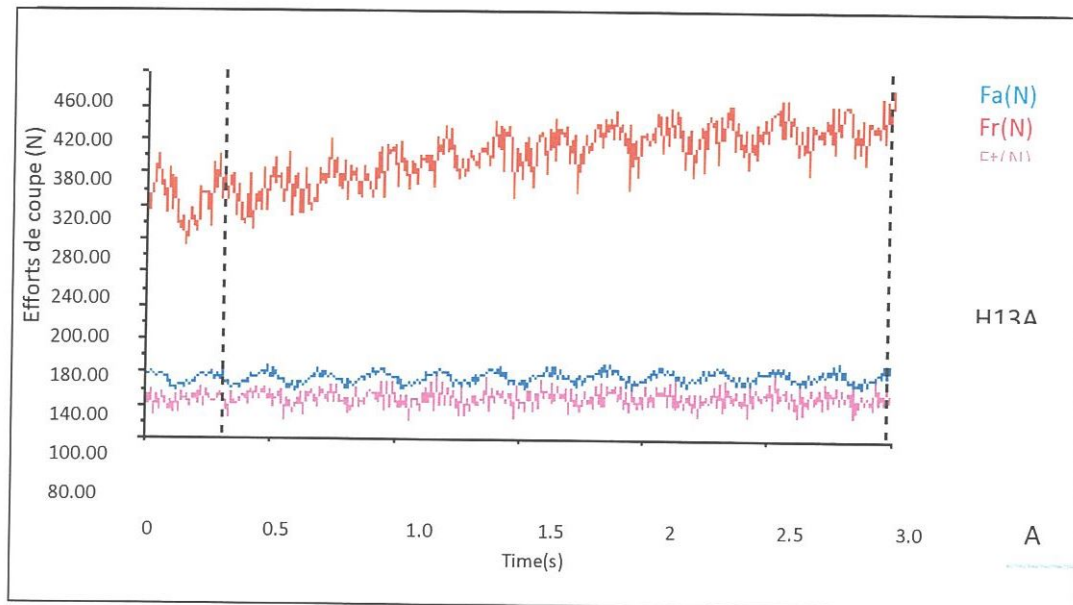
HABAK [15] a indiqué que "les matériaux durs, avec leur effet abrasif, usent rapidement les outils de coupe et augmentent le seuil de l'effort radial ce qui se traduit par une élévation de l'effort de coupe résultant".

Du point de vue efforts de coupe, ces nuances ne sont pas adaptées pour usiner cet acier aux vitesses de coupe supérieures à 45 m/mn. Généralement les trois nuances donnent des efforts de coupe presque voisines avec une légère différence qui varie d'un matériau de coupe à un autre à cause du matériau de coupe lui-même et du type de revêtement.

Par contre pour le cas des céramiques les efforts présentent une légère croissance jusqu'à la vitesse de coupe de 120 m/mn puis une diminution des efforts de coupe avec des pentes différentes. Ceci explique que lorsqu'on travaille à des vitesses au dessus de 120m/mn la température augmente dans la zone de coupe qui rend le matériau plus malléable et s'écoule facilement sur la surface d'attaque [31] [32].

Les résultats du tournage de l'acier 42CrMo4 à l'état trempé, montrent que l'effort radial ( $F_r$ ) est prépondérant par rapport aux deux autres efforts ( $F_t$  et  $F_a$ ). Ceci peut être expliqué par le travail de l'outil exclusivement avec son rayon du bec qui est égal à 0,8mm ( $r > a_p$ ) et la coupe négative, caractérisée par un angle d'attaque  $\gamma = -6^\circ$ .

Les cinq profils des trois composantes de l'effort de coupe en fonction du temps de trois secondes sont représentés dans la figure III-8.



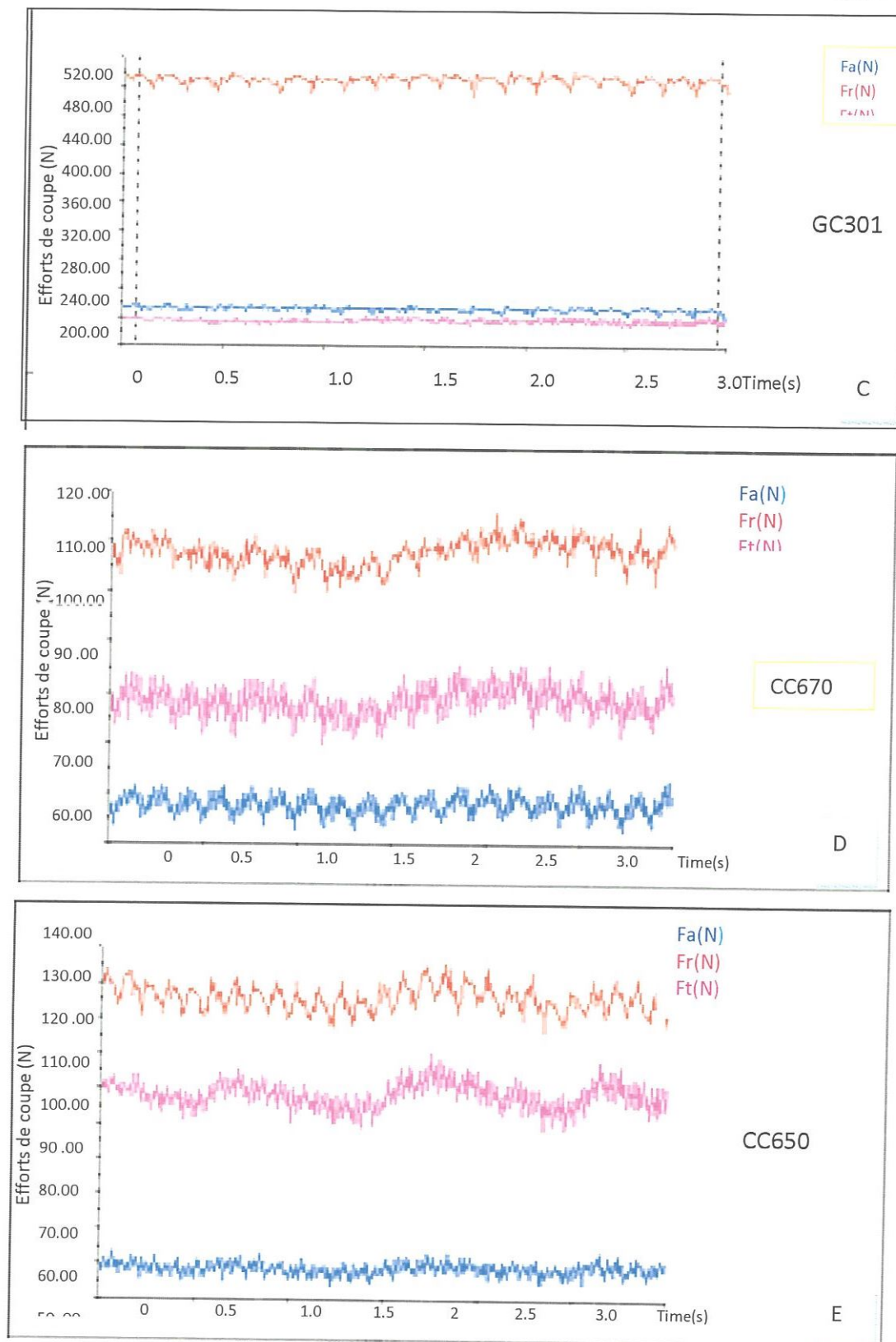
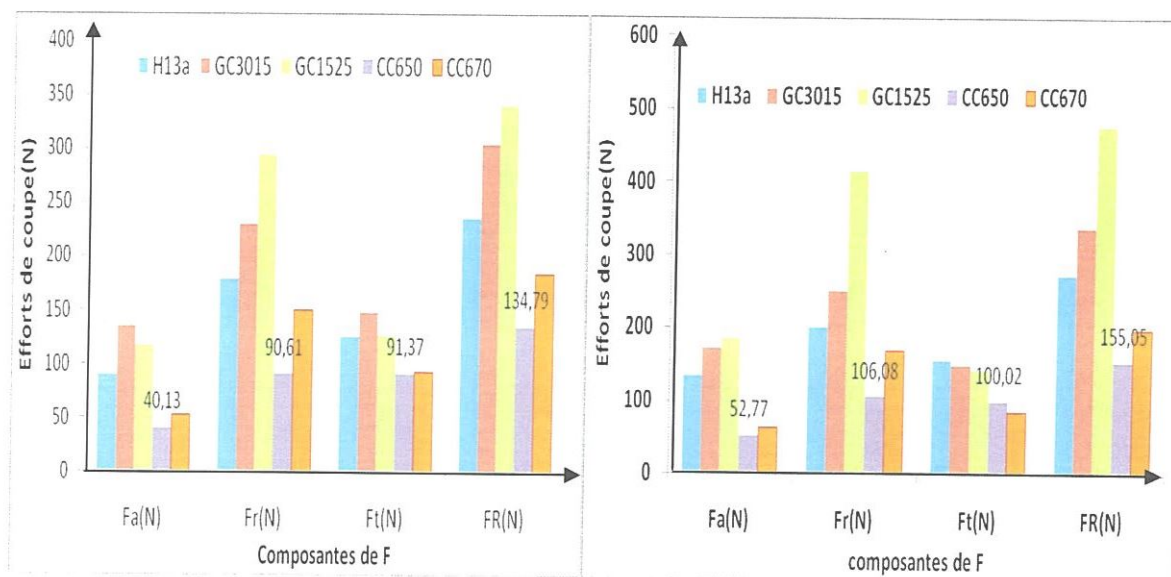


Figure III-8. (A, B, C, D et E) Profils des composantes des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec différents matériaux à outil à  $V_c = 80\text{m/min}$ ,  $f = 0,08\text{mm/tr}$  et  $a_p = 0,25\text{mm}$ .



a) Vc=60m/mn

b) Vc =80m/mn

Figure III-9. (a et b). Comparaison entre les efforts enregistrés pour les cinq nuances de coupe ;  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $ap=0.25\text{ mm}$

Les Figures III-9(a et b) illustrent la différence entre les efforts de coupe qui est principalement due aux type de revêtement ; et à la nature de la matière de chaque nuance. Cette figure montre également que la nuance GC1525 donne des efforts de coupe élevés par rapport aux autres nuances, suivie par la nuance GC3015 puis la nuance H13A. Cependant les deux nuances de céramique CC650 et CC670 donnent des efforts de coupe relativement très inférieures aux nuances précédentes.

**III.3.1.2. Pression de coupe :** On définit la pression de coupe comme le quotient de l'effort de coupe  $F$  (en newton) sur l'aire de la surface du copeau  $S$  (en  $\text{mm}^2$ ) sur laquelle il s'applique :

$$p = \frac{F}{S} \quad \text{Avec } S=f * ap$$

$f$ : (mm/tr);  $ap$  (mm) ;  $P$  (N/mm<sup>2</sup>)

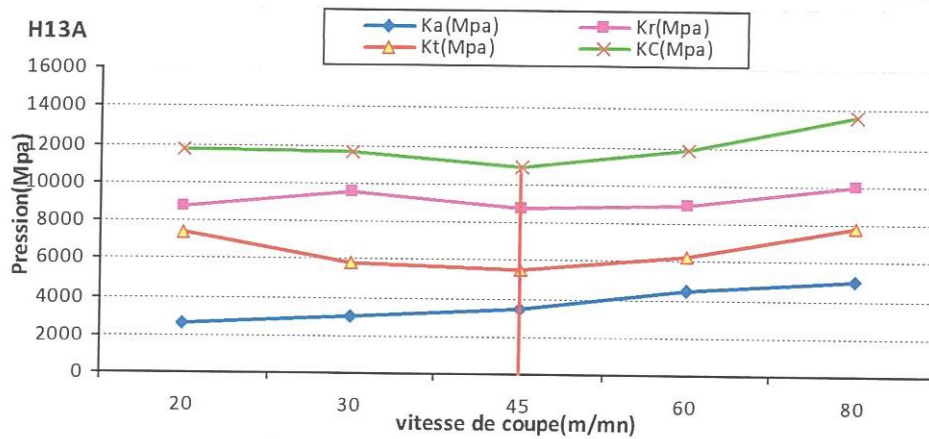


Figure III-10.a Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec le matériau à outil H13A,  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.25\text{ mm}$

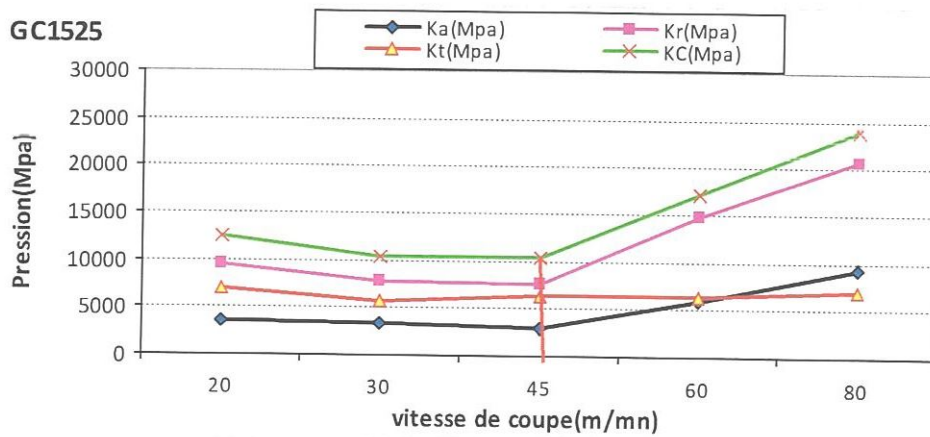


Figure III-10.b Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec le matériau à outil GC1525,  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.25\text{ mm}$

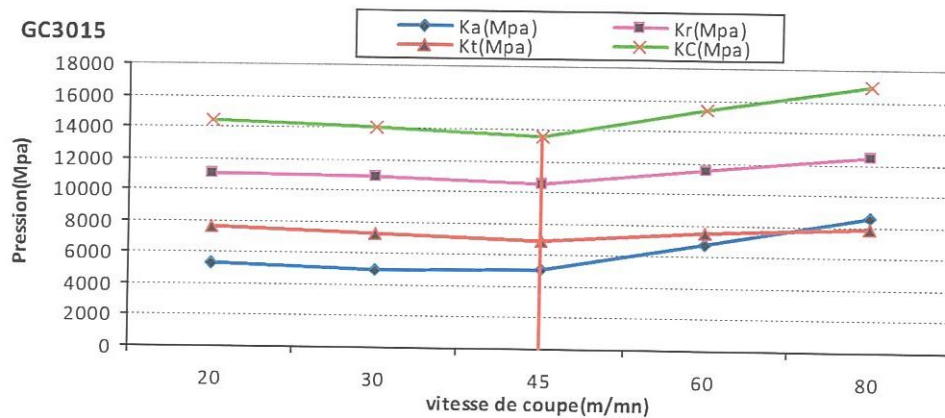


Figure III-10.c Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec le matériau à outil GC3015,  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.25\text{ mm}$

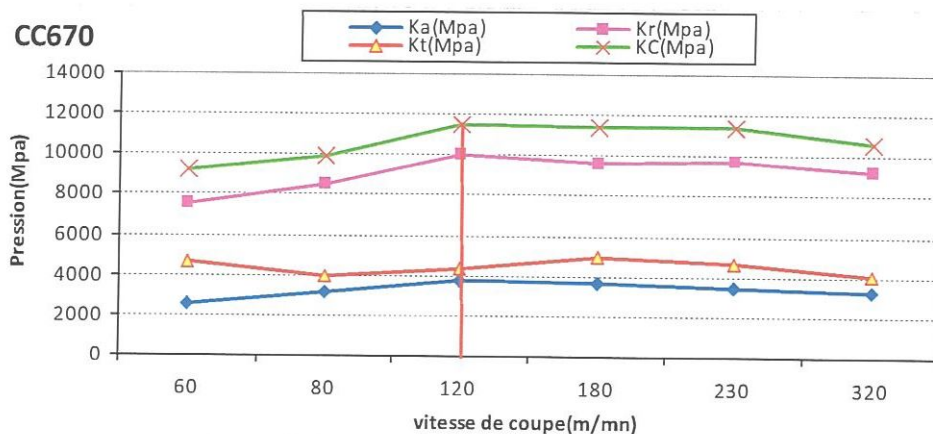


Figure III-10.d Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec le matériau à outil CC670,  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.25\text{ mm}$

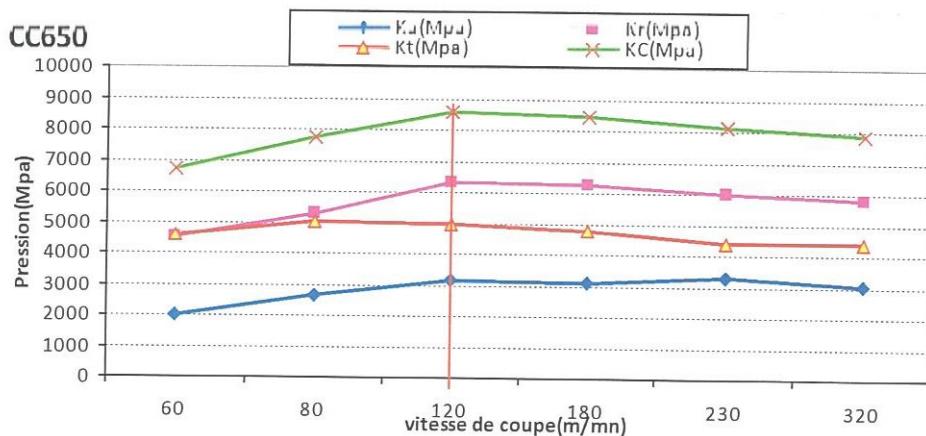


Figure III-10.e Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec le matériau à outil CC650,  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.25\text{ mm}$

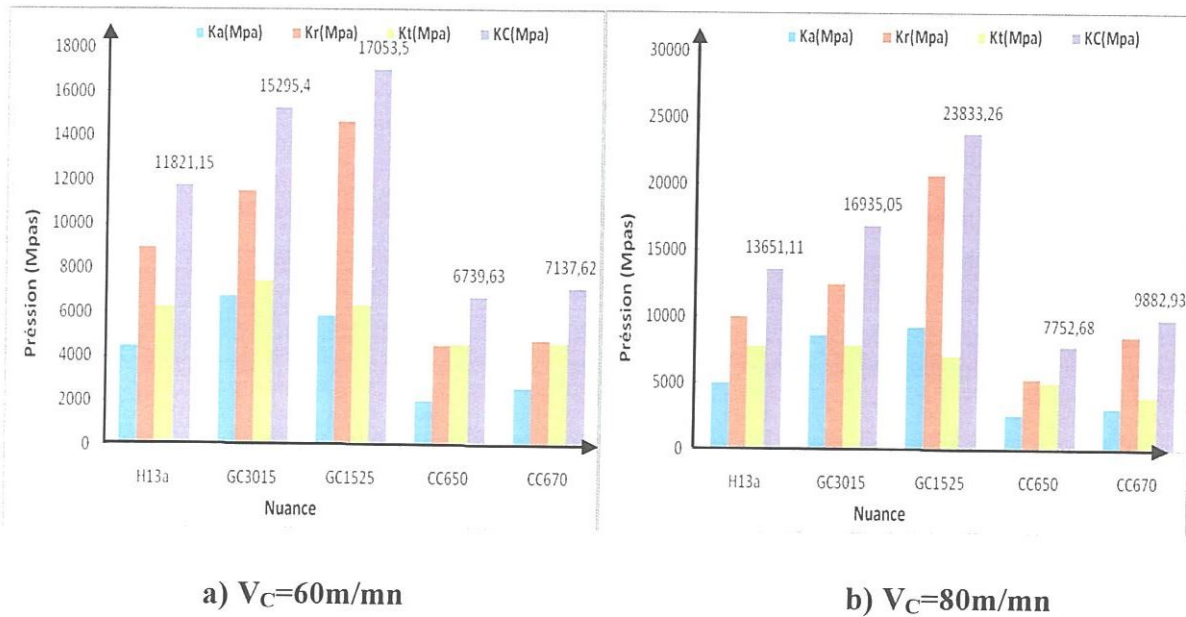


Figure III-11 Comparaison entre les pressions enregistrées pour les cinq nuances de coupe ;  $f=0.08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0.25\text{ mm}$

Les Figures III-11(a et b) montrent la différence entre les pressions de coupe qui est principalement due aux types de revêtement et de la matière de chaque nuance. Cette figure dévoile que la nuance GC3015 donne des pressions de coupe élevées par rapport aux autres nuances, au deuxième lieu vient la nuance GC1525 puis la nuance H13A. Mais on constate que les deux nuances de céramique CC650 et CC670 donnent des pressions de coupe très inférieures aux nuances précédentes.

### III.3.2. Effet de l'avance

#### III.3.2.1. Effet de l'avance sur les efforts de coupe

Les essais ont été effectués dans les conditions suivantes :

- Pour les nuances (H13A, GC1525 et GC3015),  $V_c=45\text{m/mn}$  ;  $a_p=0.25\text{mm}$
- Pour les nuances (CC650 et CC670),  $V_c=120\text{ m/mn}$  ;  $a_p=0.25\text{mm}$

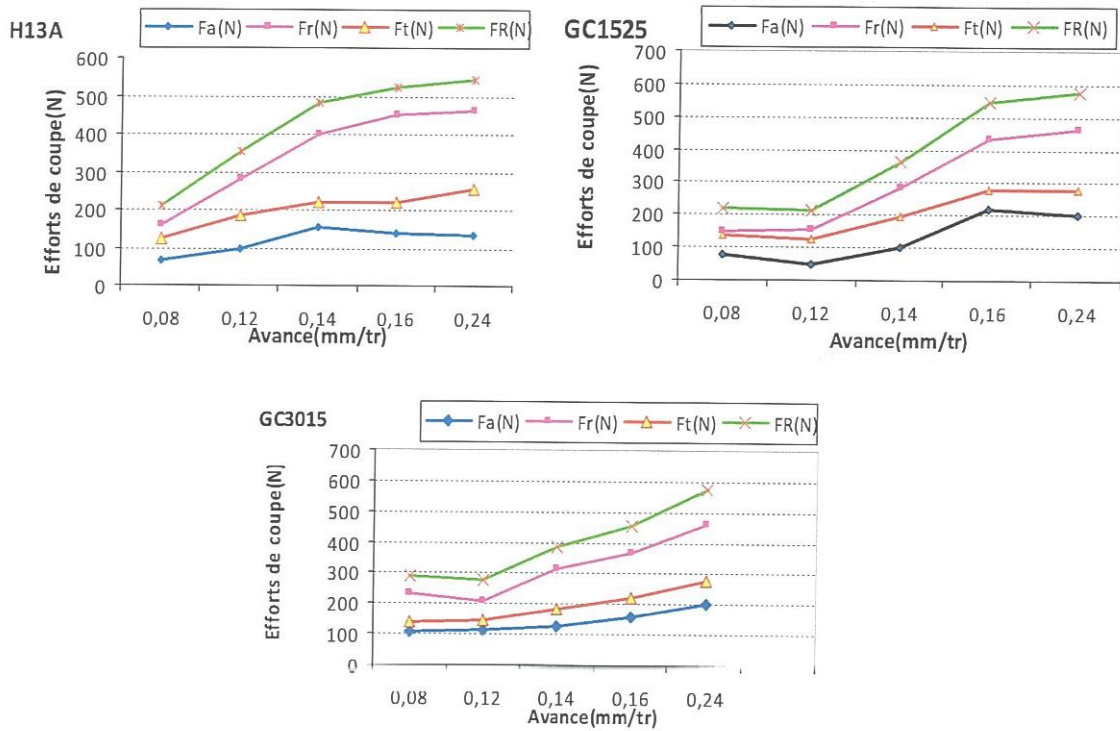


Figure III-12. a. Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de l'avance pour les carbures avec  $V_c=45\text{m/mn}$  ;  $a_p=0.25\text{mm}$

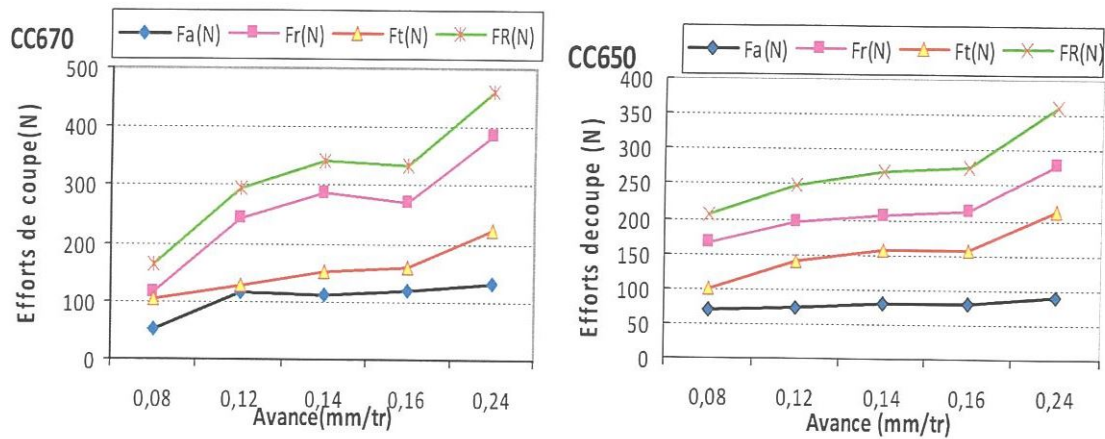
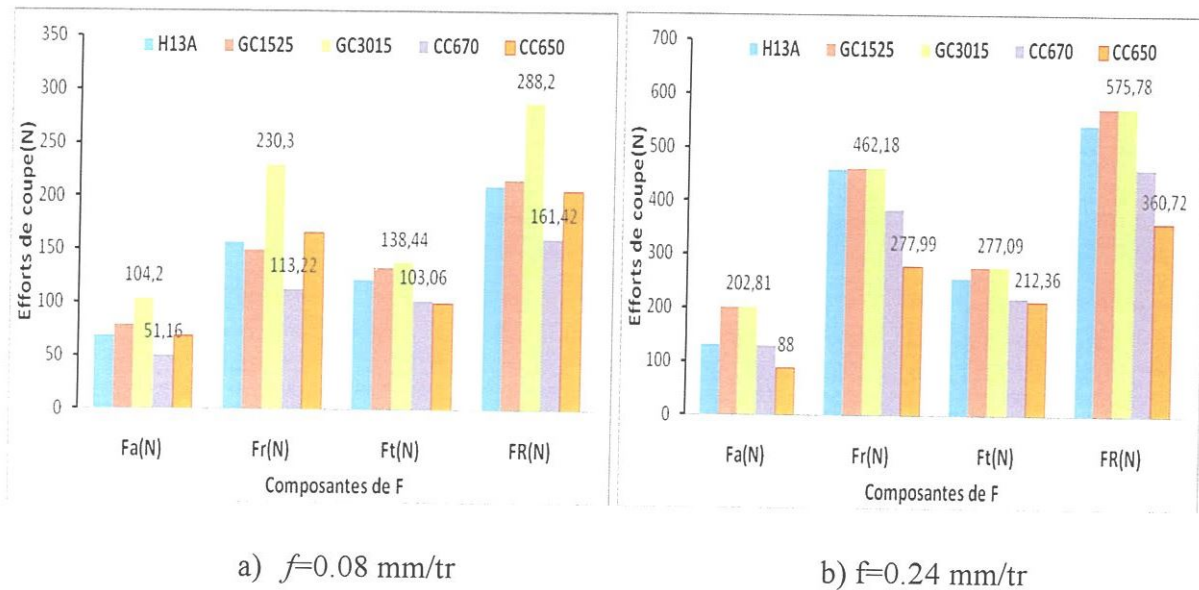


Figure III-12. b. Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de l'avance pour les céramiques avec  $V_c=120\text{ m/mn}$  ;  $a_p=0.25\text{mm}$





**Figure III-12. (c et d).** Comparaison entre les efforts enregistrés pour les cinq nuances de coupe ;  $V_c=45\text{m/mn}$ ,  $a_p=0.25\text{ mm}$  pour les carbures  
 $V_c=120\text{mm/mn}$ ,  $a_p=0.25\text{mm}$  pour les céramiques

Les résultats présentés sur la figure III-12 (a et b) montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance. Il est à noter que cette dernière a une influence significative sur l'effort radial (effort de pénétration) suivi par l'effort tangentiel (effort de coupe) et en fin l'effort axial. 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 [15] [32].

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 0,24mm/tr a fait accroître les composantes (Fa, Fr et Ft) de l'effort de coupe respectivement de (93.78 ; 153.94 ; 94.63 ; 155.23 ; 29.01) % , (139.27 ; 207.50 ; 100.86 ; 239.18 ; 66.90)% , et (110.94 ; 106.86 ; 100.15 ; 114.28 ; 11.69) % ces pourcentages correspondent successivement aux différentes nuances de coupe (H13A ; GC1525 ; GC3015 ; CC670 ; CC650) testées.

L'accroissement de l'avance s'est traduit par une augmentation de l'effort de coupe résultant. Les conséquences sur le plan pratique sont comme suit : l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24mm/tr, accroît l'effort de coupe résultant de (158.53 ; 165.584 ; 99.78 ; 186.10 ; 74.95) % respectivement pour les différentes nuances de coupe (H13A ; GC1525 ; GC3015 ; CC670 ; CC650) testées.

III.3.2.2. Effet de l'avance sur les Pressions de coupe

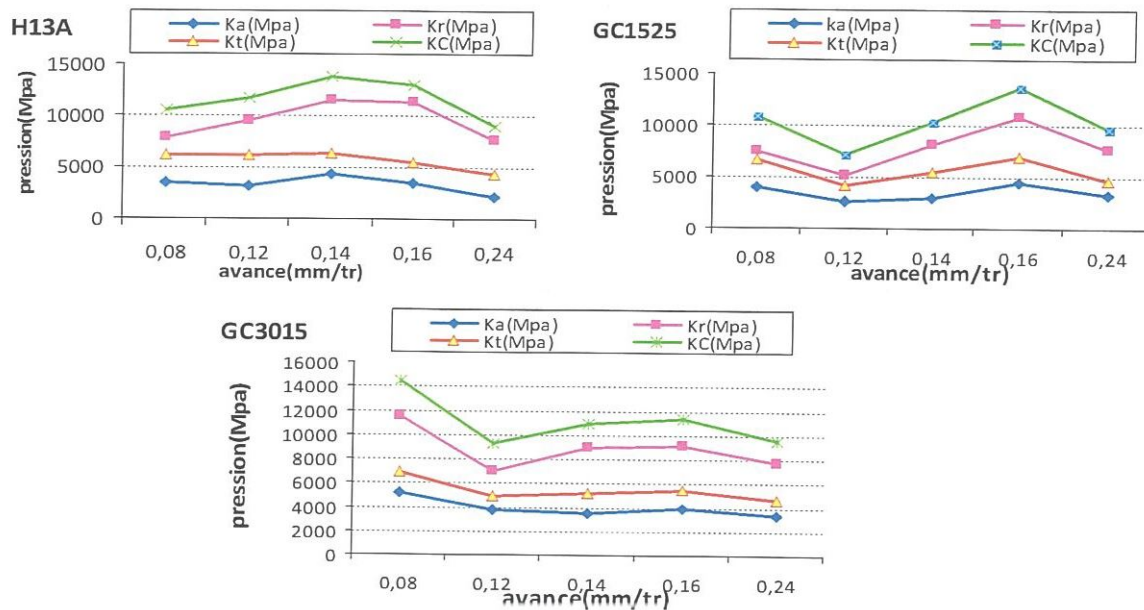


Figure III-13. a. Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec les 3 nuances de carbures ;  $V_c = 45 \text{ m/mn}$ ;  $a_p = 0.25 \text{ mm}$ .

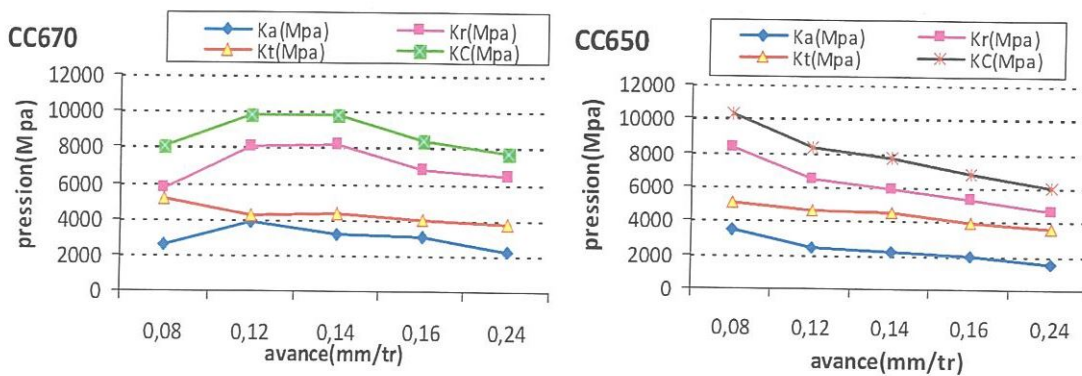


Figure III-13. b. Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec les 2 nuances de céramiques ;  $V_c = 120 \text{ m/mn}$ ;  $a_p = 0.25 \text{ mm}$ .

Les figures III-13 (a et b) montrent l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance. On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance, les pressions de coupe diminuent. Pour une avance de 0,08mm/tr, la pression exercée sur la pointe de l'outil est importante. On a enregistré une diminution de (54.79 ; 18.14 ; 54.13 ; 17.53 ; 132.25) % de la pression axiale, (02.91 ; -2.5 ; 49.48 ; -11.53 ; 79.75) % de la pression radiale, (42.22 ; 45.02 ; 49.89 ; 40.00 ; 42.12) % de la pression tangentielle et (16.04 ; 12.85 ; 50.16 ; 04.86 ; 71.48) % de la pression résultante successivement pour les différentes nuances de coupe (H13A ; GC1525 ; GC3015 ; CC670 ; CC650). Ceci lorsque l'avance passe de 0,08mm/tr à 0,24mm/tr. La pression de

coupe est faible pour les avances plus élevées, car la section de la tranche cisailée augmente. L'usinage semble alors meilleur dans ces conditions. Par contre, le choix de faibles valeurs d'avance est souvent recommandé pour obtenir de bons états de surface ( $R_t = \frac{f^2}{8a_1}$ ). Ce qui mène à dire que la coupe se passe dans de très mauvaises conditions. Cependant, lors de la finition, les efforts de coupe résultants du choix de faibles avances, profondeur de passe et grandes vitesse de coupe sont moindres. Ce qui atténue l'élévation des pressions spécifiques.

### III.3.3. Effet de la profondeur de passe sur les efforts et la pression de coupe.

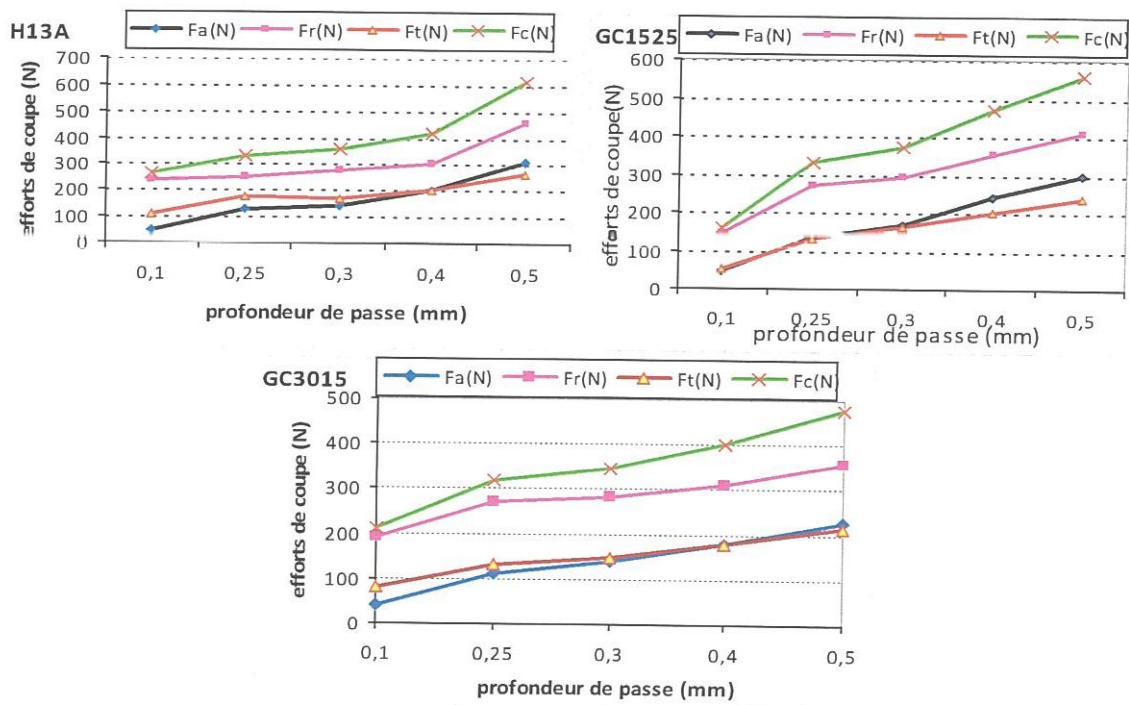
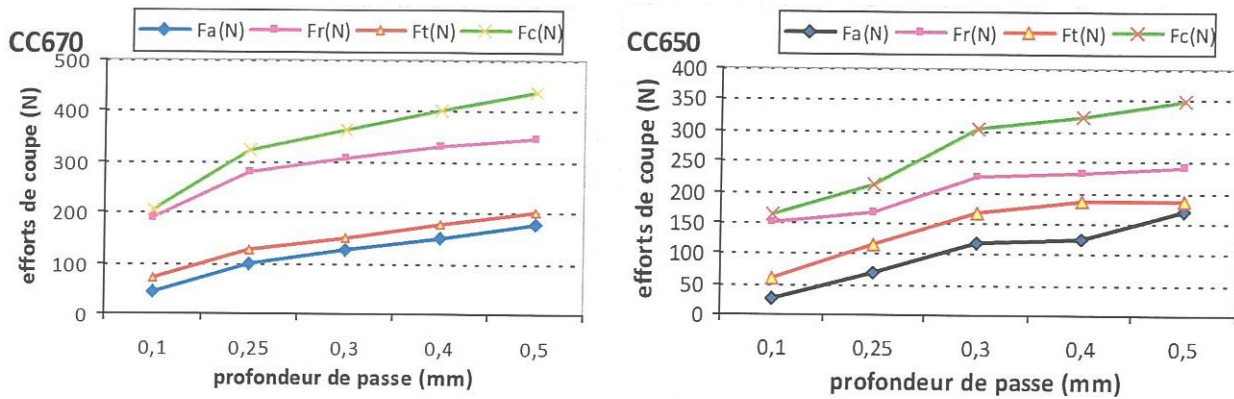


Figure III-14. a. Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de la profondeur de passe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec les 3 nuances de carbures ;

$$V_c = 45 \text{ m/mn}, f = 0.08 \text{ mm/tr.}$$



**Figure III-14.b.** Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de la profondeur de passe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 avec les 2 nuances de céramiques ;

$$V_c = 120 \text{ m/mn}, f = 0.08 \text{ mm/tr.}$$

La figure III-14 (a et b) présente les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe. Les résultats montrent une nette augmentation des efforts de coupe avec l'accroissement de la profondeur de passe. Ceci s'explique par le fait que la section de copeau résultant à ce changement de  $a_p$  prend de l'ampleur, ce qui nécessite des efforts de coupe conséquents pour son arrachement.

Pour les valeurs de profondeur de passe de (0,1 à 0,5) mm, on a enregistré un taux d'augmentation de (459.02 ; 565.01 ; 459.01 ; 525.78 ; 296.13)% de l'effort axial, (89.33 ; 186.41 ; 89.33 ; 62.60 ; 84.84)% de l'effort radial et (171.64 ; 346.72 ; 171.64 ; 214.64 ; 190.50) % de l'effort tangentiel, respectivement pour les différentes nuances de coupe (H13A ; GC1525 ; GC3015 ; CC670 ; CC650). L'analyse de ces résultats montre que l'effort radial est le plus sensible à l'augmentation de la profondeur de passe, suivi par l'effort tangentiel et en fin l'effort axial. Il est à noter que pour les profondeurs supérieures à 0.3 mm, la composante axiale a tendance à dépasser celle tangentielle.

L'analyse des résultats montre également une croissance de l'effort résultant avec l'augmentation de la profondeur de passe. A la profondeur de passe de 0,1 mm l'effort résultant est de (262.57 ; 158.93 ; 208.98 ; 205.34 ; 162.12) N respectivement pour les différentes nuances de coupe (H13A ; GC1525 ; GC3015 ; CC670 ; CC650), mais pour  $a_p = 0,5$  mm celui-ci est à (615.6 ; 558.66 ; 475.39 ; 438.69 ; 338.31) N, soit une augmentation respective de (134.45 ; 251.51 ; 127.48 ; 113.64 ; 170.36) %.

On a remarqué que pour des petites valeurs de la profondeur de passe, l'effort tangentiel est prépondérant par rapport à l'effort axial. Au-delà de la valeur de  $a_p=0.4$  mm l'effort axial dépasse l'effort tangentiel surtout pour les nuances H13A, GC1525 et GC3015. Cela peut être expliqué par le travail de l'outil en tournage par son rayon de bec aux petites profondeurs de passe. Avec l'augmentation de  $a_p$ , la coupe se fait presque en dehors de la limite du rayon du bec de l'outil. Par conséquent la pièce présente une résistance à la pénétration de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et en particulier axial.

L'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe est présentée à la figure III-15. (a et b) Une légère augmentation de (24.66 ; 24.81 ; 10.56 ; 26.22 ; 23.40) % de  $K_a$ . Par contre une diminution de (153.93 ; 74.57 ; 164.09 ; 170.50 ; 207.5) % de  $K_r$ , (110.32 ; 11.92 ; 84.07 ; 72.11 ; 58.93) % de  $K_t$  respectivement pour les différentes nuances de coupe (H13A ; GC1525 ; GC3015 ; CC670 ; CC650). Ceci lorsque  $a_p$  passe de 0.1 à 0.5 mm. Les résultats montrent également que les faibles profondeurs de passe, s'accompagnent de fortes pressions spécifiques, ce qui conduit à rendre les conditions de coupe difficiles. D'après les valeurs des pressions spécifiques de l'effort de coupe résultant (*figure III.15*), il est fortement déconseillé de travailler aux très faibles profondeurs de passe (32,82 ; 19,86 ; 26,12 ; 25,67 ; 20,26) GPa pour ( $a_p=0.1$ mm).

Par contre avec l'augmentation de la profondeur de passe, la pression spécifique diminue, ce qui rend les conditions de coupe plus favorables. En effet avec l'augmentation de la section du copeau (suite à l'accroissement de  $a_p$ ), les efforts de coupe nécessaires à l'arrachement de la tranche cisailée s'accroissent pour convaincre la résistance à la rupture de celle-ci.

L'augmentation de la section du copeau, favorise également les conditions d'évacuation de la chaleur de la zone de coupe [32] [36].

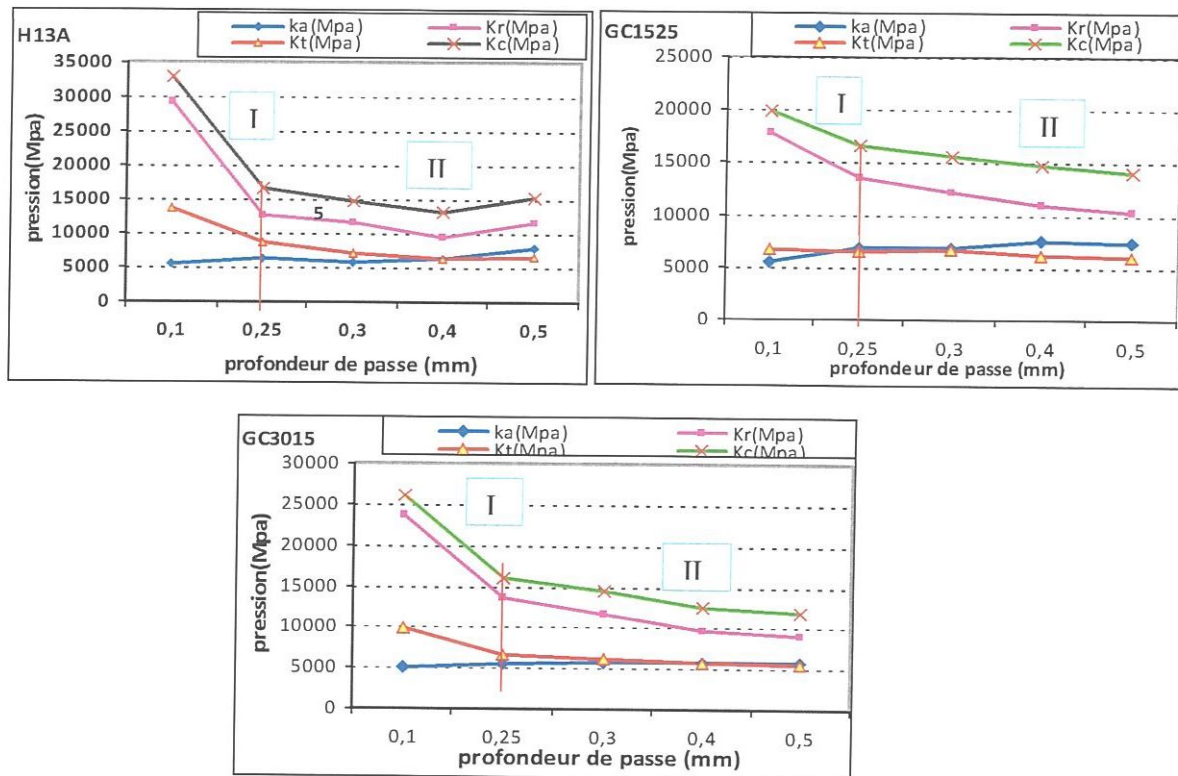


Figure III-15. a Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec les 3 nuances de carbures ;

$V_c=45m/mn, f=0.08 mm/tr$

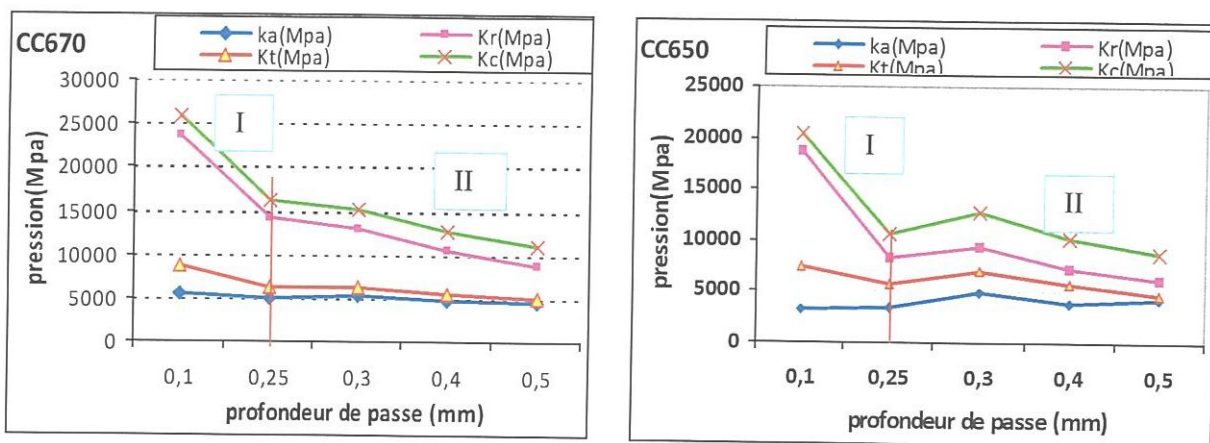


Figure III-15. b Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé avec les 2 nuances en céramiques ;

$V_c= 120m/mn, f=0.08mm/tr.$

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 distinctes. La première période (jusqu'à  $a_p=0.25\text{mm}$ ) se caractérise par une chute remarquable de la pression. Par contre la deuxième zone se distingue par une diminution de la pression plus stable. Ceci est observé pour l'ensemble des toutes les nuances d'outils testées.

### III.3.4. Conclusions

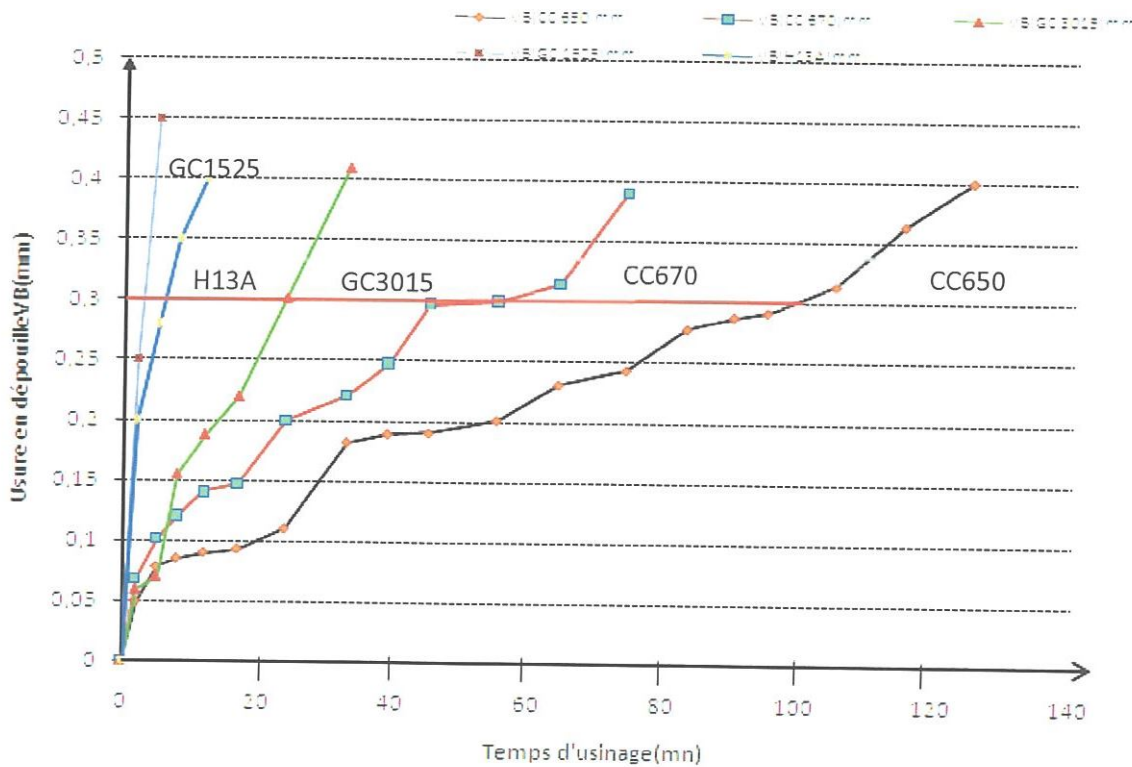
Les essais d'usinage pratiqués sur l'acier 42CrMo4; traité à 50 HRC, usiné par les matériaux suivants (H13A;GC3015;GC1525;CC670 et CC650), nous ont permis d'étudier l'influence des paramètres suivants : la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe sur les efforts et les pressions de coupe, sur la rugosité des surfaces usinées. Il est à signaler que l'effort radial est très sensible à la variation de la profondeur de passe et que cette dernière affecte les efforts de coupe d'une manière considérable. On note aussi que la rugosité est très sensible à la variation de l'avance. On enregistre une augmentation d'environ (81.81 ;75 ;325.92 ;292.68 ;324.13) % de  $R_a$ , (57.89 ;120 ;205.55 ;28.57 ;73.91) % de  $R_t$  et (69.23 ;150 ;263.63 ;200) % de  $R_z$  successivement pour les matériaux suivants (H13A;GC1525;GC3015;CC670 et CC650) lorsque la valeur de l'avance passe de 0,08 à 0,24mm/tr. 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 (les valeurs usuelles de la rugosité arithmétique pour la rectification cylindrique sont variées de  $0.2\ \mu\text{m}$  à  $1.6\ \mu\text{m}$  d'après l'ouvrage de A.CHEVALIER et J.BOCHAN) [33].

### III.4. Evolution de l'usure des outils

La connaissance des mécanismes d'usure est un aspect très important de la coupe des métaux car l'usure des outils participe pour une grande part dans le coût des opérations d'usinage. Le changement de la géométrie de l'outil et de la matière de chaque nuance modifie les conditions de coupe et par conséquent influe sur la qualité de l'usinage. Dans ce chapitre, nous avons étudié l'usure, les efforts de coupe et les rugosités en fonction du temps d'usinage des différents outils de coupe.

La figure III-16 montre l'évolution de l'usure en dépouille des cinq matériaux testés en fonction du temps d'usinage. Avec l'augmentation du temps d'usinage, la température augmente ce qui conduit à une augmentation de l'usure.

L'analyse des résultats relatifs à la variation de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage pour les carbures et pour les céramiques à  $V_c=90\text{m/mn}$  ;  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$ , montre que les interactions entre la pièce et les différents outils de coupe sont différentes et que les nuances céramiques résistent mieux comparativement avec celles des carbures et des cermets.



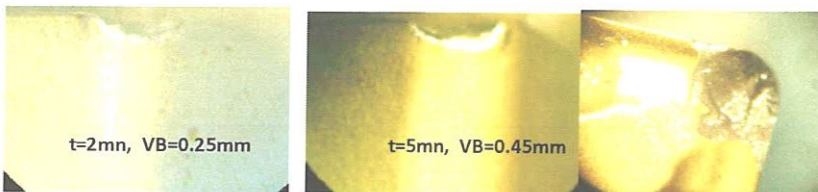
**Figure III-16.** Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage pour les deux groupes de matériaux de coupe (H13A ; GC1525 ; GC3015) et (CC670 ; CC650) à  $V_c=90\text{m/mn}$  ;  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$ .

Pour  $V_c=90\text{m/min}$  ;  $f=0,08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0,25\text{mm}$  et lorsque l'usure atteint la valeur de 0,3mm, on enregistre une durée de vie des outils (GC1525 ; H13A ; GC3015 ; CC670 ; CC650) à des valeurs successives (3 ; 6 ; 24 ; 55 ; 100) minutes. On remarque que la durée de vie la plus élevée et celle de la céramique CC650 et la nuance la moins résistante et celle du cermet GC1525, puis celle du carbure H13A.

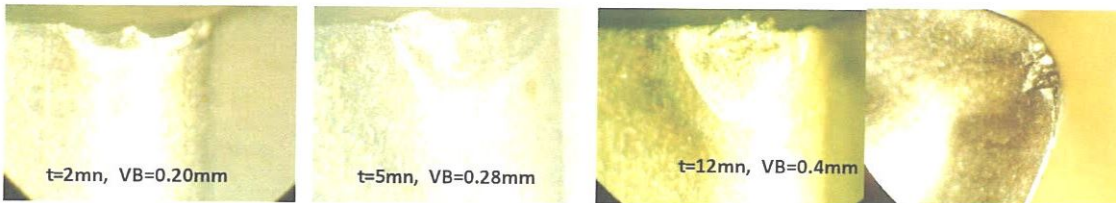


Cette analyse nous permet de conclure que : L'usure des outils est en général un processus graduel. Le taux d'usure des outils dépend essentiellement des matériaux d'outils et des pièces, de la géométrie des outils, des paramètres de coupe (Vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe).

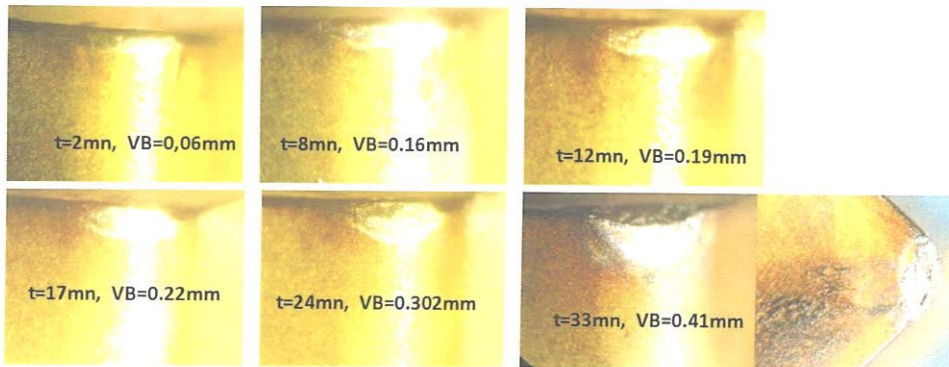
Le choix de la vitesse de coupe et de l'avance d'usinage est en fonction de la nature du matériau usiné, du type d'opération et de la qualité du fini de surface désiré.



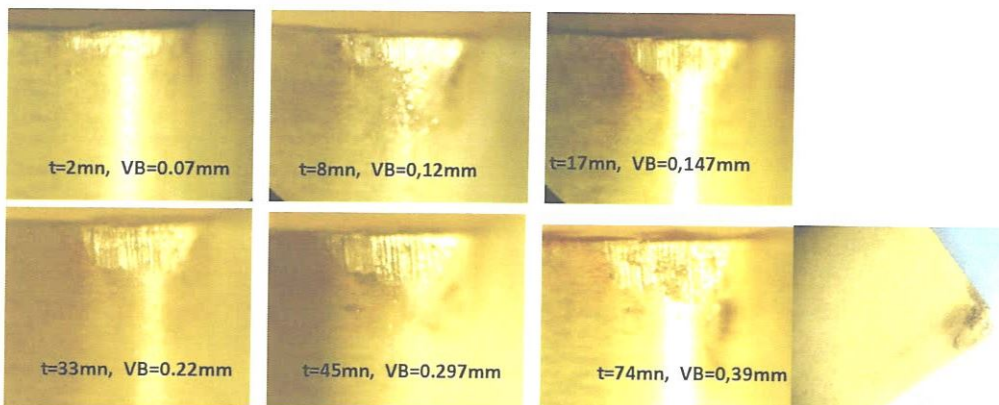
b) cermet GC1525



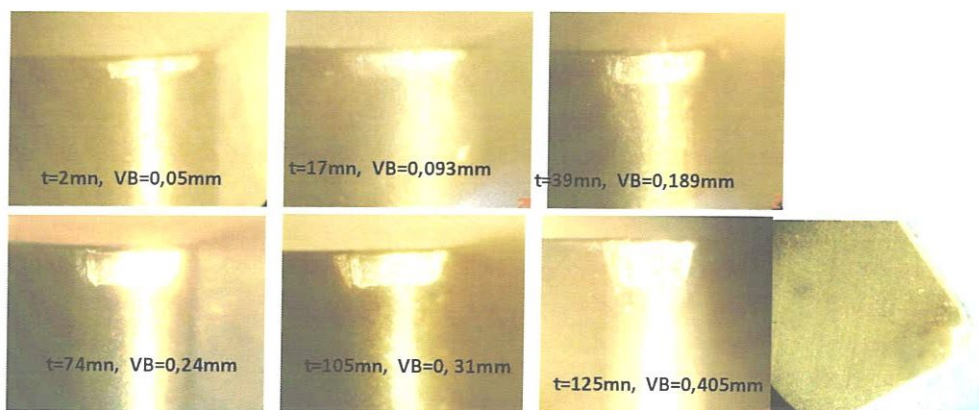
a) carbure H13A



c) carbure GC3015



e) céramique CC670



d) céramique CC650

**Figure III-17.** (a, b, c, d et e) Valeurs et morphologie de l'usure VB en fonction du temps d'usinage pour les différents matériaux testés à  $V_c=90\text{m/mn}$  ;  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$

#### III.4.1. Evaluation des durées de vie

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

La norme ISO 3685-1977 définit l'usure des outils comme étant tout changement lors de la coupe, de la forme de l'outil par rapport à sa forme initiale résultant de la perte progressive de matériau de l'outil ou de déformation [17]

Nuance	Temps d'usinage (min) pour VB = 0,30mm
GC1525	3
H13A	6
GC3015	24
CC670	55
CC650	100

**Tableau III-1.** Durées de vie des différentes nuances d'outils testés, lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé à  $V_c=90\text{ m/mn}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$

III.4.2. Analyse des efforts coupe

III.4.2.1. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage

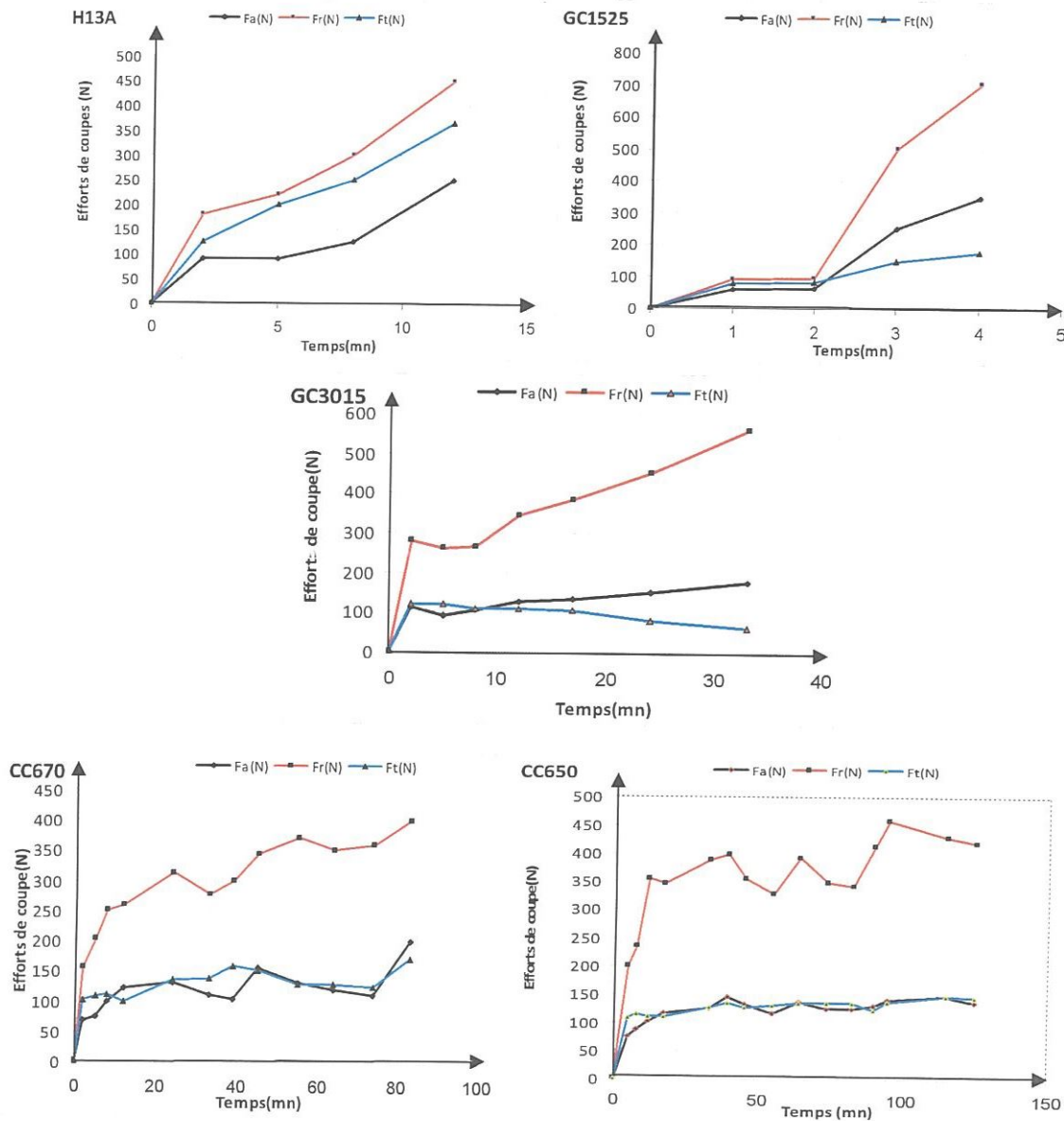


Figure III.18 Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage

Les résultats présentés sur la figure III-18 montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage des cinq matériaux testés avec les mêmes conditions de coupe  $VC=90\text{m/mn}$  ;  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $ap=0.25\text{mm}$  on a remarqué que pour le matériau de coupe GC1525, les efforts (Fa, Fr et Ft) sont respectivement (250.3 ; 500.3 et 150.3) N. Ces valeurs ont été enregistrées pour  $t=3\text{min}$  ; pour H13A les efforts (Fa, Fr et Ft) sont respectivement (90.2 ; 220.1 et 200.1) N ou bout d'un temps de 6 minutes et pour GC3015 les efforts (Fa, Fr et Ft) sont respectivement (151.3 ; 451.7 et 80.3) N pendant une durée de vie  $t=24\text{min}$  par

contre on a enregistré pour la céramique CC670 les valeurs des efforts ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) , respectivement (130.3 ; 370.3 et 128.2) N, pour  $t=55\text{min}$  et aussi pour la céramique CC650 les efforts ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) sont respectivement (140.9 ; 459 et 137.1) N pour une durée de  $t=100\text{min}$ . Ce qui explique que ce dernier et le matériau de coupe le plus adéquat a l'usinage du ce matériau 42CrMo4 a une dureté de 50HRC

Cette augmentation rapide des efforts de coupe pour GC1525 ; H13A et GC3015 s'explique par le frottement entre l'outil et la pièce engendré par l'accélération rapide du mécanisme d'usure.

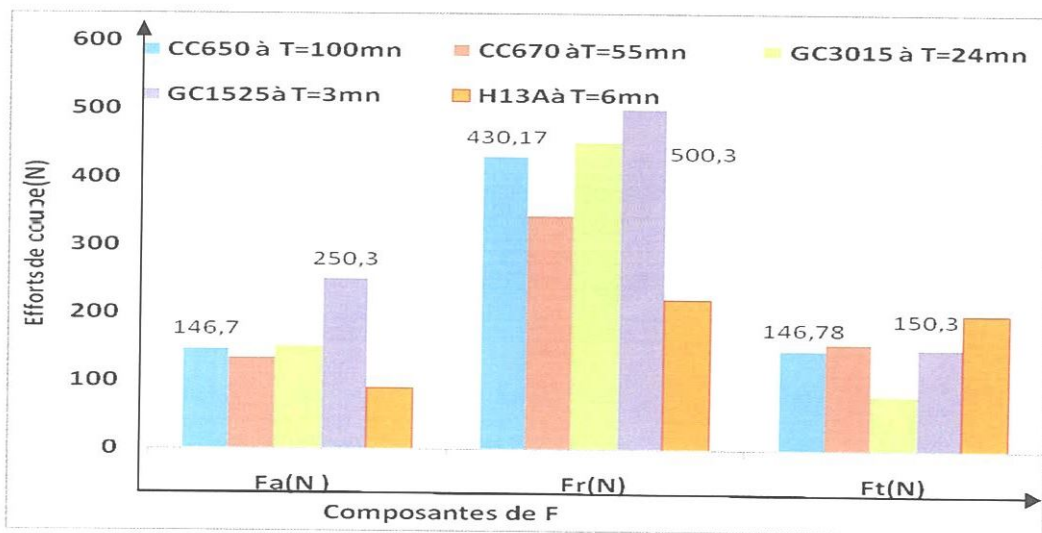
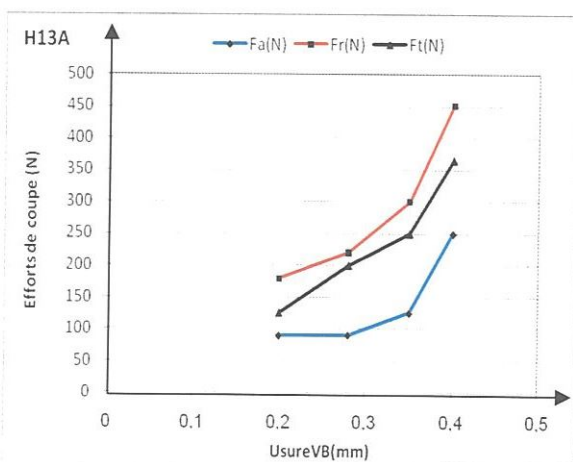
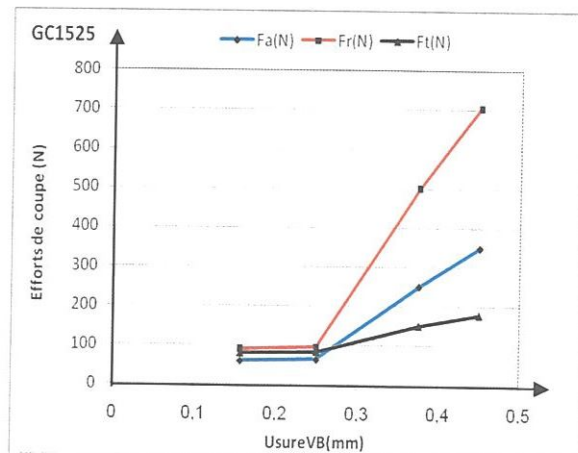


Figure III-19. Efforts de coupe des différentes nuances de plaquettes de coupe testés lorsque l'usure admissible atteint 0.3mm.

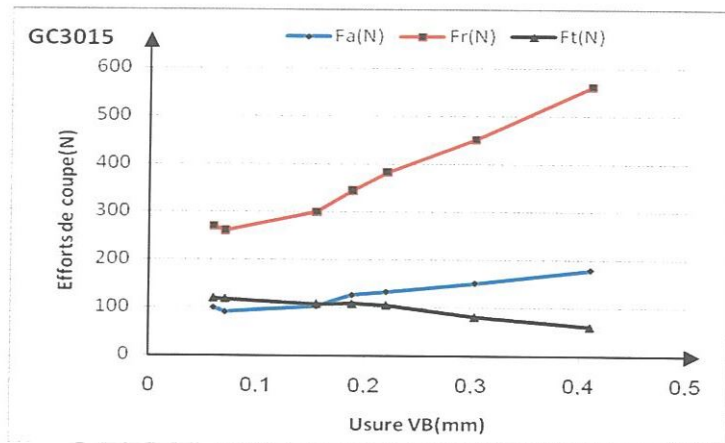
### III.4.2.2. Evolution des efforts de coupe en fonction de VB



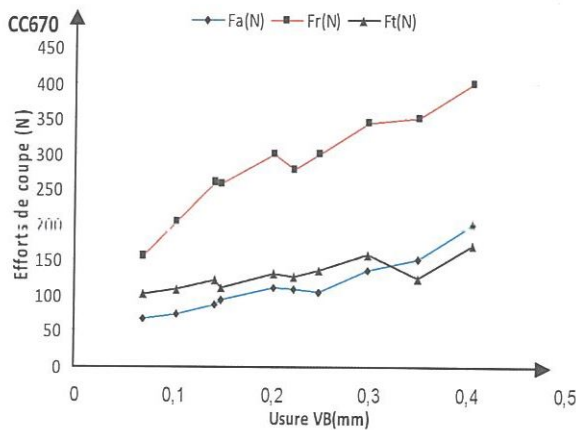
a) Nuance H13A



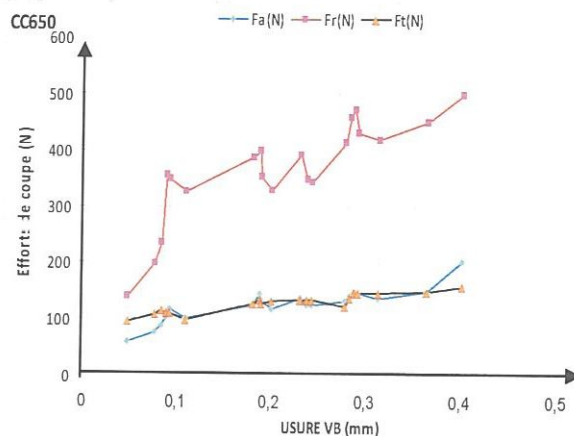
b) Nuance GC1525



c) Nuance GC3015



d) Nuance CC670



e) Nuance CC650

Figure III-20. (a, b, c, d et e) Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure VB à  $V_c=90\text{m/mn}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$

La figure III-20, (a ; b ; c ; d ; e) illustre l'impact de l'usure en dépouille sur les efforts de coupe des cinq matériaux testés avec les conditions de coupe sont  $V_c=90\text{m/mn}$  ;  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$ .

Pour le matériau de coupe H13A : L'analyse de la figure III-20, (a) montre que l'augmentation de l'usure en dépouille est rapide ce qui conduit à une augmentation des efforts de coupe (Fa, Fr et Ft) respectivement de (180 ; 151.45 et 190.05) % pour un temps d'usinage  $t=6\text{min}$ , où les courbes de l'effort de coupe prennent une allure ascendante à cause de l'augmentation de l'usure VBmax.

Pour le matériau de coupe GC1525 : la figure III-20, (b) montre que l'augmentation de l'usure en dépouille est très rapide ce qui conduit à une augmentation des efforts de coupe (Fa, Fr et Ft) respectivement de (475.78 ; 679.95 et 121.67) % pour un temps d'usinage très réduit  $t=3\text{min}$ .

Pour le matériau de coupe GC3015: la figure III-20, (c) montre que l'augmentation de l'usure en dépouille est un peu tenue ce qui conduit à une augmentation des efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) respectivement de (78.8 ; 107.9 et 49.5) % pour un temps d'usinage  $t=24\text{min}$

L'analyse de la figure III-20, (d) montre que l'augmentation de l'usure en dépouille pour le matériau de coupe CC670 est satisfaisante et l'augmentation des efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) respectivement de (201.2 ; 156.4 et 67.06) % pour un temps d'usinage  $t=55\text{min}$ .

L'allure de la courbe des efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) en fonction de VB représentée dans les figures III-20,(e) montre que l'augmentation de l'usure en dépouille pour le matériau de coupe CC650 est adéquate et l'augmentation des efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) respectivement de (248.3 ; 258.42 et 66.5) % pendant un temps d'usinage  $t=100\text{min}$

On a constaté que l'effort radial est le plus prépondérant dans les figures des cinq matériaux de coupe.

Cette augmentation rapide des efforts de coupe pour GC1525 ; H13A et GC3015 s'explique aussi par le frottement entre l'outil et la pièce ce qui accélère le mécanisme d'usure et par conséquent les efforts augmentent.

## CONCLUSION

L'étude des efforts de coupe réalisée dans ce travail permet de mieux comprendre ce phénomène en tournage dur et cela dans le but d'avoir une meilleure stabilité du système usinant. Les résultats des efforts et de la pression de coupe en fonction des conditions de coupe permettent de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant face à l'acier étudié. Cette démarche appelée couple - outil - matière, permet de définir un domaine de fonctionnement correct de l'outil. Aussi l'étude de la variation des efforts de coupe en fonction de l'usure permet de donner des informations sur l'état de l'arête de coupe en termes d'usure, ce qui est très important sur le plan pratique pour les applications de surveillance automatisée de la coupe [34].

III.4.5. Analyse de la rugosité

III.4.5.1. Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage

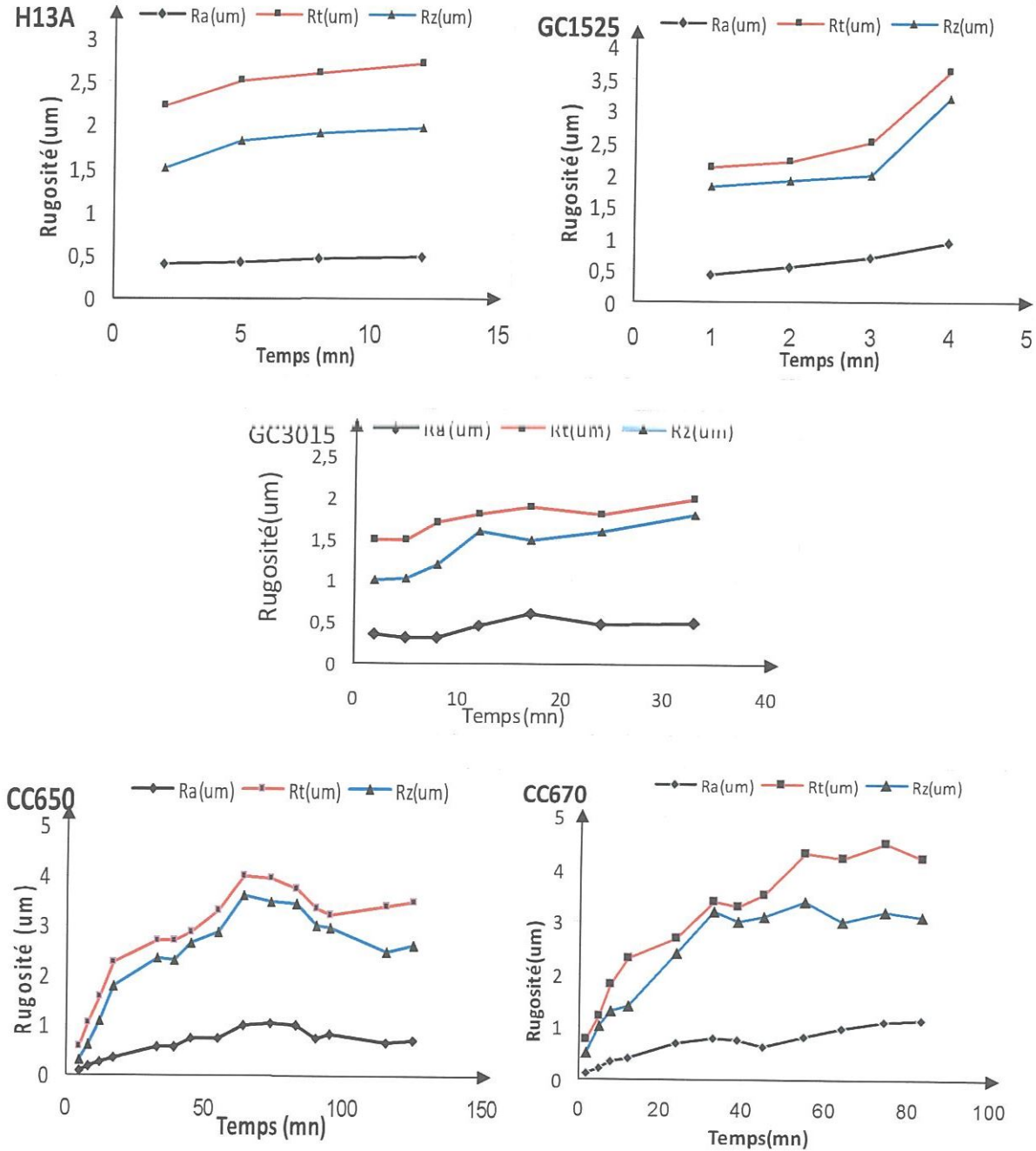


Figure III-21. Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage pour les cinq matériaux d'outils testés.

Les résultats présentés sur la figure III-21 montrent l'évolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage des cinq matériaux testés en usinant avec  $V_C=90\text{m/mn}$ ;  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$ . L'analyse montre que pour le matériau de coupe GC1525, les critères de la rugosité ( $R_a$ ;  $R_t$  et  $R_z$ ) sont respectivement ( $0.7$  ;  $2.5$  et  $3$ )  $\mu\text{m}$ . Ces valeurs ont été enregistrées pour  $t=3\text{min}$ . Pour H13A,  $R_a$  ;  $R_t$  et  $R_z$  sont respectivement ( $0.41$  ;  $2.5$  et  $1.8$ )  $\mu\text{m}$  ou bout d'un temps de 6 minutes et pour GC3015 ( $R_a$  ;  $R_t$  et  $R_z$ ) sont respectivement ( $0.48$  ;  $1.8$  et  $1.6$ )  $\mu\text{m}$  pendant une durée de vie  $t=24\text{min}$ . Par contre on a enregistré respectivement pour la céramique CC670 les rugosités ( $R_a$  ;  $R_t$  et  $R_z$ ) ( $0.83$  ;  $4.3$  et  $3.4$ )  $\mu\text{m}$  pour  $t=55\text{min}$ . quant à la céramique CC650 les critères de rugosité ( $R_a$  ;  $R_t$  et  $R_z$ ) sont respectivement ( $0.81$  ;  $3.2$  et  $2.95$ )  $\mu\text{m}$  pour une durée de  $t=100\text{min}$ . Les valeurs de la rugosité arithmétique  $R_a$  donnée par la rectification cylindrique sont variées de  $0,2$  à  $1,6\ \mu\text{m}$  [33]

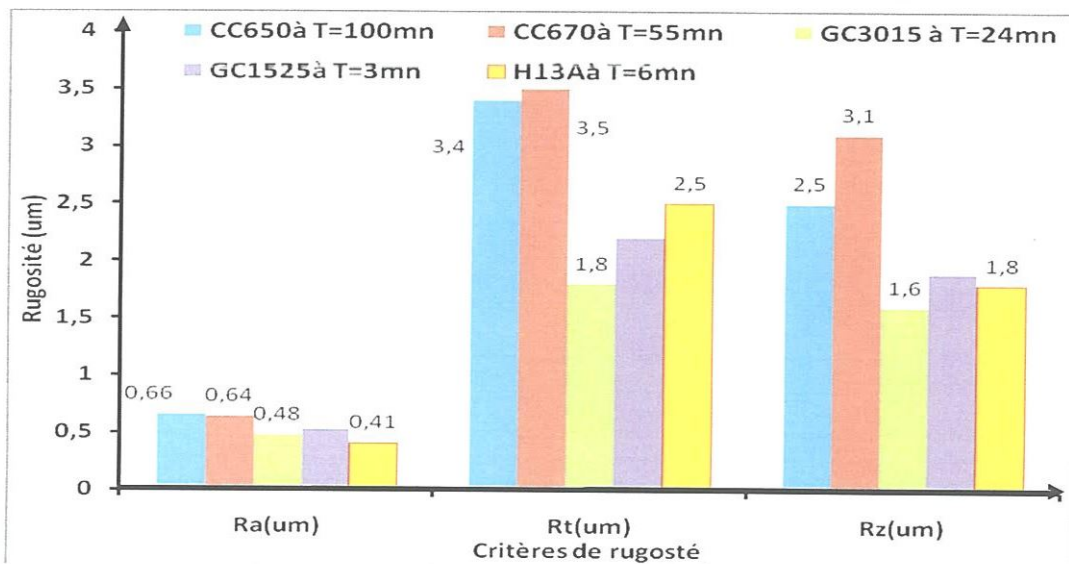
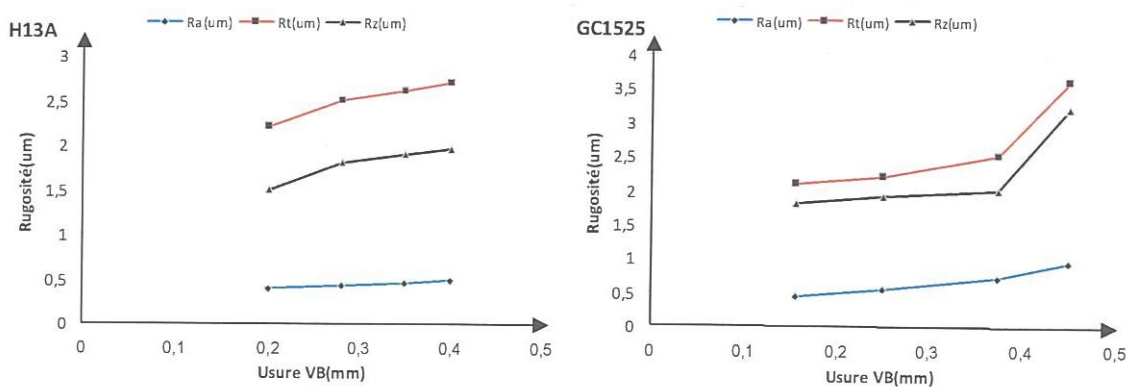
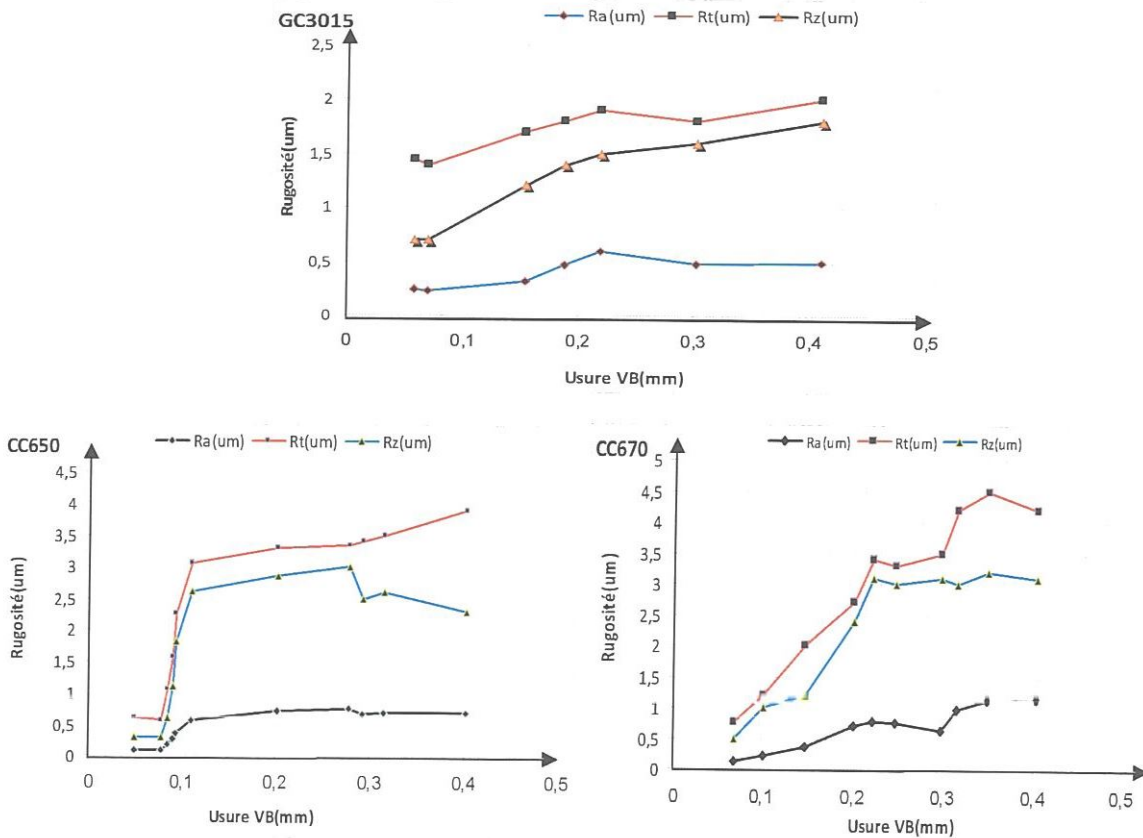


Figure III-22. Rugosité des différentes nuances de plaquettes de coupe pour une  $VB=0.3\text{mm}$

### III.4.5.2. Analyse de la rugosité en fonction l'usure VB.







**Figure III-23.** Evolution de la rugosité en fonction de VB

Les figures III-23, montrent l'évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille pour les cinq nuances de coupe à  $V_c=90\text{m/mn}$  ;  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.25\text{mm}$ . Les rugosités Ra, Rt et Rz générées par les nuances de céramique (CC670et CC650), sont plus grandes que celles obtenues par les autres nuances de carbure et du cermet (H13A ; GC3015 etGC1525).

Pour le matériau de coupe H13A : Sur le plan expérimental, pour  $V_c=90\text{m/min}$  ;  $f=0.08$  ;  $a_p=0.25$  et lorsque l'usure VB passe de 0.2 à 0.4mm les critères de rugosité Ra; Rt et Rz augmentent respectivement de 23.68% ; 22.72% et 30.66%.

Pour le matériau de coupe GC1525 : Sur le plan expérimental, pour  $V_c=90\text{m/min}$  ;  $f=0.08$  ;  $a_p=0.25$  et lorsque l'usure VB passe de 0.16 à 0.45mm les critères de rugosité Ra; Rt et Rz augmentent respectivement de 113.95% ; 71.42% et 77.77%.

Pour le matériau de coupe GC3015 : Sur le plan expérimental, pour  $V_c=90\text{m/min}$  ;  $f=0.08$  ;  $a_p=0.25$  et lorsque l'usure VB passe de 0.06 à 0.41mm les critères de rugosité Ra; Rt et Rz augmentent respectivement de (108.33% ; 37.9% et 157.14%).

Pour le matériau de coupe CC670 : Sur le plan expérimental, pour  $V_c=90\text{m/min}$  ;  $f=0.08$  ;  $a_p=0.25$  et lorsque l'usure VB passe de 0.07 à 0.4mm les critères de rugosité Ra; Rt et Rz augmentent respectivement de (850% ; 460% et 512%).

Pour le matériau de coupe CC650 : Sur le plan expérimental, pour  $V_c=90\text{m/min}$  ;  $f=0.08$  ;  $a_p=0.25$  et lorsque l'usure VB passe de 0.05 à 0.4 mm les critères de rugosité Ra; Rt et Rz augmentent respectivement de (600% ; 550% et 666.66%).

### III-5. Conclusions

Les essais d'usinage pratiqués sur l'acier **42CrMo4**; traité à 50 HRC; et usiné d'une part par différents matériaux, nous ont permis d'étudier l'influence du temps d'usinage sur l'usure, sur les efforts de coupe et sur la rugosité des surfaces usinées. D'autre part, l'évolution des efforts de coupe et de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille a été mise en évidence.

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

- 1) Le temps d'usinage a une grande influence sur l'usure.
- 2) Le choix des conditions de coupe (la vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) ont un effet important sur l'usure des matériaux de coupe.
- 3) L'usure est régulière pour les conditions de coupe testées.
- 4) L'effort de pénétration est très sensible à l'augmentation de l'usure.
- 5) L'usure en cratère KT est négligeable devant l'usure en dépouille VB.
- 6) La rugosité est très affectée par l'usure.
- 7) L'usure et le temps d'usinage ont un grand impact sur les efforts de coupe.

# Introduction

Étude et analyse bibliographique

Matériaux et technique expérimentale

Résultats expérimentaux

## **Analyse et discussion des résultats**

- V.1. Introduction
- V.2. Modèles de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe
- V.3. Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe
- V.4. Modèle de l'usure en dépouille VB en fonction des paramètres de coupe
- V.5. Conclusions

Conclusion générale

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et temps d'usinage) et les paramètres étudiés (efforts de coupe, rugosité et usure de l'outil). Pour faire une analyse de variance et pour déterminer les constantes des modèles mathématiques et le coefficient de corrélation de chaque modèle ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse, nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « MINITAB ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la rugosité, les efforts de coupe et sur l'usure de l'outil.

La méthode de surface de réponse permet d'examiner la relation entre une réponse et un ensemble de variables expérimentales quantitatives ou facteurs. Elle est souvent employée après identification de quelques facteurs contrôlables essentiels, pour rechercher les valeurs de facteurs qui optimisent la réponse. Les plans de surface de réponse sont choisis en général lorsque la présence d'une courbure est soupçonnée dans la surface de réponse [35].

Nous pouvons nous servir à la méthode de surface de réponse pour :

- ❖ Trouver les valeurs des facteurs (conditions d'exploitation) produisant la "meilleure" réponse ;
- ❖ Rechercher les valeurs des facteurs qui satisfont aux spécifications de procédé ;
- ❖ Identifier de nouvelles conditions d'usinage permettant une amélioration démontrée de la qualité du produit par rapport à la qualité atteinte dans les conditions actuelles ;
- ❖ Modéliser une relation entre les facteurs et la réponse ;

L'équation de régression est une représentation algébrique de la droite de régression. Elle est utilisée pour décrire la relation existant entre la variable de réponse et les variables de facteurs.

L'équation de régression prend la forme suivante :

$$Y = b_0 + b_1 Vc + b_2 f + b_3 ap + b_{12} Vc * f + b_{13} Vc * ap + b_{23} f * ap + b_{11} Vc * Vc + b_{22} f * f + b_{33} ap * ap + b_{123} Vc * f * ap + \varepsilon$$

Où :

- (Y) est la valeur de la réponse.
- Constante ( $b_0$ ) est la valeur de la variable de réponse lorsque les variables de prédiction ont une valeur nulle.
- Prédicateurs correspond aux variables de facteur ( $Vc, f$  et  $ap$ ).

**Coefficients :** Nombres par lesquels les variables d'une équation sont multipliées ; les coefficients ( $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$  et  $b_{123} \dots$ ) représentent la variation estimée de la réponse moyenne pour chaque variation d'une unité de la valeur du facteur. En d'autres termes, le coefficient est égal à la variation de Y lorsque ( $Vc, f$  ou  $ap$ ) augmente d'une unité.

**Erreur type de coefficient :** Ecart type de l'estimation d'un coefficient de régression. Il mesure la précision avec laquelle les données peuvent estimer la valeur inconnue du coefficient. Sa valeur est toujours positive et plus elle est petite, plus l'estimation est précise. L'erreur type d'un coefficient permet de déterminer si sa valeur diffère de manière significative de zéro – en d'autres termes, si le facteur a un effet significatif sur la réponse. La division du coefficient par son erreur type calcule une valeur de t ; si la valeur de p associée à cette statistique t est inférieure au niveau d'alpha que nous avons choisi, nous pouvons en conclure que le coefficient diffère de manière significative de zéro.

**P-value :** Permet de déterminer si un facteur est significatif ; en règle générale, cette composante est comparée à une valeur alpha de 0,05. Si la valeur de p est inférieure à 0,05, le facteur est significatif.

$R$  (**R carré**), décrit la variation des réponses observées expliquée par le modèle.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

Avec

$y_i$  : Réponse

$\hat{y}_i$  :  $y$  calculée d'après le model

$\bar{y}_i$  : Moyenne arithmétique de l'essai

$R$  ajusté est une version modifiée de  $R$  qui a été ajustée au nombre de termes du modèle. Si nous incluons des termes superflus,  $R$  peut augmenter de façon artificielle. A la différence de  $R$ ,  $R$  peut diminuer lorsque nous ajoutons des termes au modèle.

$$R^2_{adj} = 1 - \left[ \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \right] \left( \frac{n-1}{n-p-1} \right)$$

Avec

$y_i$  : Réponse

$\hat{y}_i$  :  $y$  calculée d'après le model

$\bar{y}_i$  : Moyenne arithmétique de l'essai

$n$ : nombre d'observation

$p$  : terme du nombre du model

La réduction du modèle permet de simplifier un modèle de régression en éliminant les termes insignifiants. La réduction du nombre de termes peut faciliter l'utilisation et la gestion du modèle. Si les termes insignifiants sont laissés dans le modèle, cela peut porter préjudice à sa capacité de prévision. Un modèle peut être réduit manuellement, ou automatiquement à l'aide d'une procédure algorithmique, telle qu'une régression pas à pas. Une autre technique est celle des meilleurs sous-ensembles, qui identifie, à l'aide du plus petit nombre de facteurs possible, le modèle de régression le mieux ajusté.

Pour de nombreux modèles, nous pouvons déterminer les termes statistiquement significatifs en examinant la valeur de  $P$  de chaque coefficient.

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

En se basant sur les résultats du chapitre III en particulier aux deux nuances de céramique (CC650 ; CC670) que nous avons jugé performantes du point de vue résistance à l'usure ; rugosité de surface usinée et efforts de coupe. Ceci pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe sur l'effort de coupe. Pour le faire, nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, ayant chacun deux niveaux de variation.

Facteurs							Paramètres		
Valeurs codifiées				Valeurs réelles			Composantes de l'effort de coupe		
N° Essais	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	V <sub>c</sub> (m/min)	f (mm/tr)	a <sub>p</sub> (mm)	F <sub>a</sub> (N)	F <sub>r</sub> (N)	F <sub>t</sub> (N)
Nuance CC650									
1	-1	-1	-1	90	0,08	0,25	36.17	71.63	88.9
2	-1	-1	+1	90	0,08	0,5	42.87	98.5	92.33
3	-1	+1	-1	90	0.16	0,25	63.19	158.93	154.9
4	-1	+1	+1	90	0,16	0,5	64.24	175.68	146.4
5	+1	-1	-1	180	0,08	0,25	105.48	167.84	178.67
6	+1	-1	+1	180	0,08	0,5	58.87	82.57	141.82
7	+1	+1	-1	180	0,16	0,25	277.69	363.19	338.01
8	+1	+1	+1	180	0,16	0,5	202.99	279.21	270.44
Nuance CC670									
1	-1	-1	-1	90	0,08	0,25	48.23	109.53	98.83
2	-1	-1	+1	90	0,08	0,5	52.4	153.63	95.14
3	-1	+1	-1	90	0.16	0,25	82.07	207.23	177.14
4	-1	+1	+1	90	0,16	0,5	78.09	254.1	146.81
5	+1	-1	-1	180	0,08	0,25	131.5	242.7	199.88
6	+1	-1	+1	180	0,08	0,5	112.39	182.35	158.4
7	+1	+1	-1	180	0,16	0,25	171.1	375.69	304.01
8	+1	+1	+1	180	0,16	0,5	232.86	432.04	314.98

**Tableau IV-1.** Résultats de l'effort de coupe en fonction des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe

L'analyse de la variance des différentes composantes de l'effort de coupe (F<sub>a</sub>, F<sub>r</sub> et F<sub>t</sub>), a été faite avec l'objectif d'analyser l'influence de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le temps d'usinage sur ce paramètre technologique.

Les résultats de la variance des différentes composantes de l'effort de coupe, sont montrés respectivement dans les tableaux (IV-2 à 4). Cette analyse a été effectuée pour un niveau de confiance de 95%.

### IV.2.1 Analyse de régression de l'effort axial en fonction des conditions de coupe.

La surface de réponse de l'effort axial en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe (*figure IV-1et IV-2*) montre que l'effort axial est très affecté par la variation de la profondeur de passe, suivie par l'avance et en dernier lieu par la variation de la vitesse de coupe. Ceci est mis valable pour les deux matériaux de coupe testés.

Coefficients de régression estimés pour Fa(N) de la nuance CC650					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	106,44		2,805	37,946	0,017
Vc (m/mn)	-14,19		2,805	-5,061	0,124
f (mm/tr)	45,59		2,805	16,253	0,039
ap (mm)	54,82		2,805	19,544	0,033
Vc*f	-4,22		2,805	-1,504	0,374
Vc*ap	-16,13		2,805	-5,751	0,110
f*ap	33,49		2,805	11,940	0,053
		$R^2 = 99,9\%$		$R^2_{aj} = 99,2\%$	
Coefficients de régression estimés pour Fa(N) après élimination des termes non significatifs					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T-value	P-value
Constante	106,44		11,04	4,130	0,001
f (mm/tr)	45,59		11,04	4,130	0,014
ap (mm)	54,59		11,04	4,966	0,008
f (mm/tr) *ap (mm)	33,49		11,04	3,034	0,039
		$R^2 = 92,72\%$		$R^2_{aj} = 87,26\%$	
Coefficients de régression estimés pour Fa(N) de la nuance CC670					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	112,7		183,18	0,615	0,649
Vc	-0,8		1,08	-0,780	0,578
f (mm/tr)	-938,1		1212,59	-0,774	0,581
ap (mm)	-41,9		388,03	-0,108	0,931
Vc*f	5,1		6,18	0,817	0,564
Vc*ap	0,9		1,98	0,477	0,717
f*ap	2513,5		2225,50	1,129	0,461
		$R^2 = 96,5\%$		$R^2_{aj} = 75,3\%$	
Coefficients de régression estimés pour Fa(N) après élimination des termes non significatifs					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	-113,0		40,01	-2,847	0,036
f (mm/tr)	686,3		229,47	2,991	0,030
ap (mm)	387,1		73,43	5,271	0,003
		$R^2 = 88,02\%$		$R^2_{aj} = 83,23\%$	

Tableau IV-2. Régression de la surface de réponse pour l'effort axial.



Le tableau IV-2 montre que la profondeur de passe et l'avance ont un impact significatif sur l'effort axial puisque la valeur de la probabilité P-value est inférieure à 0,05. La vitesse de coupe et l'interaction entre  $V_c$ - $f$ ,  $V_c$ - $a_p$  et  $f$ - $a_p$  n'ont pas d'influence importante sur  $F_a$  (P-value > 0,05).

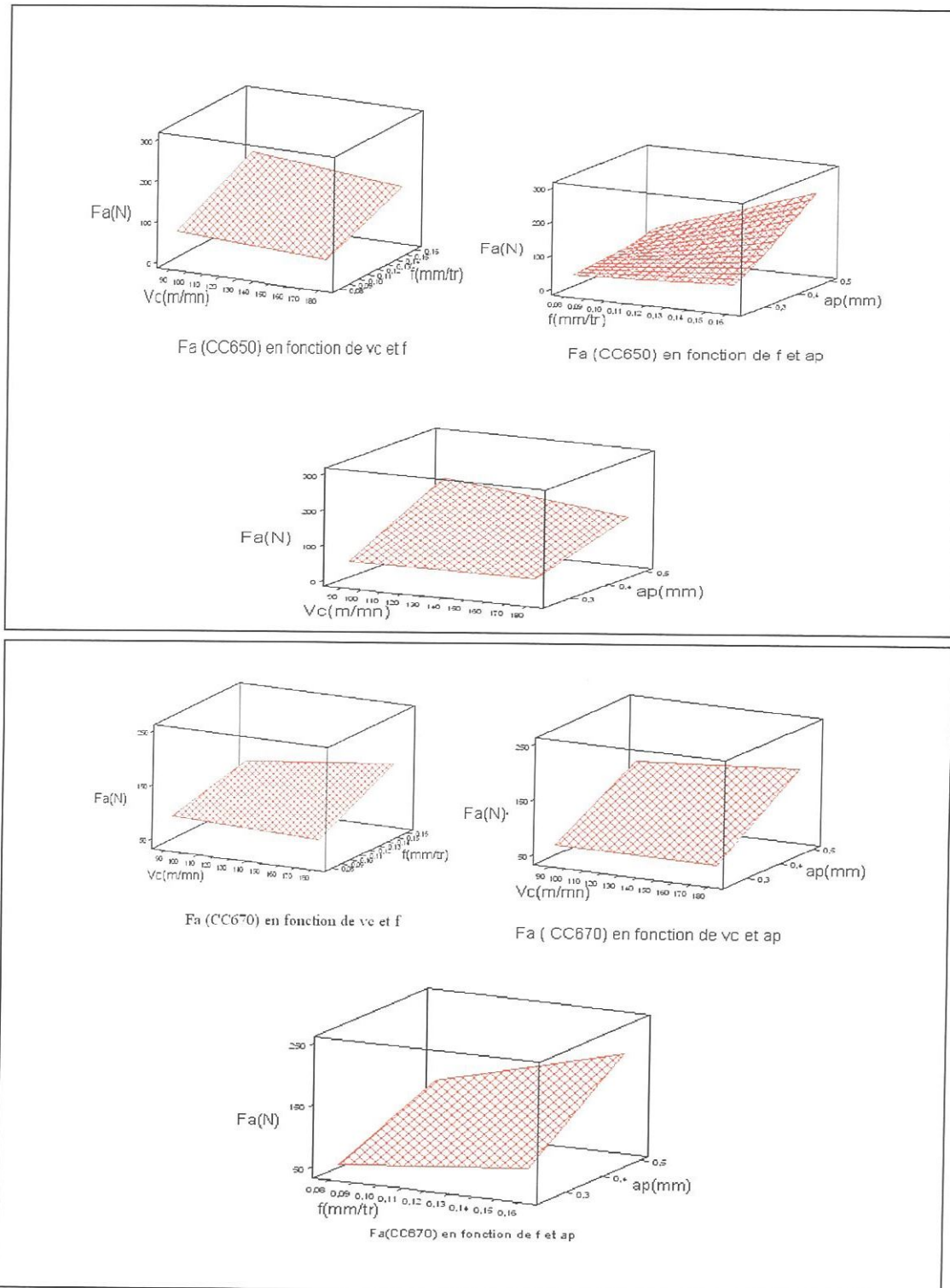
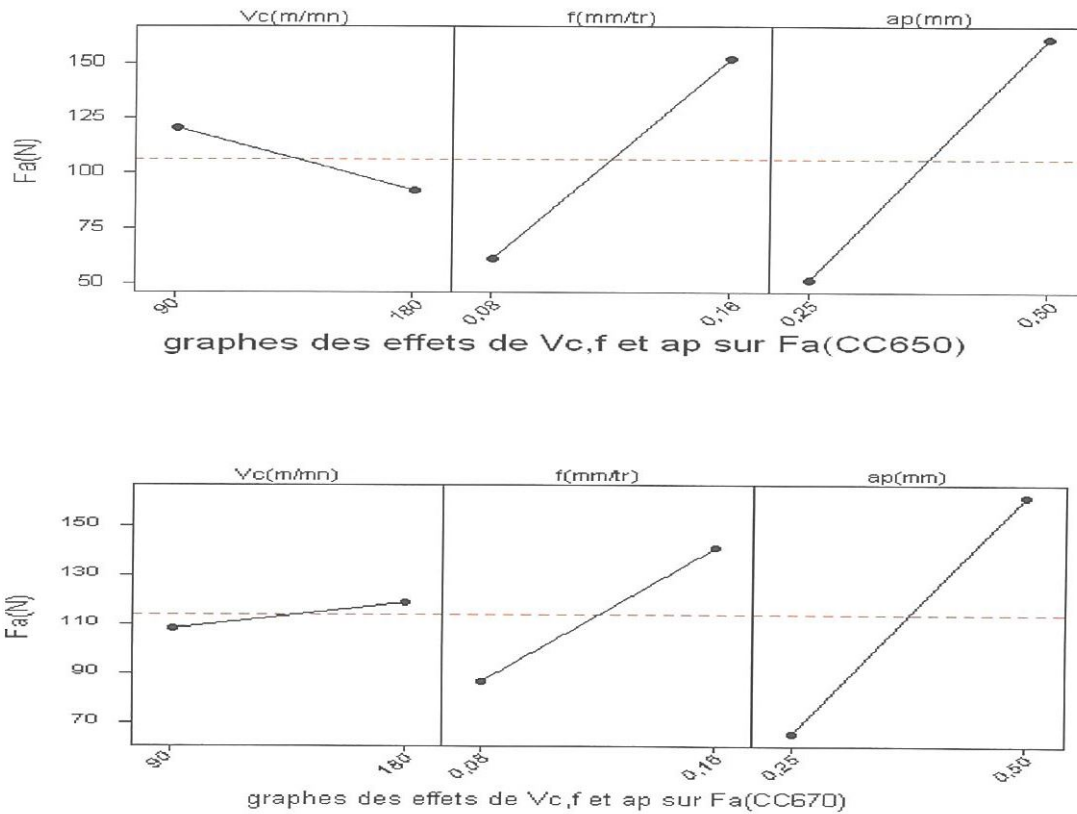


Figure IV-1.  $F_a$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$

La présentation en 3D de la figure IV-1 indique la pente de la profondeur de passe est plus supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort axiale suivi de l'avance et en dernier lieu de la vitesse de coupe. Ceci est constaté pour les deux matériaux de coupe.



**Figure IV-2.** Graphes des effets de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur  $F_a$  pour les deux céramiques

La Figure IV-2 illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort axial. On a constaté que l'augmentation de la vitesse de coupe minimise  $F_a$ . Ceci est surtout mis en évidence pour le cas de la nuance CC650. L'effort axial s'élève avec l'augmentation de l'avance et plus encore avec l'augmentation de la profondeur de passe.

L'équation de régression de  $F_a$  est :

Modèle complet :

$$F_{a(CC650)} = 106.44 - 14.19 V_c + 45.59f + 54.82a_p - 4.22V_c * f - 16.13 V_c * a_p + 33.49f * a_p$$

$$R^2 = 99,9\%$$

$$\text{Modèle réduit : } F_{a(CC650)} = 106,44 + 45,59f + 54,82 a_p + 33,49f * a_p \quad R^2 = 92,72\%$$

$$F_{a(CC670)} = 112.7 - 0.8 V_c - 938.1 f - 41.9 a_p + 5.1 V_c * f + 0.9 V_c * a_p + 2513.5 f * a_p$$

$$R^2 = 96.5$$

$$\text{Modèle réduit : } F_{a(CC670)} = -113.0 + 686.3 f + 387.1 a_p \quad R^2 = 88.02\%$$

IV.2.2 Analyse de régression : Fr en fonction de Vc, f et a<sub>p</sub>

Coefficients de régression estimés pour Fr(N) de la nuance CC650					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	174,69		1,426	122,485	0,005
Vc (m/mn)	-15,70		1,426	-11,011	0,058
f (mm/tr)	69,56		1,426	48,770	0,013
a <sub>p</sub> (mm)	48,51		1,426	34,011	0,019
Vc*f	-1,10		1,426	-0,774	0,581
Vc*a <sub>p</sub>	-26,61		1,426	-18,656	0,034
f*a <sub>p</sub>	28,44		1,426	19,940	0,032
$R^2 = 99,98,0\%$			$R^2$ (ajus) = 99,7%		
Coefficients de régression estimés pour Fr(N) après élimination des termes non significatifs					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	174,69		1,275	136,989	0,000
Vc (m/mn)	-15,70		1,275	-12,314	0,007
f (mm/tr)	69,56		1,275	54,546	0,000
a <sub>p</sub> (mm)	48,51		1,275	38,039	0,001
Vc*a <sub>p</sub>	-26,61		1,275	20,866	0,002
f*a <sub>p</sub>	28,44		1,275	22,301	0,002
$R^2 = 99,98\%$			$R^2$ (ajus) = 99,7%		
Coefficients de régression estimés pour Fr(N) de la nuance CC670					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	39		234,44	0,165	0,896
Vc (m/mn)	0.0001		1,38	0,027	0,983
f (mm/tr)	-1035		1551,90	-0,667	0,626
a <sub>p</sub> (mm)	240		496,61	0,483	0,714
Vc*f	8		7,91	1,049	0,485
Vc*a <sub>p</sub>	-2		2,53	-0,834	0,558
f*a <sub>p</sub>	4613		2848,25	1,620	0,352
$R^2 = 98,1\%$			$R^2$ (ajus) = 86,5%		
Coefficients de régression estimés pour Fr(N) après élimination des termes non significatifs					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	-163,8		68,00	-2,408	0,061
f (mm/tr)	1815,2		390,01	4,654	0,006
a <sub>p</sub> (mm)	508,3		124,80	4,073	0,010
$R^2 = 88,44\%$			$R^2$ (ajus) = 83,81%		

**Tableau IV-3.** Régression de la surface de réponse pour l'effort radial.

Le tableau IV-3 prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe et l'interaction entre Vc-a<sub>p</sub> et f-a<sub>p</sub>, sont significatifs en ce qui concerne l'effort radial généré par la nuance CC650 ; mais l'effort radial développé par

la nuance CC670 est influencé seulement par les éléments de coupe  $f$  et  $a_p$ , mais il n'est pas influencé par les interactions  $Vc$ - $f$ ,  $a_p$ - $f$  et  $Vc$ - $a_p$ .

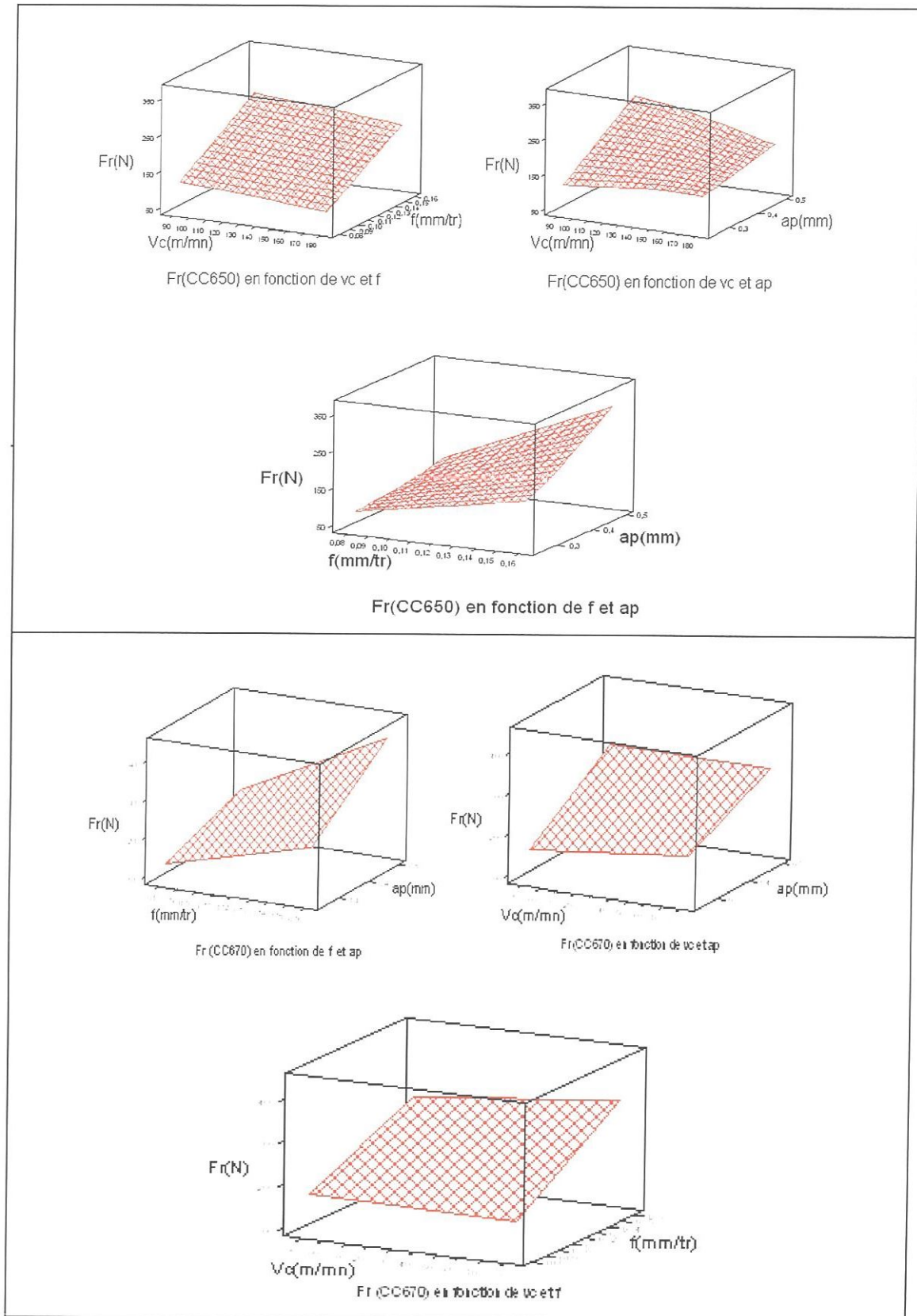


Figure IV-3.  $Fr$  en fonction de  $Vc$ ,  $f$  et  $a_p$

L'analyse détaillée de la surface de réponse de l'effort radial trouvé (figure IV -3), confirme que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une légère diminution de l'effort radial. La variation de la profondeur de passe et de l'avance induit une croissance de l'effort radial.

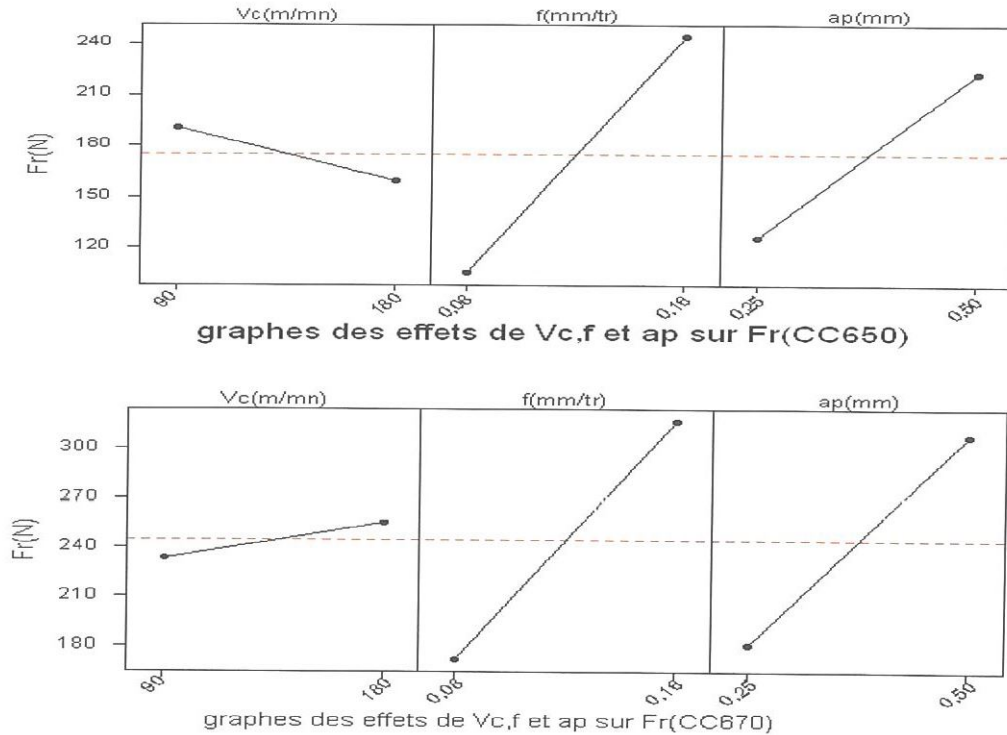


Figure IV-4. Graphes des effets de Vc, f et ap sur Fr

La Figure IV-4 illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort radial. On remarque que l'augmentation de la vitesse de coupe minimise Fr, ce là est valable pour le cas de la nuance CC650. L'effort radial augmente avec l'accroissement de l'avance, et de la profondeur de passe.

L'équation de régression de Fr est :

Modèle complet

$$Fr_{(CC650)} = 174.69 - 15.70 Vc + 69.56 f + 48.51 ap - 1.10 Vc * f - 26.61 Vc * ap + 28.44 f * ap$$

$$R^2 = 99.98\%$$

Modèle réduit :  $Fr_{(CC650)} = 174.69 - 15.70 Vc + 69.56 f + 48.51 ap - 26.61 Vc * ap + 28.44 f * ap$

$$R^2 = 99.98\%$$

$$Fr_{(CC670)} = 39 + 0.0001 Vc - 1035 f + 240 ap + 8 Vc * f - 2 Vc * ap + 4613 f * ap$$

$$R^2 = 98.1\%$$

Modèle réduit :  $Fr_{(CC670)} = -163.8 + 1815.2 f + 508.3 ap$

$$R^2 = 88.44\%$$

## IV.2. 3 Analyse de régression : Ft en fonction de Vc, f et ap

Coefficients de régression estimés pour Ft(N) de la nuance CC650				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	176,43	2,349	75,118	0,008
Vc (m/mn)	-13,69	2,349	-5,827	0,108
f (mm/tr)	51,00	2,349	21,715	0,029
ap (mm)	55,80	2,349	23,758	0,027
Vc*f	-5,33	2,349	-2,270	0,264
Vc*ap	-12,42	2,349	-5,287	0,119
f*ap	20,99	2,349	8,935	0,071
S = 6,643	R <sup>2</sup> = 99,9%		R <sup>2</sup> (ajus) = 99,4%	
Coefficients de régression estimés pour Ft(N)				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	176,43	9,689	18,210	0,000
f (mm/tr)	51,00	9,689	5,264	0,006
ap (mm)	55,80	9,689	5,759	0,005
f*ap	20,99	9,689	2,166	0,096
S = 27,40	R <sup>2</sup> = 94,25%		R <sup>2</sup> (ajus) = 89,94%	
Coefficients de régression estimés pour Ft(N) de la nuance CC670				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	72,4	162,75	0,445	0,734
Vc (m/mn)	-0,4	0,96	-0,442	0,735
f (mm/tr)	-246,7	1077,33	-0,229	0,857
ap (mm)	56,6	344,75	0,164	0,896
Vc*f	1,8	5,49	0,326	0,799
Vc*ap	0,1	1,76	0,044	0,972
f*ap	3268,3	1977,25	1,653	0,346
S = 27,96	R <sup>2</sup> = 98,4%		R <sup>2</sup> (ajus) = 88,8%	
Coefficients de régression estimés pour Ft(N)				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	-131,9	40,91	-3,223	0,023
f (mm/tr)	1220,9	234,64	5,203	0,003
ap (mm)	459,3	75,08	6,118	0,002
S = 26,54	R <sup>2</sup> = 92,81%		R <sup>2</sup> (ajus) = 89,93	

**Tableau IV-4.** Régression de la surface de réponse pour l'effort tangentiel.

L'analyse du tableau IV-4, montre que le facteur de l'avance (P-value = 0.006) (CC650), (P-value = 0.003) (CC670) et celui de la profondeur de passe (P-value = 0,005) (CC650) (P-value = 0,002) (CC670) ont une influence significative sur l'effort tangentiel (Ft). Tandis que la vitesse de coupe a un effet moins important. Les interactions (Vc-f; Vc-ap et f- ap) n'influent pas sur Fr.

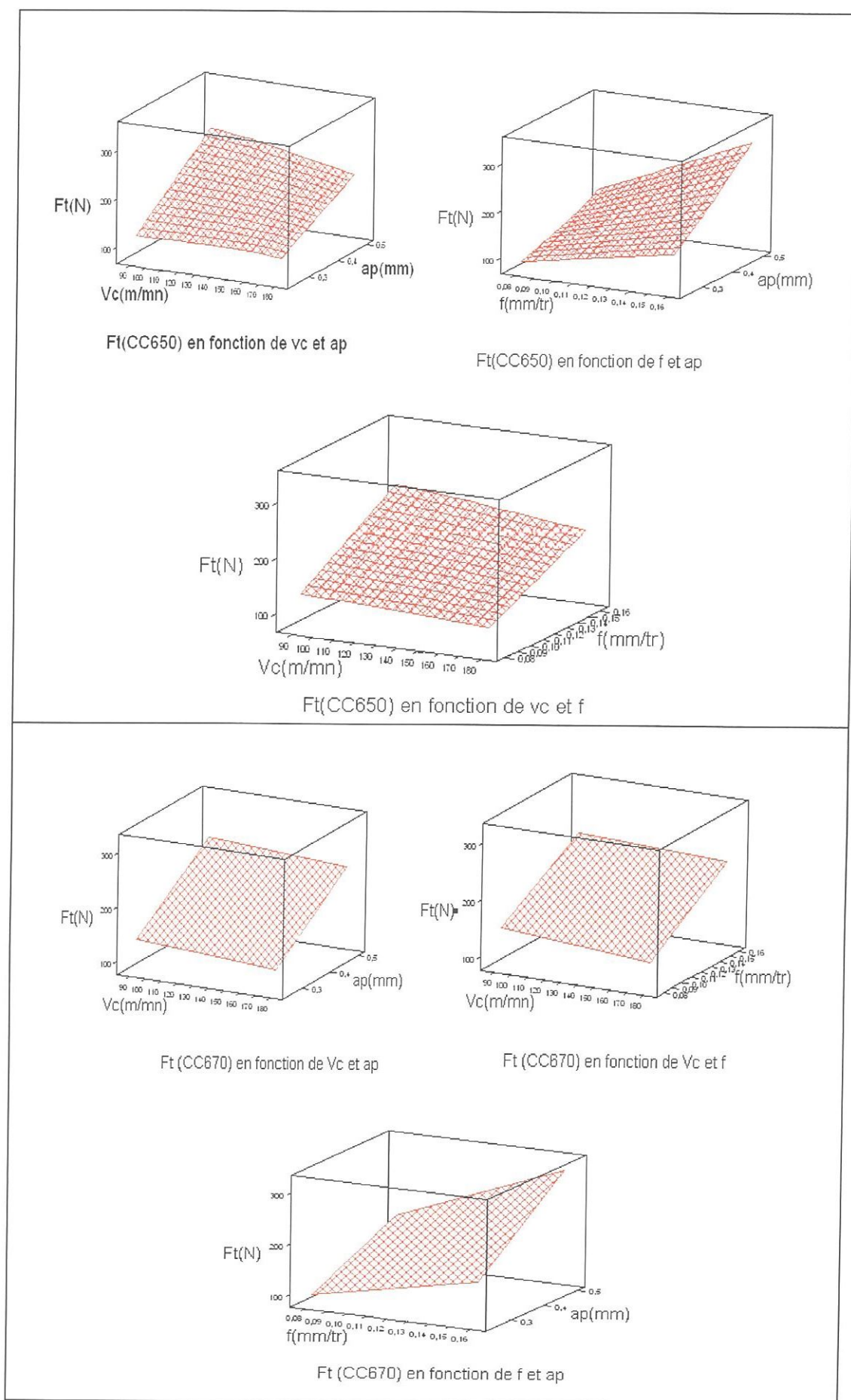


Figure IV-5.  $F_t$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $ap$

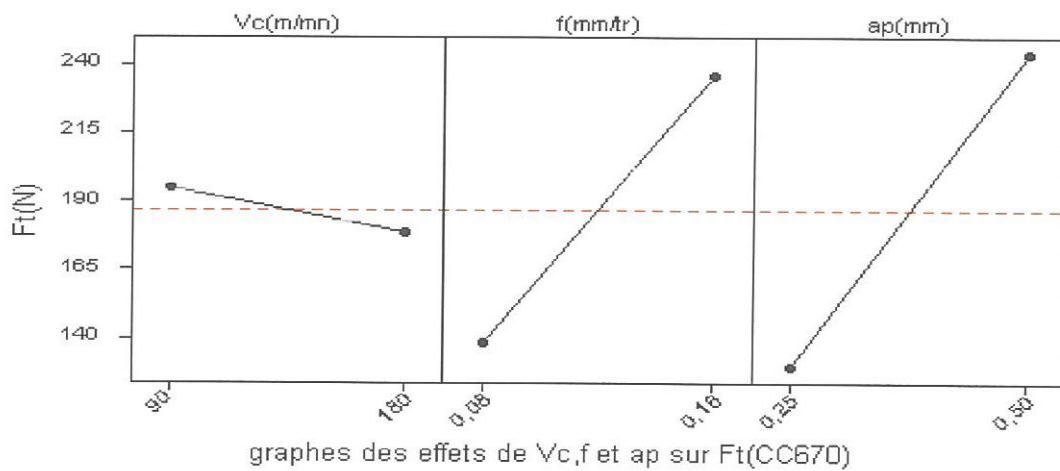
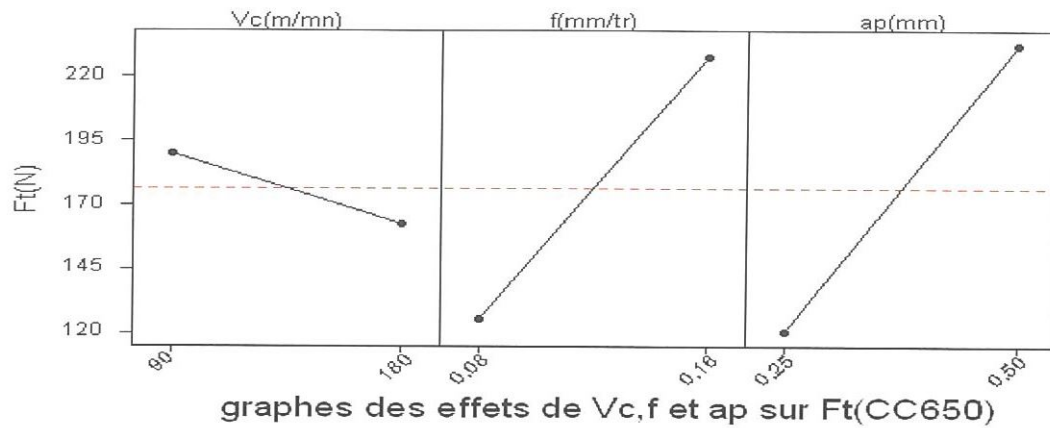


Figure IV-6. Graphes des effets de Vc, f et ap sur Ft

L'équation de régression de Ft est :

Modèle complet

$$Ft_{(CC650)} = 176.43 - 13.69 Vc + 51.00 f + 55.80 ap - 5.33 Vc * f - 12.42 Vc * ap + 20.99 f * ap$$

$$R^2 = 99,9\%$$

$$Ft_{(CC670)} = 72.4 - 0.4 Vc - 246.7 f + 56.6 ap + 1.8 Vc * f + 0.1 Vc * ap + 3268.3 f * ap$$

$$R^2 = 98,4\%$$

Modèle réduit :

$$Ft_{(CC650)} = 176.43 + 51.00 f + 55.80 ap + 20.99 f * ap \quad R^2 = 94,25\%$$

$$Ft_{(CC670)} = -131.9 + 1220.9 f + 459.3 ap \quad R^2 = 92,81\%$$



### IV.3. Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe sur la rugosité de surface, nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, chaque facteur à deux niveaux.

Facteurs							Paramètres		
Valeurs codifiées				Valeurs réelles			Critères de rugosité		
N° Essais	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Vc (m/min)	f (mm/tr)	a <sub>p</sub> (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)
CC650									
1	-1	-1	-1	90	0.08	0.25	0.27	1.5	1.1
2	+1	-1	-1	180	0.08	0.25	0.16	1.0	0.55
3	-1	+1	-1	90	0.16	0.25	0.40	2.15	1.5
4	+1	+1	-1	180	0.16	0.25	0.55	2.8	2.05
5	-1	-1	+1	90	0.08	0.5	0.165	1.1	0.5
6	+1	-1	+1	180	0.08	0.5	0.125	0.9	0.4
7	-1	+1	+1	90	0.16	0.5	0.62	2.8	2.4
8	+1	+1	+1	180	0.16	0.5	0.73	3.4	2.75
CC670									
1	-1	-1	-1	90	0.08	0.25	0.35	2.2	1.3
2	+1	-1	-1	180	0.08	0.25	0.22	1.4	0.8
3	-1	+1	-1	90	0.16	0.25	0.85	4.5	3.3
4	+1	+1	-1	180	0.16	0.25	0.80	3.9	3.1
5	-1	-1	+1	90	0.08	0.5	0.40	2.1	1.5
6	+1	-1	+1	180	0.08	0.5	0.75	4.0	2.9
7	-1	+1	+1	90	0.16	0.5	0.47	2.6	1.7
8	+1	+1	+1	180	0.16	0.5	0.51	2.5	2.0

*Tableau IV-5. Résultats de la rugosité en fonction des différentes combinaisons du plan d'expérience*

#### IV.3.1 Analyse de régression de la rugosité arithmétique.

L'analyse du tableau IV-6, montre que la profondeur de passe et la vitesse de coupe n'ont pas une signification sur la variation de la rugosité (Ra) dont le cas de la nuance CC650, par contre pour la nuance CC670 l'avance, la profondeur de passe et l'interaction  $f$ - $a_p$  ont une signification statistique sur la rugosité moyenne arithmétique (Ra).

Coefficients de régression estimés pour Ra (um) de la nuance CC650 pour le model complet				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T-value	P-value
Constante	0,377	0,014	27,455	0,023
Vc(m/mn)	0,014	0,014	1,000	0,500
f(mm/tr)	0,197	0,014	14,364	0,044
ap(mm)	0,032	0,014	2,364	0,255
Vc*f	0,051	0,014	3,727	0,167
Vc*ap	0,004	0,014	0,273	0,830
f*ap	0,067	0,014	4,909	0,128
S = 0,03889		R <sup>2</sup> = 99,6%	R <sup>2</sup> (ajus) = 97,2%	
Coefficients de régression estimés pour Ra (um) ( model réduit)				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T-value	P-value
Constante	0,377	0,038	9,953	0,000
f(mm/tr)	0,197	0,038	5,207	0,002
S = 0,1215		R <sup>2</sup> = 81,88 %	R <sup>2</sup> (ajus) = 78,86 %	
Coefficients de régression estimés pour Ra(um) de la nuance CC670 (model complet )				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T-value	P-value
Constante	-0,29	0,061733	-4,718	0,133
Vc(m/mn)	-0,0001	0,000363	-8,947	0,071
f(mm/tr)	11,22	0,408647	27,453	0,023
ap(mm)	1,07	0,130767	8,182	0,077
Vc*f	0,0001	0,002083	2,333	0,258
Vc*ap	0,01	0,000667	9,000	0,070
f*ap	-20,25	0,750000	-27,000	0,024
S = 0,01061		R <sup>2</sup> = 99,95%	R <sup>2</sup> (ajus) = 99,8%	
Coefficients de régression estimés pour Ra(um) (model réduit)				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T-value	P-value
Constante	-0,730	0,199	-3,672	0,021
f(mm/tr)	11,88	1,572	7,555	0,002
ap(mm)	1,88	0,503	3,738	0,020
f*ap	-20,25	3,976	-5,092	0,007
S = 0,056		R <sup>2</sup> = 96,55%	R <sup>2</sup> (ajus) = 93,97%	

Tableau IV-6. Régression de la surface de réponse : Ra (μm)

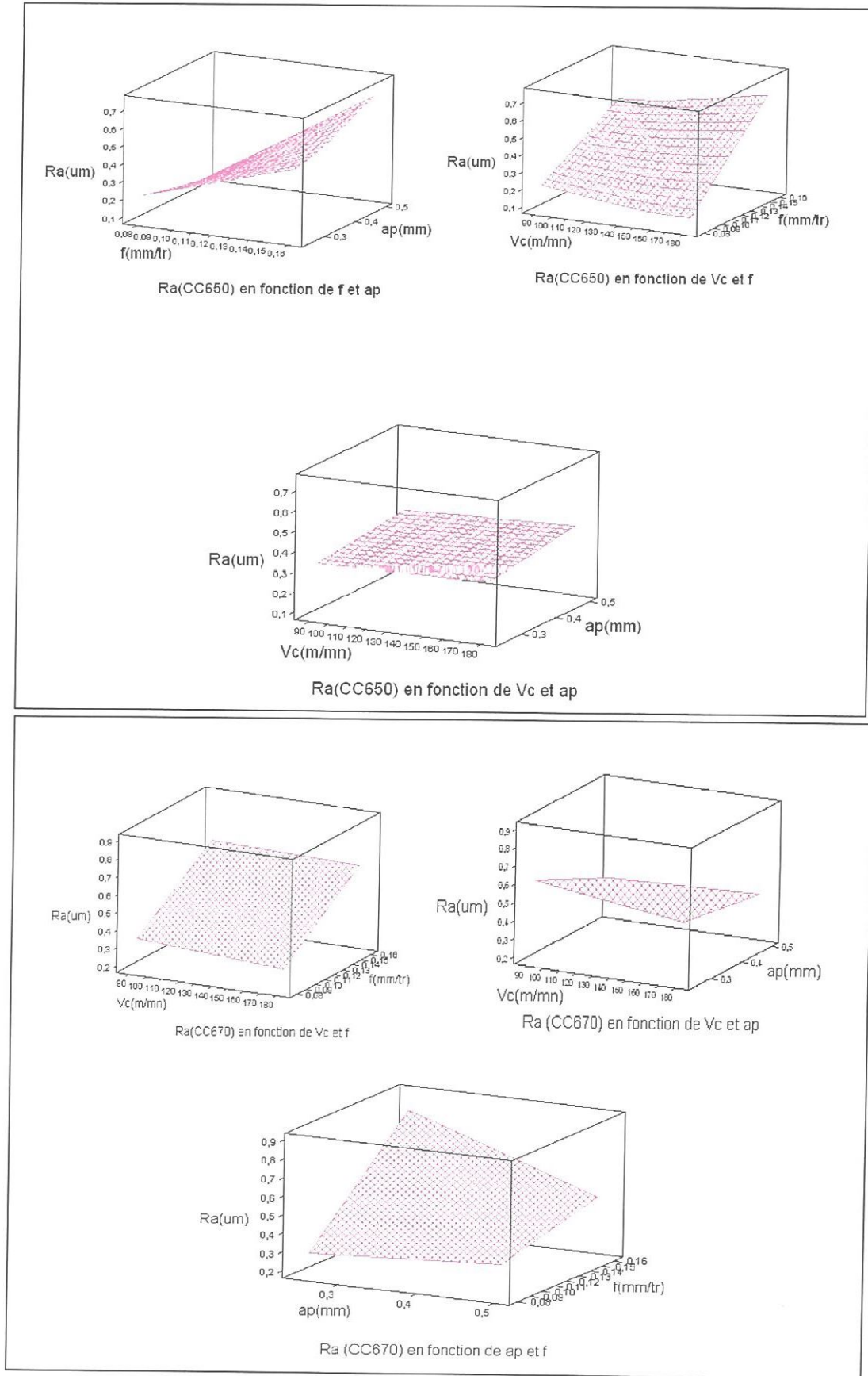


Figure IV-7.  $Ra$  en fonction de  $Vc$ ,  $f$  et  $a_p$

La Figure IV-7 montre que la rugosité (Ra) est très affectée par l'avance. On a constaté que (Ra) s'accroît légèrement avec l'augmentation de la profondeur de coupe.

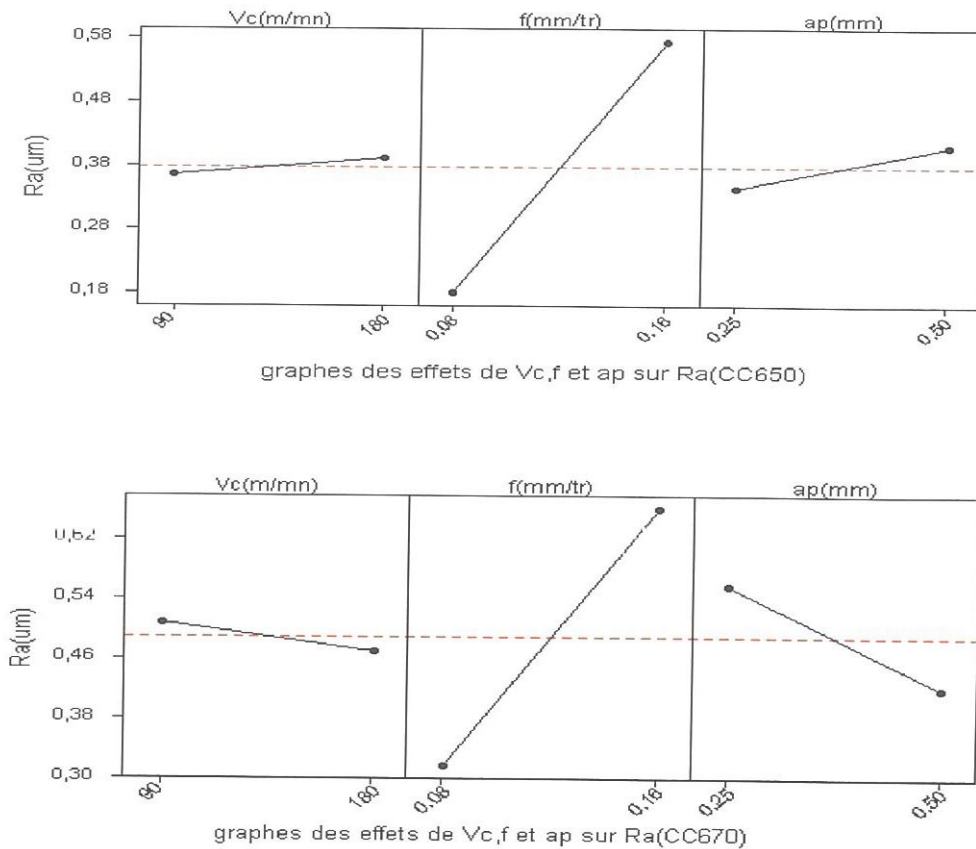


Figure IV-8. Graphes des effets de Vc, f et ap sur Ra

Les graphes des effets moyens de (Ra) en fonction des conditions de coupe (*figure IV.8*) montrent que le plus influant sur la rugosité arithmétique (Ra) est l'avance. La vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un effet faible concernant la nuance CC650, par contre l'augmentation de Vc ou ap fait améliorer la rugosité (Ra) pour la nuance CC670.

L'équation de régression de Ra est :

$$\text{Modèle complet } Ra_{(CC650)} = 0,3775 + 0,0137 Vc + 0,1975 f + 0,0325 ap + 0,0512 Vc*f + 0,0037 Vc*ap + 0,0675 f*ap \quad R^2 = 99,6\%$$

$$\text{Modèle réduit : } Ra_{(CC650)} = 0,377 + 0,1975 f \quad R^2 = 81,9 \%$$

$$Ra_{(CC670)} = -0,29 - 0,0001 Vc + 11,22 f + 1,07 ap + 0,0001 Vc*f + 0,01 Vc*ap - 20,25 f*ap \quad R^2 = 99,95\%$$

$$\text{Modèle réduit : } Ra_{(CC670)} = -0,73 + 11,88 f + 1,88 a_p - 20,25 f*ap \quad R^2 = 96,55\%$$

### IV.3.2 Analyse de régression : Rt en fonction de Vc, f et a<sub>p</sub>

L'équation de régression est :

$$Rt(CC650) = +1.96 + 0.831f \quad R^2 = 84,8\%$$

$$Rt(CC670) = -3,550 + 58,75f + 11,8 a_p - 115 f * a_p \quad R^2 = 89,32\%$$

Coefficients de régression estimés pour Rt(um) de la nuance CC650 pour le model complet					
Terme	Coeff	Er-T Coef	T-value	P-value	
Constante	1,95625	0,04375	44,714	0,014	
Vc (m/mn)	0,06875	0,04375	1,571	0,361	
f (mm/tr)	0,83125	0,04375	19,000	0,033	
ap (mm)	0,09375	0,04375	2,143	0,278	
Vc*f	0,24375	0,04375	5,571	0,113	
Vc*ap	0,03125	0,04375	0,714	0,605	
f*ap	0,21875	0,04375	5,000	0,126	
S = 0,1237		R <sup>2</sup> = 99,8%		R <sup>2</sup> (ajus) = 98,4%	
Coefficients de régression estimés pour Rt(um)					
Terme	Coeff	Er-T Coef	T-value	P-value	
Constante	1,95625	0,1436	13,626	0,000	
f (mm/tr)	0,83125	0,1436	5,790	0,001	
S = 0,406074		R <sup>2</sup> = 84,82 %		R <sup>2</sup> (ajus) = 82,29 %	
Coefficients de régression estimés pour Rt(um) de la nuance CC670 pour le model complet					
Terme	Coeff	Er-T Coef	T -value	P-value	
Constante	-1,7	2,0578	-0,814	0,565	
Vc (m/mn)	-0,0001	0,0121	-1,147	0,456	
f (mm/tr)	64,4	13,6216	4,726	0,133	
ap (mm)	5,8	4,3589	1,331	0,410	
Vc*f	-0,0	0,0694	-0,600	0,656	
Vc*ap	0,0	0,0222	2,000	0,295	
f*ap	-115,0	25,0000	-4,600	0,136	
S = 0,3536		R <sup>2</sup> = 98,2%		R <sup>2</sup> (ajus) = 87,5%	
Coefficients de régression estimés pour Rt(um)					
Terme	Coeff	Er-T Coef	T-value	P-value	
Constante	1,925	1,531	-2,319	0,081	
f (mm/tr)	15,625	12,103	4,854	0,008	
ap (mm)	-2,000	3,873	3,047	0,038	
f*ap	-115,000	30,619	-3,756	0,020	
S = 0,433		R <sup>2</sup> = 89,32%		R <sup>2</sup> (ajus) = 81,30%	

Tableau IV-7. Régression de la surface de réponse : Rt(μm)

Le tableau V-7 montre que l'effet de la vitesse d'avance est significatif sur l'évolution de la rugosité totale (Rt) concernant la nuance CC650. La rugosité (Rt) n'est pas beaucoup affectée par la variation de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe, et il ya une seule interaction entre les paramètres de coupe pour le cas de nuance CC670.

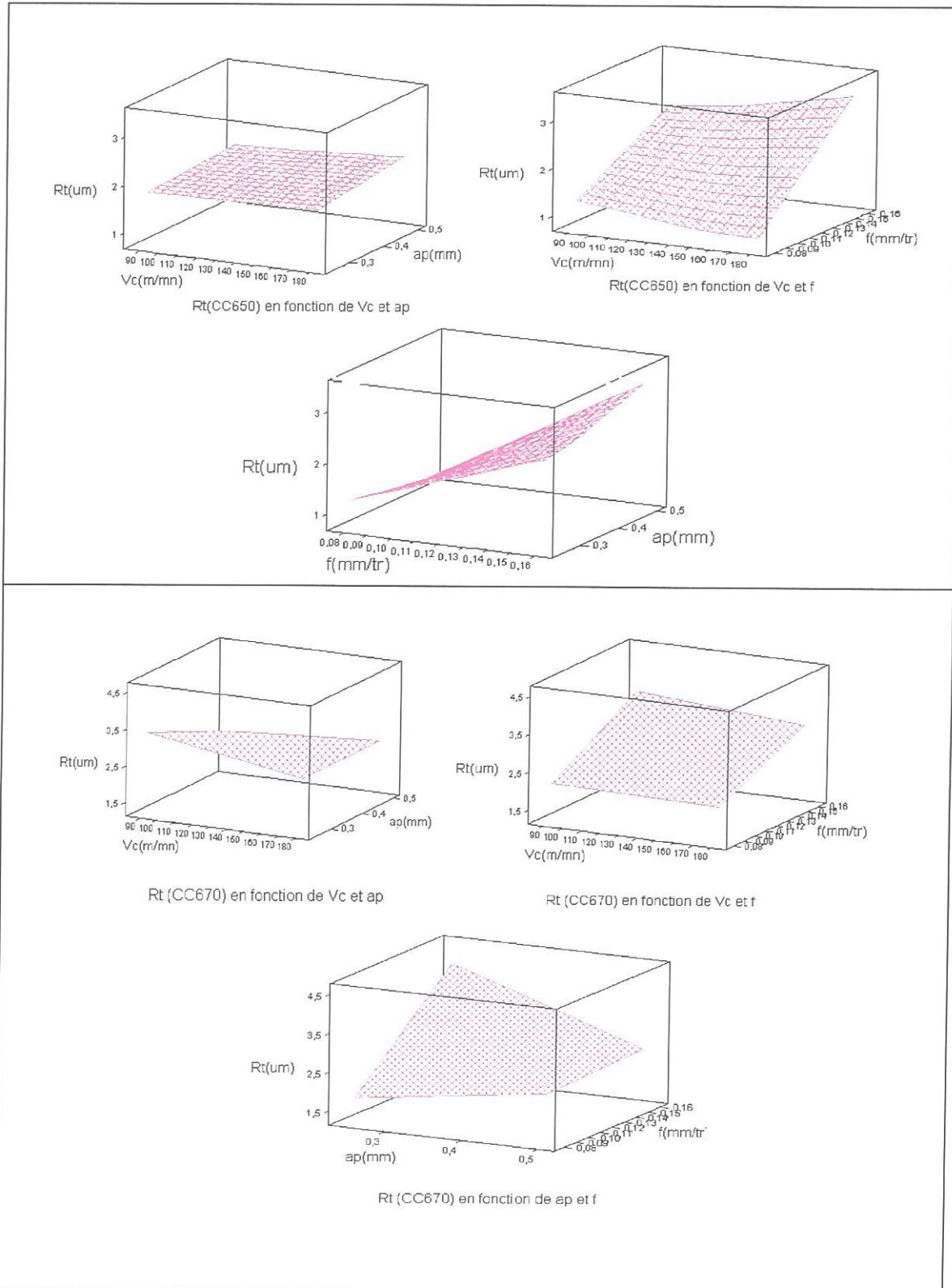


Figure IV-9. Rt en fonction de Vc, f et  $a_p$

On remarque sur la Figure IV-9 que le facteur le plus influant sur la rugosité  $R_t$  est l'avance ( $f$ ) concernant la nuance de coupe CC650, par contre elle influe moins sur  $R_t$  pour la nuance CC670.

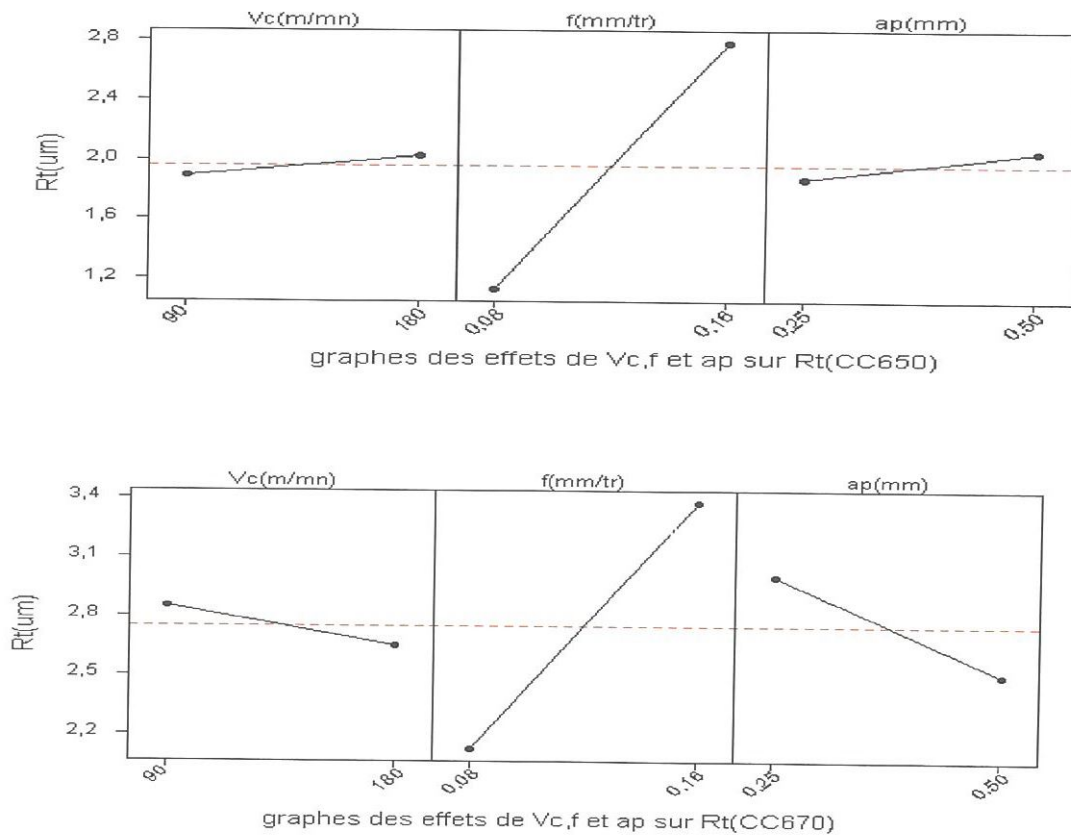


Figure IV-10. Graphes des effets de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  sur  $R_t$

### IV.3.3 Analyse de régression de la rugosité $R_z$

Coefficients de régression estimés pour  $R_z$  ( $\mu m$ ) de la nuance CC650

Terme	Coeff	Er-T Coef	T-value	P-value
Constante	1,40625	0,155	9,088	0,000
$f$ (mm/tr)	0,769	0,155	4,968	0,003

R-carré = 80,44 %  $R^2_{aj}$  = 77,18 %

Coefficients de régression estimés pour  $R_z$  ( $\mu m$ ) de la nuance CC670

Terme	Coeff	Er-T Coef	T-value	P-value
Constante	-3,350	0,7706	-4,348	0,012
$f$ (mm/tr)	49,375	6,0917	8,105	0,001
$a_p$ (mm)	9,00	1,9494	4,617	0,010
$f \cdot a_p$	-90,00	15,41	-5,840	0,004

R-carré = 96,44%  $R^2_{aj}$  = 93,77%

Tableau IV-8. Régression de la surface de réponse :  $R_z$  ( $\mu m$ )

Le tableau IV-8 montre que les effets de la vitesse de coupe et des interactions entre les paramètres de coupe ( $V_c$ - $a_p$  et  $V_c$ - $f$ ) ne sont pas significatifs sur la rugosité  $R_z$  concernant la nuance CC670. La rugosité  $R_z$  est affectée seulement par l'avance pour la

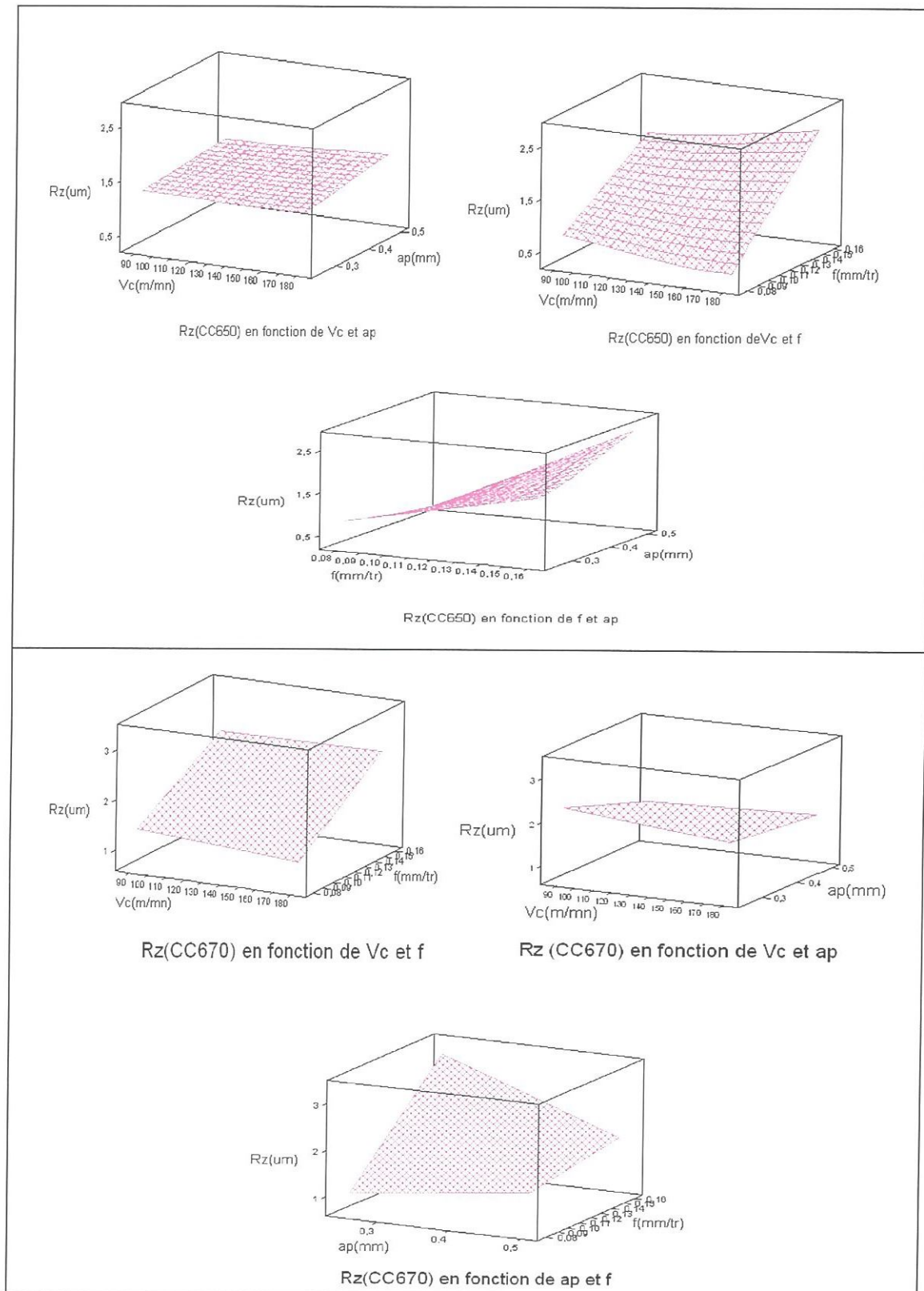
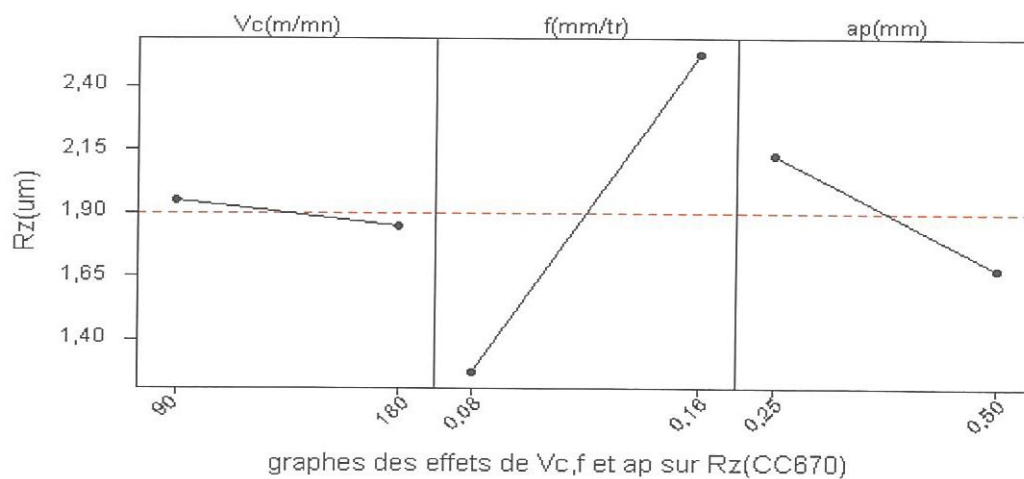
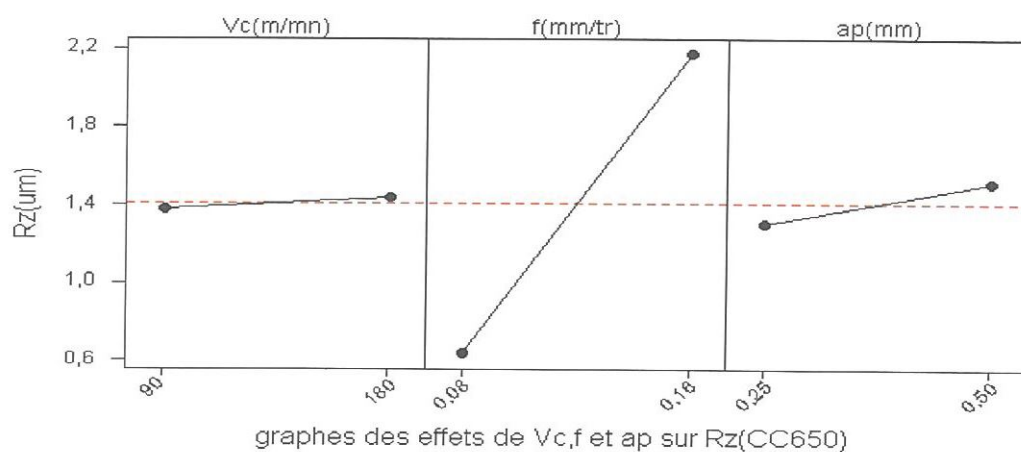


Figure IV-11.  $R_z$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$





**Figure IV-12.** Graphes des effets de Vc ,f et ap sur Rz

L'équation de régression est :

$$Rz_{(CC650)} = + 1,406 + 0.7687 f \quad R^2 = 80,44\%$$

$$Rz_{(CC670)} = -3,350 + 49,375 f + 9ap - 90 f * ap \quad R^2 = 96,44\%$$

#### IV.4.Modèle de l'usure en dépouille VB en fonction des paramètres de coupe.

N de essai	Facteurs			Paramètres						
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	t (min)	Fa (N)	Fr (N)	Ft (N)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)	VB (mm)
CC650										
1	90	0.08	5	36.17	71.63	88.9	0.27	1.5	1.1	0.078
2	180	0.08	5	42.87	98.5	92.33	0.16	1.0	0.55	0.093
3	90	0.16	5	63.19	158.93	154.9	0.40	2.15	1.5	0.091
4	180	0.16	5	64.24	175.68	146.4	0.55	2.8	2.05	0.096
5	90	0.08	10	105.48	167.84	178.67	0.165	1.1	0.5	0.091
6	180	0.08	10	58.87	82.57	141.82	0.125	0.9	0.4	0.115
7	90	0.16	10	277.69	363.19	338.01	0.62	2.8	2.4	0.105
8	180	0.16	10	202.99	279.21	270.44	0.73	3.4	2.75	0.123
CC670										
1	90	0.08	5	48.23	109.53	98.83	0.35	2.2	1.3	0.101
2	180	0.08	5	52.4	153.63	95.14	0.22	1.4	0.8	0.107
3	90	0.16	5	82.07	207.23	177.14	0.85	4.5	3.3	0.103
4	180	0.16	5	78.09	254.1	146.81	0.80	3.9	3.1	0.115
5	90	0.08	10	131.5	242.7	199.88	0.40	2.1	1.5	0.125
6	180	0.08	10	112.39	182.35	158.4	0.75	4.0	2.9	0.135
7	90	0.16	10	171.1	375.69	304.01	0.47	2.6	1.7	0.128
8	180	0.16	10	232.86	432.04	314.98	0.51	2.5	2.0	0.145

**Tableau IV-9.** Résultats de l'usure en dépouille VB en fonction des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe

##### IV.4.1 Analyse de régression de l'usure en dépouille en fonction de Vc ; f et t

L'équation de régression est :

$$VB_{(CC650)} = 0,0330 + 0,000172 Vc + 0,119 f + 0,00380 t \quad R^2 = 93,3\%$$

$$VB_{(CC670)} = 0,054250 + 0,00012 Vc + 0,071875 f + 0,00535 t \quad R^2 = 98,2\%$$

Dans le tableau IV-10, on peut voir que le facteur du temps d'usinage ( $P\text{-value}=0.006$ )<sub>CC650</sub>; ( $P\text{-value}=0.0001$ )<sub>CC670</sub>, et le facteur de la vitesse de coupe ( $P\text{-value}=0.012$ )<sub>CC650</sub>; ( $P\text{-value}=0.005$ )<sub>CC670</sub> ont une grande signification sur l'usure en dépouille VB. L'avance et les interactions Vc-f, f-t et Vc-t ( $P\text{-value} > 0,05$ ) ne présentent pas une signification statistique sur l'usure en dépouille VB.

Avec l'augmentation de la vitesse de coupe et pendant un temps d'usinage, Les outils de coupe s'usent rapidement à cause des frottements intenses et des températures élevées, ce qui a pour effet d'augmenter les efforts de coupe, l'usure VB augmente aussi [34].

Coefficients de régression estimés pour VB (mm) de la nuance CC650 model complet				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	0,099000	0,000500	198,000	0,003
Vc (m/mn)	0,007750	0,000500	15,500	0,041
f (mm/tr)	0,004750	0,000500	9,500	0,067
t (min)	0,009500	0,000500	19,000	0,033
Vc*f	-0,002000	0,000500	-4,000	0,156
Vc*t	0,002750	0,000500	5,500	0,114
f*t	0,000750	0,000500	1,500	0,374
S = 0,001414		R <sup>2</sup> = 99,9%	R <sup>2</sup> (ajus) = 99,1%	
Coefficients de régression estimés pour VB(mm) model réduit				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	0,099000	0,001759	56,285	0,000
Vc (m/mn)	0,007750	0,001759	4,406	0,012
f (mm/tr)	0,004750	0,001759	2,701	0,054
t (min)	0,009500	0,001759	5,401	0,006
S = 0,004975		R <sup>2</sup> = 93,3%	R <sup>2</sup> (ajus) = 88,3%	
Coefficients de régression estimés pour VB(mm) de la nuance CC670 model complet				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	0,08238	0,002058	40,031	0,016
Vc (m/min)	-0,00006	0,000012	-4,818	0,130
f (mm/tr)	-0,07812	0,013622	-5,735	0,110
t (min)	0,00355	0,000218	16,289	0,039
Vc *f	0,00090	0,000069	13,000	0,049
Vc *t	0,00001	0,000001	9,000	0,070
f*t	0,00375	0,001250	3,000	0,205
S = 0,0003536		R <sup>2</sup> = 100,0%	R <sup>2</sup> (ajus) = 100,0%	
Coefficients de régression estimés pour VB(mm) model réduit				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	0,054250	0,005333	10,173	0,001
Vc (m/min)	0,000125	0,000022	5,582	0,005
f (mm/tr)	0,071875	0,025195	2,853	0,046
t (min)	0,005350	0,000403	13,272	0,000
S = 0,002850		R <sup>2</sup> = 98,2%	R <sup>2</sup> (ajus) = 96,8%	

Tableau IV-10. Régression de la surface de réponse : VB(mm)

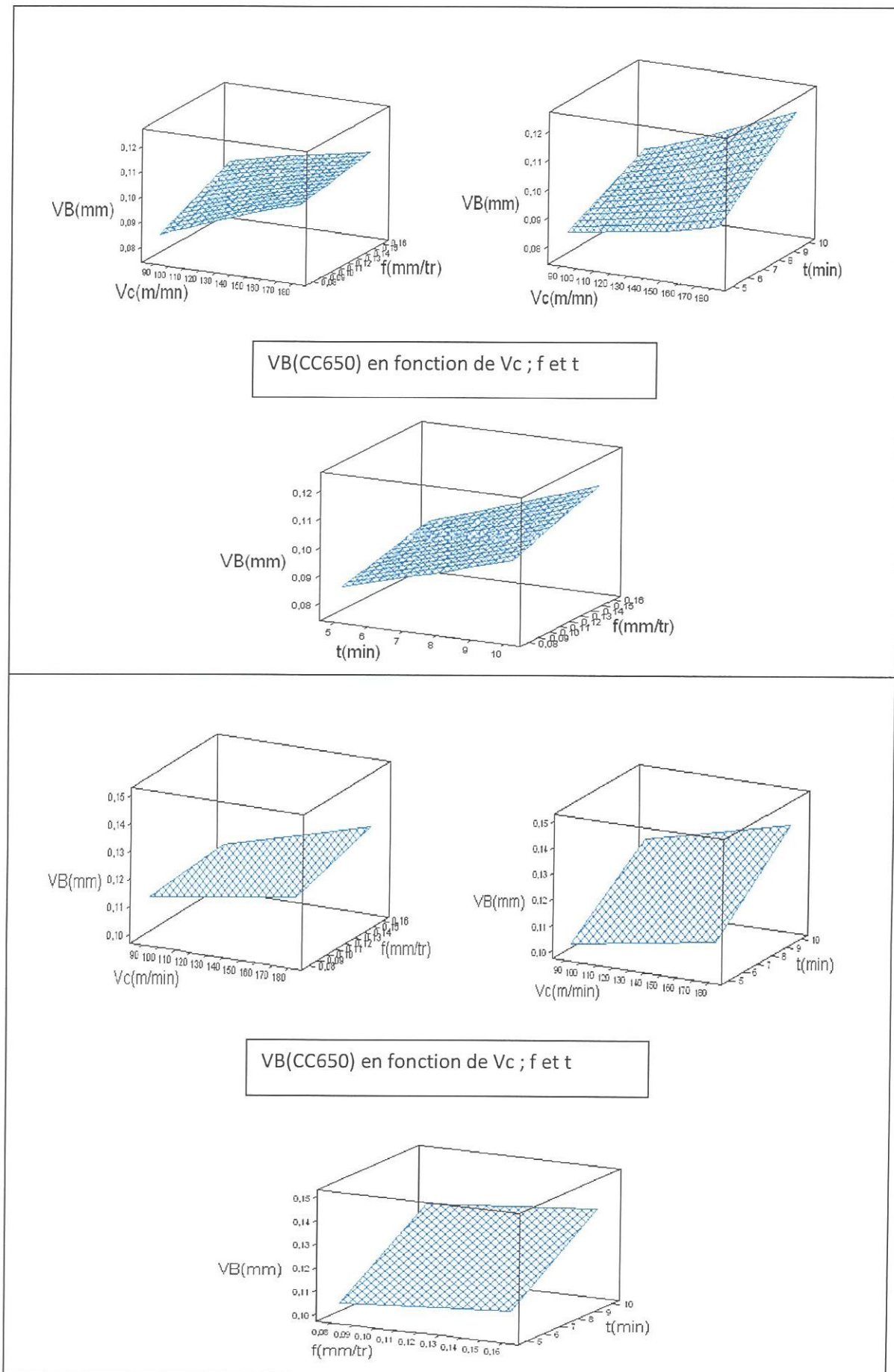


Figure IV-13. VB en fonction de Vc, f et t

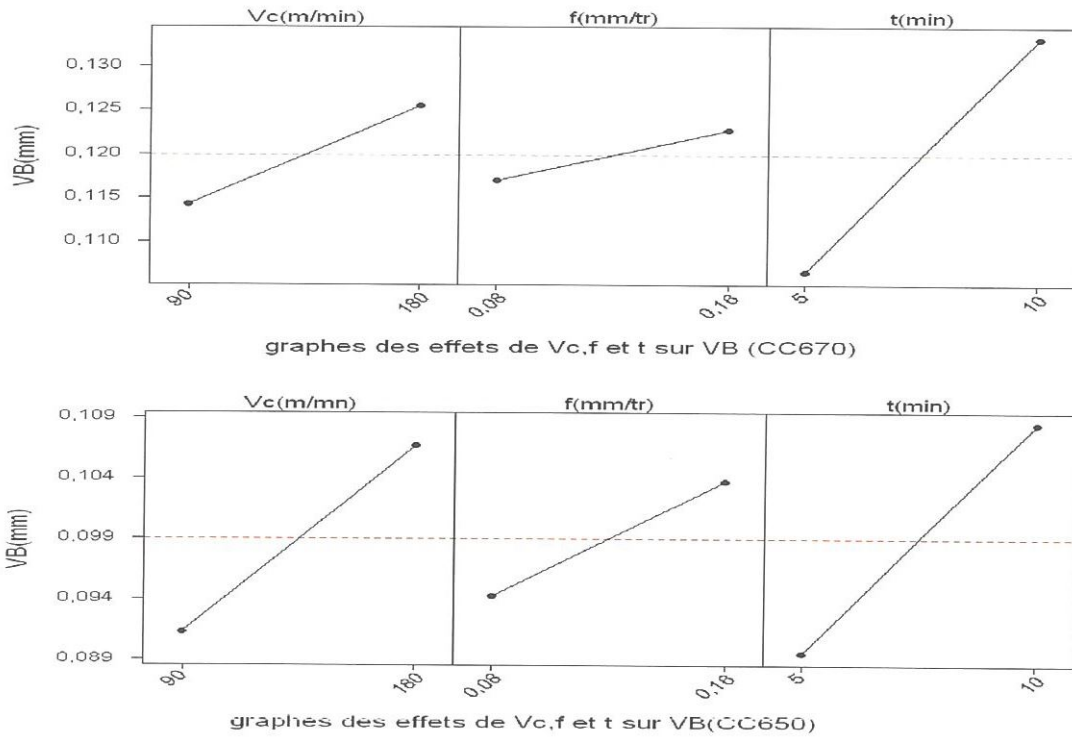


Figure IV-14. Graphes des effets de Vc, f et t sur VB

**IV.4.2 Analyse de régression : les efforts (Fa, Fr et Ft) en fonction de Vc ; f et t pour la nuance CC650.**

Coefficients de régression estimés pour Fa(N)					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	106,44		11,04	9,642	0,001
f (mm/tr)	45,59		11,04	4,13	0,014
t (min)	54,82		11,04	4,966	0,008
f*t	33,49		11,04	3,034	0,039
S = 31,22		R-carré = 92,72%		R-carré (ajus) = 87,26%	
Coefficients de régression estimés pour Fr(N)					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	174,69		1,275	136,989	0,000
Vc (m/mn)	-15,70		1,275	-12,314	0,007
f (mm/tr)	69,56		1,275	54,546	0,000
t (min)	48,51		1,275	38,039	0,001
Vc*t	-26,61		1,275	-20,866	0,002
f*t	28,44		1,275	22,301	0,002
S = 3,607		R-carré = 99,98%		R-carré (ajus) = 99,9%	
Coefficients de régression estimés pour Ft(N)					
Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P-value
Constante	176,43		12,77	13,812	0,000
f (mm/tr)	51,00		12,77	3,993	0,010
t (min)	55,80		12,77	4,368	0,007
S = 36,13		R-carré = 87,51%		R-carré (ajus) = 82,51%	

Tableau IV-11. Régression de la surface de réponse : Fa(N) ; Fr(N) et Ft(N)

Les équations de régression sont :

$$Fa(N) = 106.44 + 45.59f + 54.82t + 33.49f*t \quad R^2 = 92,72\%$$

$$Fr(N) = 174.69 - 15.70Vc + 69.56f + 48.51t - 26.61Vc*t + 28.44f*t \quad R^2 = 99,98\%$$

$$Ft(N) = 176.43 + 51.00f + 55.80t \quad R^2 = 87,51\%$$

Les équations de régression, montrent qu'avec l'augmentation de l'avance et du temps les efforts de coupe augmentent aussi.

On constate que tous les paramètres ( $Vc, f$  et  $t$ ) influent sur l'effort radial et qu'il y a des l'interaction entre les paramètres ( $Vc-t ; f-t$ ).

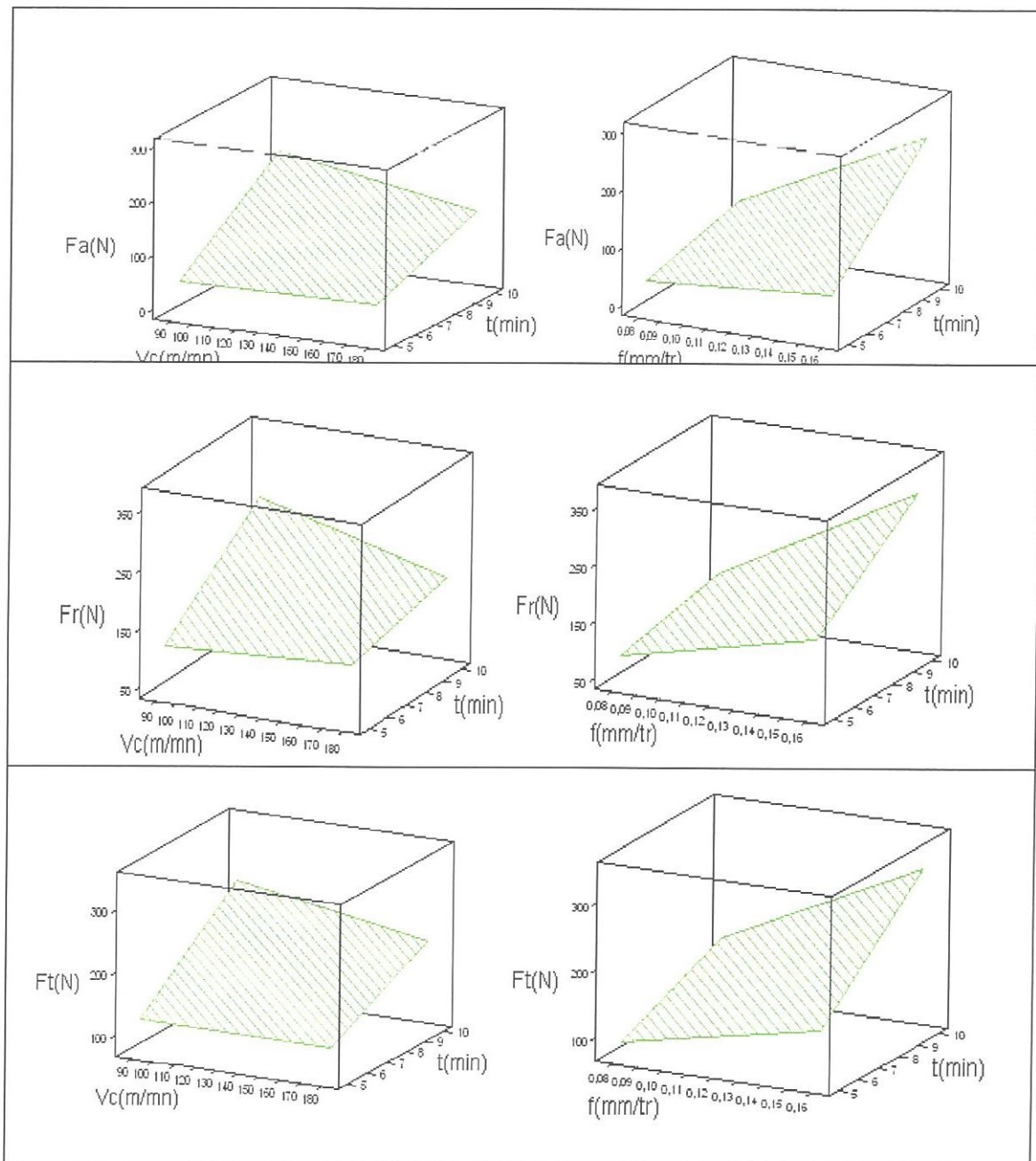
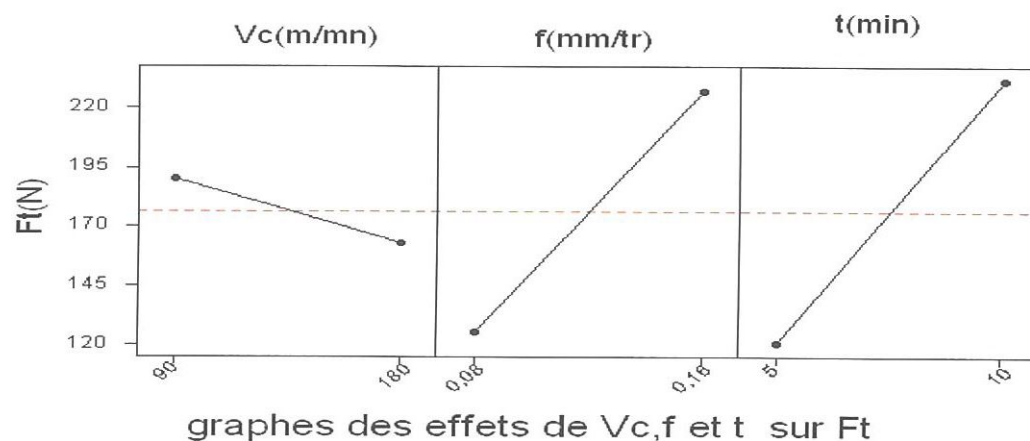
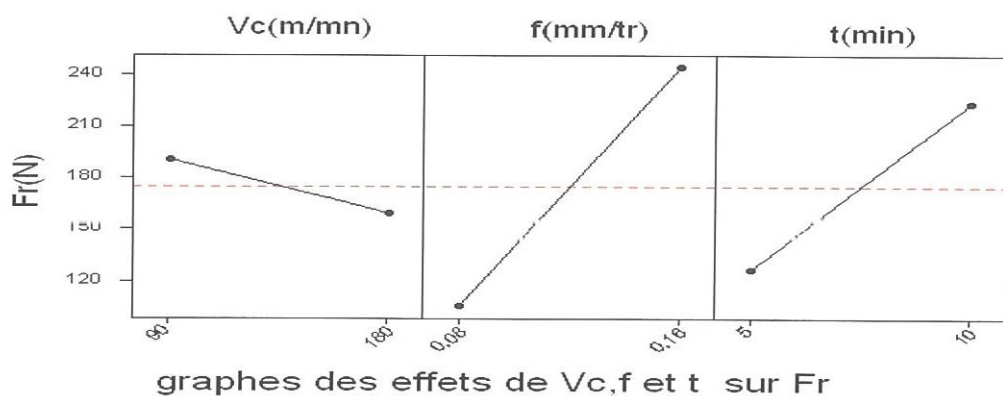
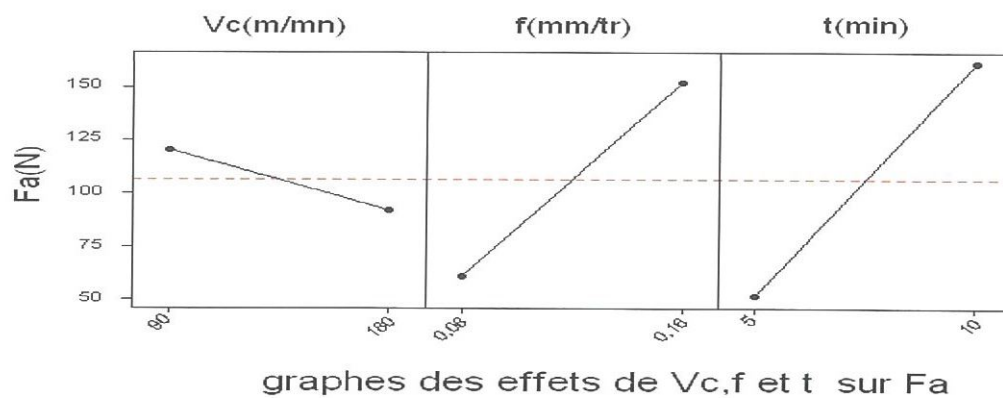


Figure IV-15. Les efforts ( $F_a, F_r$  et  $F_t$ ) en fonction de  $Vc, f$  et  $t$



**Figure IV-16.** Graphes des effets de Vc, f et t sur les efforts (Fa, Fr et Ft)

La figure IV-16 présente l'influence de (Vc, f et t) sur les efforts de coupe (Fa, Fr et Ft). Elle illustre qu'avec l'augmentation du temps de coupe, les efforts de coupe (Fa, Fr et Ft) augmentent avec des pentes considérables, sans oublier l'augmentation de l'avance qui est aussi dominante. On a constaté également que l'augmentation de la vitesse de coupe fait diminuer les efforts de coupe (Fa, Fr et Ft).

#### IV.4.3 Analyse de régression : les rugosités (Ra, Rt et Rz) en fonction de Vc ; f et t pour la nuance CC650.

Coefficients de régression estimés pour Ra (um)				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	0,37750	0,04297	8,785	0,001
f (mm/tr)	0,19750	0,04297	4,596	0,010
S = 0,1215	R-carré = 81,88 %		R-carré (ajus) = 78,86 %	
Coefficients de régression estimés pour Rt (um)				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	1,95625	0,1436	13,626	0,000
f (mm/tr)	0,83125	0,1436	5,790	0,001
S = 0,4060	R-carré = 84,82 %		R-carré (ajus) = 82,29 %	
Coefficients de régression estimés pour Rz (um)				
Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P-value
Constante	1,40625	0,1547	9,088	0,000
f (mm/tr)	0,76875	0,1547	4,968	0,003
S = 0,4376	R-carré = 80,44 %		R-carré (ajus) = 77,18 %	

**Tableau IV-12.** Régression de la surface de réponse : Ra, Rt et Rz

Les équations de régression sont :

$$Ra = 0.3775 + 0.1975f \quad R^2 = 81,88 \%$$

$$Rt = 1.9562 + 0.8312f \quad R^2 = 84,82 \%$$

$$Rz = 1.4062 + 0.7687f \quad R^2 = 80,44 \%$$

La Figure IV-12, montre que les rugosités (Ra, Rt et Rz) sont très affectées par l'avance. D'après cette analyse statistique on constate que le temps (t) et la vitesse de coupe (Vc) ont une influence insignifiante sur les critères de rugosité.



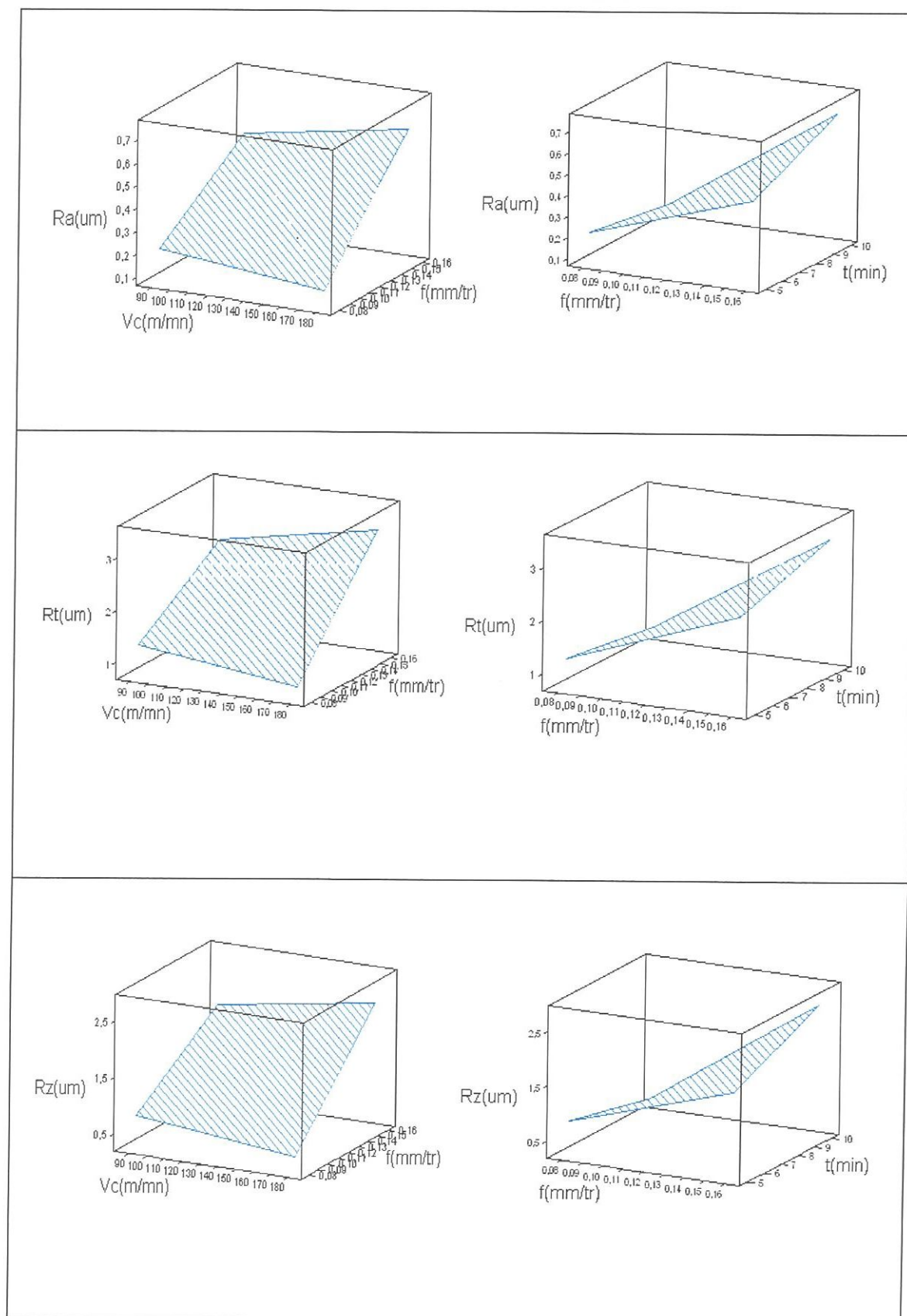
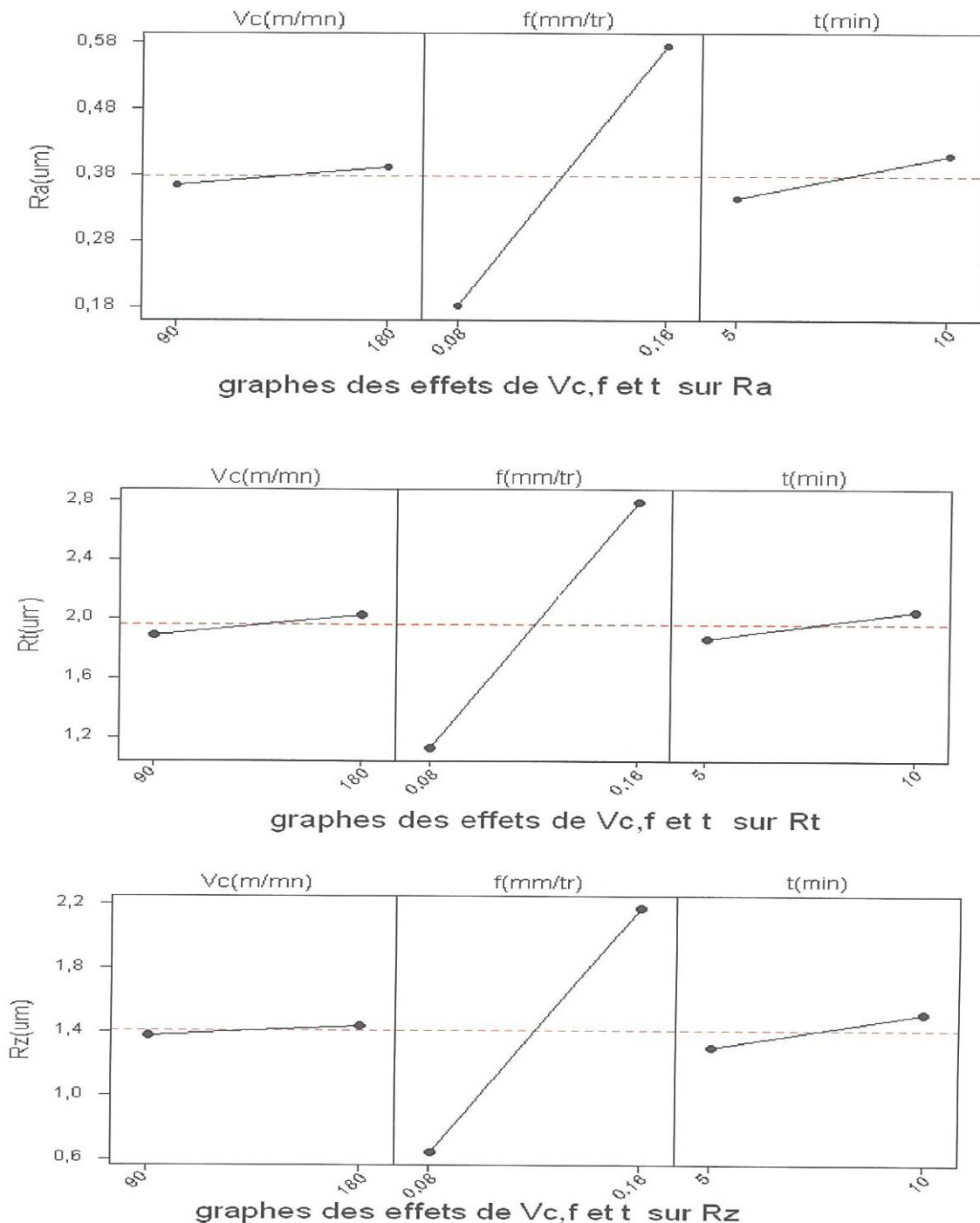


Figure IV-17. Les rugosités ( $Ra$ ,  $Rt$  et  $Rz$ ) en fonction de  $Vc$ ,  $f$  et  $t$



**Figure IV-18.** Graphes des effets de  $V_c$ ,  $f$  et  $t$  sur les efforts ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ )

La figure IV-18 qui présente l'influence de ( $V_c$ ,  $f$  et  $t$ ) sur les rugosités ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) elle illustre qu'avec l'augmentation du temps d'usinage, les rugosités ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) augmentent légèrement. Nous concluons aussi que l'avance est le paramètre le plus prépondérant suivi du temps de coupe et en dernier de la vitesse de coupe.

#### IV.5. Conclusions

Ce chapitre nous a permis de déterminer les modèles mathématiques qui nous permettent de mieux voir le degré d'influence des différents paramètres de régime de coupe sur les différents paramètres technologiques étudiés (rugosité de surface usinée, effort de coupe et usure de l'outil) lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4. Les valeurs des coefficients de détermination témoignent l'adéquation des modèles trouvés. Les principales conclusions tirées de ce chapitre sont :

- Les composantes axiale et radiale de l'effort de coupe sont très affectées par la profondeur de passe et l'avance.
- L'influence de la vitesse de coupe est relativement moindre sur les efforts de coupe.
- L'avance est le facteur prédominant sur les différents critères de la rugosité étudiés ( $R_a$ ,  $R_t$ ,  $R_z$ ). Elle est succédée par la profondeur de passe.
- Le temps d'usinage est le plus important paramètre intervenant dans le processus de la coupe. Il favorise l'augmentation de l'usure en dépouille de l'outil ce qui induit la dégradation de la surface usinée et l'accroissement des efforts de coupe.
- Les modèles mathématiques relatifs aux efforts de coupe, aux rugosités et à l'usure de l'outil ont défini le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les paramètres technologiques étudiés.
- Les surfaces de réponse permettent de trouver la valeur du paramètre technologique étudié pour n'importe quelle combinaison des facteurs présélectionnés.

### **Conclusion générale**

Les essais d'usinage pratiqués sur l'acier 42CrMo4 traité à 50 HRC et usiné par différents matériaux, nous ont permis d'étudier l'influence de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur les efforts et les pressions de coupe, la rugosité des surfaces usinées et l'usure des outils de coupe. Les principales conclusions tirées de cette étude sont :

- \* La composante axiale de l'effort de coupe est très sensible à la variation de la profondeur de passe. Qui affecte également d'une manière considérable les autres composantes de l'effort de coupe.
- \* L'avance est un facteur prédominant sur la rugosité. En effet, lorsque l'avance augmente de 0.08 à 0.24 mm/tr, les critères de rugosité (Ra, Rt et Rz), générés par les matériaux à outils (H13A; GC1525; GC3015; CC670 et CC650), augmentent respectivement de (81.81 ; 75 ; 325.92 ; 292.68 ; 324.13) %, (57.89 ; 120 ; 205.55 ; 28.57 ; 73.91) % et (69.23 ; 150 ; 263.63 ; 200) %.
- \* La composante de l'effort radiale, lors de l'usure de l'acier 42CrMo4 trempé est prépondérante.
- \* Les rugosités trouvées sont proches de celles obtenues en rectification, (les valeurs usuelles de Ra pour la rectification cylindrique varient de 0.2  $\mu\text{m}$  à 1.6 $\mu\text{m}$ ) [33]
- \* L'usure et le temps d'usinage influent considérablement sur les efforts de coupe et sur la rugosité de la surface usinée.
- \* L'usure est régulière pour les conditions de coupe testées.
- \* Les modèles mathématiques trouvés, permettent une prédiction des paramètres technologiques (effort, rugosité, usure...) en fonction des conditions de coupe. Ils servent également pour une éventuelle étude d'optimisation.
- \* L'analyse des modèles mathématiques montre que la profondeur de passe est le paramètre le plus influant sur les efforts suivi par l'avance et en fin la vitesse de coupe.
- \* Les modèles mathématiques de la rugosité montrent que l'avance et le facteur le plus influant sur les différents critères de la rugosité (Ra, Rt, Rz) suivi de la profondeur de passe.

- \* La meilleure performance enregistrée en terme d'usure de l'usinage de l'acier 42CrMo4 trempé est celle de la céramique mixte CC650 suivie par la céramique CC670 et le carbone revêtu GC3015.
- \* A des vitesses de coupe relativement élevées, les carbures non revêtus H13A et le cermet GC1525 se sont montrés inaptes lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 durci.

#### IV.7. *Perspectives*

Cette étude ouvre d'importantes visions qui nous soutiennent à :

- ★ étudier le comportement de nouvelle nuance de matériaux de coupe face à l'acier 42CrMo4.
- ★ Etudier l'usinabilité d'autres aciers avec les mêmes outils de coupe utilisés dans cette étude.
- ★ Utiliser d'autres méthodes statistiques (taguchi, réseau de neurone).
- ★ Utiliser d'autres logiciels de simulation pour étudier le comportement des matériaux (pièce /outil) pendant l'usinage (Abacus ou solidworks).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **P Collignon** Evolution des revêtements sur les différents matériaux de coupe évolution des dépôts en fonction des nouveaux besoins Colloque international du Cercle d'Etudes des Métaux, 13 et 14 Novembre 1996
- [2] **R.I. King** High-speed machining revs up . American machinist, jan 1981, pages 130-133
- [3] **R. Brooks** High-speed machining takes back seat report from IMTS 82 American metal / metaworking news, page 11, september 13 1982
- [4] **Norme Afnor NFX06-030** Guide pour la mise en place de la MSP (maîtrise statistique de la production)
- [5] **F. Leroy, T. Blanchard, S. Alexandre et Denardi** Usinage à très grande vitesse des aciers de construction mécanique Colloque international du Cercle d'Etudes des Métaux, 19 et 20 novembre 1992, pages 1-1 à 1-11
- [6] **JC. Hamman, C. Trombert; F. Le Maitre** High speed turning of stainless steel International colloquim on processing of stainless steels, Cercle d'étude des métaux, faculté Polytechnique de MONS – BELGIQUES – 20-30 avril 1997
- [7] **JC. Hamman, C. Trombert** Machinability improvement of austenitic stainless steels: effects on chip formation mechanisms and tool loading Colloque international du Cercle d'Etudes des Métaux, 18 et 19 novembre 1998, pages 12-1 à 12-7
- [8] **G. Bittes, D. Robot, N. Marquis, G. Vatry** Les aciers à inclusions métalliques usinabilité et aspect environnementaux Colloque international du Cercle d'Etudes des Métaux, 18 et 19 novembre 1998, pages 15-1 à 15-8
- [9] **J.M. Brion** Thèse de doctorat, France (1993)
- [10] **D. Guillot** Contribution à l'étude de l'influence inclusionnaire sur l'usinabilité des aciers bas carbone PhD Thésis, Ecole centrale de Nantes, 1995
- [11] **J.C Hamman, C. Trompert** Amélioration de l'usinabilité des aciers inoxydables, application à l'usinage grande vitesse. In Séminaire, Usinage grande vitesse et matériaux, October 2000
- [12] **F. Le Maitre, JC. Hamman** Le rôle du matériau mis en oeuvre en usinage grande vitesse Bulletin du cercle des métaux 25 octobre 2000

- [13] <http://www.trametal.com/outils-coupants/articles-9-plaquettes.html>
- [14] documentation Widia Valenite Fabrication d'outil
- [15] **M. Habak** Étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100Cr6, thèse de doctorat de Mécanique - Matériaux – Procédés. ENAM. N° d'ordre : 57 (2006).
- [16] **CETIM** les états de surface- Description- Élaboration- Mesure, Note technique N°18, 1979.
- [17] **Charles Augustin Mpako Éméné Ethy** étude de l'usure d'un outil de coupe lors du tournage ébauche avec variation de l'avance de l'acier chrome –molybdène 4140 ; mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise des science appliquées (génie mécanique) Québec canada septembre 1997
- [18] **S. Kalpakjian** Manufacturing Engineering and Technology. Third Edition, Addison-Wesley Publishing Company (1995).
- [19] **A. Bhattacharyya et A . Ghosh** Diffusion Wear in Cutting Tools. Annals of CIRP, 16, N° 4. 369-375. (1968 September).
- [20] **N. H Cook** Tool Wear and Tool Life. Journal of Engineering for industry, 931-938. (1973 November)
- [21] **M. I. Sadik et Bo. Lidstrom** The Role of Tool-Chip Contact Length in Metal cutting. Journal of Materials Processing Technology. 37. 613-627. (1993).
- [22] **M. I. Sadik et Bo. Lidstrom** The Effect of Restricted Contact Length on Tool Performance. Journal of Materials Processing Technology. 48, 275-282 (1995)
- [23] **E. Blanpain** Théorie et Pratique des outils de coupe. Éditions Eyrolles, Paris(1955).
- [24] **H. Takeyama et E. Usui** The Effect of Tool-Chip Contact Area in Metal Machining. Transactions of the ASME. 1089-1096. (1958 July).



- [25] **OS9** Usinage a grande vitesse Participants : J.M.Bergheau, M.Dursapt, H.Hamdi, C.Pagès, J.Rech, H.Zahouani Thèses soutenues : J.Rech (2002), C.Pagès (2003), M. Barge (2005)
- [26] <http://www.cadcz.com/inf-acier-trempe-revenu-fr.htm> Bureau d'études franco-tcheque
- [27] <http://www.sandvik.coroment.com>
- [28] <http://www.trametal.com/index.php>
- [29] **Lakhdar Boulanouar<sup>2</sup>, Mohamed Athmane Yallese<sup>1</sup> et Kamel Chaoui<sup>2</sup>**  
Effet du matériau à outil et des conditions d'usinage sur la qualité de surface de l'acier 100Cr6 trempé  
1. (LMS) Université de Guelma; 2. (LR3MI) Université de Annaba Algérie
- [30] **SANDVIK Coromant** Catalogue Général : Tournage – Fraisage – Perçage – Alésage - Attachements, 2007.
- [31] **Brahim Fnides, Hamdi Aouici et Mohamed Athmane Yallese**  
Etude de l'usinabilité de l'acier X36CrMov5 en tournage dur  
Laboratoire mécanique et structures (LMS), Université 08 Mai 1945 de Guelma
- [32] **Med Athmane Yallese<sup>a</sup>, Lakhdar Boulanouar<sup>b</sup>, Nacer Zeghib<sup>b</sup>, Salim Belhadi<sup>a</sup>, Jean-François Rigal<sup>c</sup>** Etude des efforts et de la température de coupe lors de tournage dur de l'acier AISI 52100 par un outil CBN. **a.** (LMS), Université de Guelma, **b.** (LR3MI), université de Annaba. **c.** (LaMCoS) INSA de Lyon, France.
- [33] **A.Chevalier J.Bohan** Guide du technicien en productique  
Éditions HACHETTE Technique
- [34] **M.A. Yallese<sup>1</sup>, L. Boulanouar<sup>2</sup>, S. Belhadi<sup>1</sup>; N. Ouelaa<sup>1</sup>**  
Influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100Cr6 (60HRC) avec le CBN 1 (LMS) Université de Guelma;.2 (LR3MI) Université de Annaba Algérie *Sciences & Technologie*

- [35] **Jacques Goupy** Docteur des sciences Ingénieur-conseil Recherche Conseil et Formation Modélisation par les plans d'expériences  
+ Help du logiciel minitab15
- [36] **Mohamed Athmane Yaltese<sup>1, a</sup>, Lakhdar Boulanouar<sup>2</sup> et Kamel Chaoui<sup>2</sup>**  
Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique  
1 (LMS), Université du 8 mai 1945, Algérie  
2 (LR3MI), Université de Annaba Algérie *Sciences & Technologie*