

**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**

---

**Etude du comportement du Nitrure de Bore Cubique  
lors du tournage dur des aciers pour travail à chaud**

---

**Option : Productique Mécanique**

Présenté par :

**H. AOUICI**

Devant le jury composé de MM :

N/D. OUELAA

L. BOULANOUAR

A/R. BEZAZI

M. A. YALLESE

S. BELHADI

Pr. à l'université de Guelma

Pr. à l'université de Annaba

M/C à l'université de Guelma

M/C à l'université de Guelma

C/C à l'université de Guelma

Président

Examineur

Examineur

Rapporteur

Membre invité

**2008**

## REMERCIEMENTS

Je saisis cette occasion pour remercier mon encadreur le docteur M.A. YALLESE pour ses conseils.

Je remercie aussi Monsieur le professeur N/D. OUELAA pour avoir présidé le jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur le professeur L. BOULANOUAR, à Monsieur A/R. BEZAZI et à Monsieur S. BELHADI pour leur participation au jury.

Que toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail trouvent ici ma reconnaissance la plus sincère et particulièrement MM : M<sup>ed</sup> AIB, A/Aziz MADI et B. FNIDES.

J'exprime ma profonde gratitude à ma mère, à ma sœur et à mon frère pour leur soutien.

## ملخص

إن التطور التكنولوجي أدى إلى إيجاد طرق و أساليب جديدة في عملية الإنتاج و الصناعة، و من بين هذه الطرق، تشغيل المواد الصلبة ذات قساوه عالية، حيث مكنت هذه الأخيرة من الحصول على قطع ذات نوعية متميزة من حيث الأبعاد و كذلك من حيث خشونة السطح. و لكن هذه الطريقة تتطلب مواد قطع ذات خصائص عالية ( تتحمل الاحتكاك، الحرارة و الإصتدام بين القلم و قطعة التشغيل،.....)، و من بين هذه المواد الخزف بأنواعه، نتريد البور المكعب (CBN).

و في هذا الإطار قمنا بخراطة حديد صلب مقسى (50HRC)، يتركب من C, Cr, Mo, V بنسب متفاوتة باستعمال قلم قطع (CBN)، و قد تمت عملية التشغيل بدون استعمال سائل التبريد، و تحتوي هذه الدراسة على :

النتائج المراد التحصل عليها تهدف إلى التعرف على مدى تطور قوى القطع و كذلك شدة الضغط، نوعية السطح و شدة الحرارة في منطقة القطع.  
مسايرة تطور تآكل مادة CBN7020.

و كل هذا بهدف الحصول على منطقة الملائمة لتشغيل مادة CBN7020 في أحسن الظروف.

## **RESUME**

Notre travail consiste à étudier le comportement du nitrure de bore cubique (CBN) en tournage dur à sec de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50HRC. Cet acier est destiné pour le travail à chaud, exempt de tungstène sur base CrMoV, insensible aux changements de température et ayant une résistance à l'usure élevée. Il est employé pour la fabrication des matrices, des coquilles, des moules et inserts de coulée sous pression fortement sollicités avec durée de vie élevée.

Les résultats obtenus nous ont permis d'évaluer les efforts et pressions de coupe, les critères de rugosités et la température dans la zone de coupe.

L'usure de CBN 7020 a aussi été étudiée.

Cette étude a été menée pour déterminer les plages de conditions de coupe pour optimiser le processus de coupe relatif à cet acier.

## **ABSTRACT**

The aim of our work is to study the behavior of the cubic boron nitride (CBN), in dry hard turning of steel X38CrMoV5-1 hardened to 50HRC. This steel is intended for hot work, free from tungsten on CrMoV basis, insensitive to temperature changes and having a high wear resistance. It is employed for the manufacture of matrices, shells, inserts with high tool life, plastic moulds subject to high stress and forging dies.

The results obtained enabled us to evaluate cutting forces, cutting pressures, roughness criteria and temperature in cutting zone.

The wear of CBN 7020 was also studied.

This study was undertaken to determine the ranges of cutting conditions to optimize the cutting process relating to this steel.

## TABLE DES MATIERES

<b>Introduction</b> .....	8
<b>I. Etude bibliographique sur la coupe des métaux</b> .....	9
I.1. Définition du tournage dur .....	10
I.2. Le marché du PCBN .....	11
I.2.1. Le marché potentiel / PCBN en 1994 d'après General Electric .....	11
I.2.2. Le marché potentiel du tournage dur pour le PCBN d'après General Electric .....	13
I.3. Recherche en tournage dur .....	14
I.4. Matériaux usinés et usinants .....	24
I.4.1. Matériaux usinés .....	24
I.4.2. Matériaux usinants .....	26
I.4.3. Plaquettes CBN utilisées .....	29
I.4.4. Les substrats .....	31
I.5. Les efforts de coupe .....	32
I.5.1. Définition .....	32
I.5.2. Intérêt de mesure des efforts de coupe .....	33
I.6. Puissance de coupe .....	33
I.7. Rugosité .....	34
I.7.1. Définition et importance de la rugosité superficielle .....	34
I.7.2. Principaux critères d'états de surface .....	34
I.8. Usure .....	35
I.8.1. Mécanisme et forme d'usure .....	35
a) Processus d'abrasion .....	36
b) Processus d'adhésion .....	36
c) Processus de déformation plastique .....	36
d) Processus de diffusion .....	37
e) Processus d'oxydation .....	37
f) Usure en dépouille ou frontale .....	37
g) Usure en cratère .....	38
h) Usure en entaille ou par oxydation .....	38
i) Rupture de la plaquette .....	39
j) Arête rapportées .....	39
k) Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne .....	40
I.8.2. Usure visible sur l'outil .....	40
I.8.3. Modèle de lois d'usure .....	41
a) Modèle de TAYLOR généralisé .....	41
I.8.4. Autre modèles .....	41
b) Modèle de kronenberg .....	41
b) Modèle de Kôning-Depierux .....	41
I.9. Formation du copeau .....	42
I.9.1. Échelle microscopique .....	44
a) copeau continu .....	45
b) copeau discontinu .....	45

c) copeau avec arête rapporté .....	46
I.10. Température .....	46
I.11. Conclusion .....	47
<b>II. Procédure expérimentales .....</b>	<b>49</b>
II.1. Introduction .....	50
II.2. Matériels utilisés .....	50
II.2.1. Machine- Outil .....	50
II.2.2. Matériau utilisé pour les essais d'usinage .....	50
II.2.3. Four à chambre pour traitement thermique des éprouvettes .....	51
II.2.4. Plaquette de coupe .....	53
II.2.5. Porte outil .....	53
II.2.6. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe .....	54
II.2.7. Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille VB .....	56
II.2.8. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité .....	56
II.2.9. Mesure de la température (pyromètre à infrarouge) .....	57
II.2.10 Autre équipements .....	58
II.3. Planification des expériences .....	58
a) Méthode unifactorielle .....	58
b) Méthode multifactorielle .....	59
II.4. Conditions expérimentels.....	60
II.5. Conclusion .....	61
<b>III. Résultats des essais d'usinage .....</b>	<b>62</b>
III.1. Introduction .....	63
III.2. Evolution des efforts de coupe et des pressions spécifiques .....	63
III.2.1. Variation de la vitesse .....	64
III.2.1.1. Effort de coupe .....	64
III.2.1.2. Pression de coupe .....	66
III.2.2. Variation de l'avance .....	67
III.2.2.1. Effort de coupe .....	67
III.2.2.2. Pression de coupe .....	68
III.2.3. Variation de la profondeur de passe .....	69
III.2.3.1. Effort de coupe .....	69
III.2.3.2. Pression de coupe .....	71
III.3. Evolution de la rugosité de surface de l'acier X38CrMoV5-1.....	72
III.3.1. Variation de la vitesse de coupe .....	72
III.3.2. Variation de l'avance .....	73
III.3.3. Variation de la profondeur de passe .....	74
III.4. Evolution de la température dans la zone de coupe .....	75
III.4.1. Variation de la vitesse de coupe .....	75
III.4.2. Variation de l'avance .....	75
III.4.3. Variation de la profondeur de passe .....	76
III.5. Conclusions.....	77

<b>IV. Résultats de l'évolution de l'usure du Nitrure de Bore Cubique</b> .....	78
IV.1. Introduction .....	79
IV.2. Usure des outils en nitrure de bore cubique (CBN).....	79
IV.3. Evolution des durées de vie .....	84
a) Effet de la vitesse coupe.....	85
b) Effet de l'avance.....	86
IV.4. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de VB .....	86
IV.4.1. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage .....	86
IV.4.2. Evolution des efforts de coupe en fonction de VB .....	89
IV.5. Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage et l'usure VB .....	92
IV.5.1. Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage .....	92
IV.4.2. Evolution de la rugosité en fonction de VB .....	94
IV.6. Conclusions .....	96
<b>V. Traitement et analyse des résultats</b> .....	97
V.1. Introduction .....	98
V.2. Modèles de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe .....	98
V.3. Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe .....	103
V.4. Modèles de l'usure en dépouille en fonction des paramètres de coupe.....	107
V.2. Modèles de la durée de vie en fonction des paramètres de coupe .....	109
V.6. Conclusions .....	110
<b>Conclusion générale</b> .....	111
<b>Nomenclature</b> .....	112
<b>Références bibliographiques</b> .....	113

## INTRODUCTION

La commercialisation des outils en Nitrure de Bore Cubique (CBN) depuis 1970, a produit un grand intérêt pour la technologie d'usinage dur, la production industrielle actuelle et la recherche scientifique. Pendant le tournage dur à sec, la pièce peut être tournée à sa dimension finale dans l'état durci. Le cycle conventionnel du processus se compose du tournage initial, suivi du durcissement par traitement thermique et finalement par rectification. Le tournage dur peut donc économiser le temps, améliorer la qualité de surface et réduire des opérations. D'ailleurs, l'usinage peut être effectué à sec sans liquide de refroidissement et donc le processus fournit un avantage supplémentaire du point de vue écologique. Des pièces en acier durci sont largement utilisées dans l'industrie automobile, les engrenages, les roulements et les outils pour matriçage.

L'usinage des aciers durcis a connu un développement considérable avec l'apparition de nouveaux matériaux de coupe tels que les Nitrures de Bore Cubique (CBN). Ces derniers se distinguent par une dureté élevée et une grande résistance à chaud. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet où sont exposés les résultats expérimentaux de l'usinage de l'acier X38CrMoV5-1 ; traité à 50HRC, usiné en tournage dur à sec par un outil en CBN.

Le chapitre I présente les fondements scientifiques liés à l'usinage et fait référence à différents résultats issus de la littérature. La majorité des études présentées concerne le tournage dur et plus particulièrement la configuration de la coupe tridimensionnelle (le chariotage).

Le chapitre II définit les procédures expérimentales ainsi que les équipements utilisés.

Le chapitre III traite les résultats des différents essais d'usinage relatifs à l'évolution des efforts et pressions de coupe, de la rugosité et de la température en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ).

Le chapitre IV est consacré aux résultats obtenus lors des essais d'usure.

Le chapitre V présente les modèles mathématiques liés aux résultats (modèle de la tenue, modèle de l'usure, modèle de l'effort de coupe et modèle de la rugosité).

Nous avons clos ce mémoire par une conclusion générale suivie d'une nomenclature et de références bibliographiques.

# Introduction

## **Étude bibliographique sur la coupe des métaux**

- I.1. Définition du tournage dur
- I.2. Le marché du PCBN
- I.3. Recherche en tournage dur
- I.4. Matériaux usinés et usinants
- I.5. Les efforts de coupe
- I.6. Puissance de coupe
- I.7. Rugosité
- I.8. Usure
- I.9. Formation du copeau
- I.10. Température
- I.11. Conclusion

Procédures expérimentales

Résultats des essais d'usinage

Traitement et analyse des résultats

## I.1. Définition du tournage dur

Le procédé d'enlèvement de matière par une opération de tournage sur des aciers traités d'une dureté supérieure à 45HRC est défini comme étant le tournage dur (figure I-1). Ce procédé s'impose comme un concurrent sérieux de la rectification. Il vient compléter, et parfois remplacer, la rectification conventionnelle qui est considérée comme opération très coûteuse. En effet, le tournage dur offre la possibilité de remplacer plusieurs opérations de rectification consécutives par une seule opération de tournage dur. Il permet d'enlever des taux de matière quatre fois supérieures à ceux de la rectification tout en consommant trois fois moins d'énergie.

Grâce aux avantages de mise en service et de flexibilité de cette technologie, les industriels s'intéressent de plus en plus à elle. Le tournage dur permet de réaliser des gains de productivité significatifs par la suppression de plusieurs opérations. Avec l'usage conventionnel, les pièces sont usinées, ensuite traitées thermiquement pour enfin être rectifiées (pour respecter les dimensions et les tolérances géométriques exigées par le cahier des charges) ce qui nécessite de nombreuses manipulations dues aux montages et aux démontages des pièces. Ces dernières deviennent inutiles en usinage dur puisque après traitement de durcissement et avec l'utilisation d'outils CBN (outils capables d'usiner les aciers durs), les phases peuvent être réalisées sur le même tour (sans démonter à chaque fois la pièce) et en supprimant ainsi l'opération de rectification. De plus, le tournage dur permet de réaliser des pièces avec des cotes précises et des états de surface proches de ceux obtenus en rectification [1].

*Exemple :* La figure I-1 représente l'alésage d'un cylindre. Ces matériaux durs sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- Un pouvoir abrasif élevé ;
- Une faible ductilité ;
- Une grande dureté à la pénétration.



**Figure I-1.** Alésage d'un cylindre

Ce procédé existe depuis que les matériaux coupants ont été capables de résister à de telles contraintes de dureté. Cependant, l'industrie ne s'est intéressée réellement à cette technique qu'en 1990, pour trois raisons principales :

- Un manque de fiabilité des premiers outils coupants extra-durs ;
- Les faibles gains de productivité qu'elle pouvait offrir ;
- Un manque de moyens de production adaptés.

Les **conditions de coupe générales** actuelles pour les opérations de finition avec outil CBN (d'après SANDVIK) sont les suivantes :

- Des vitesses de coupe comprises entre 80 et 250m/min ;
- Des profondeurs de passe comprises entre 0,05 et 0,5mm ;
- Des avances comprises entre 0,04 et 0,35mm/tr.

Les **outils CBN** sont majoritairement utilisés pour cette technique, mais il ne faut pas négliger les **outils en céramique et cermets**

Cette technique d'usinage est quelquefois classée en **usinage dans le domaine de la grande vitesse**. Bien que les vitesses de coupe puissent paraître modestes, il ne faut pas oublier de mettre en parallèle les hautes valeurs de dureté des matériaux usinés.

Il n'existe sans doute pas une seule définition, mais plusieurs définitions, pour expliciter ce procédé. Nous allons tenter dans l'encadré **1** de réunir tous les éléments qui permettent de définir le « **tournage dur** » en précisant la signification du mot « **dur** ».

A l'origine, ce terme « **dur** » ne concernait que la grande dureté du matériau usiné. Avec l'arrivée de nouveaux matériaux de construction, des géométries de pièces plus complexes, ce vocable s'est généralisé à d'autres dimensions.

#### Encadré 1 – signification du terme « dur »

**dur** au sens de la dureté du matériau usiné, du point de vue résistance à la pénétration d'un indenteur. De même, il faudrait discuter sur la correspondance entre dureté et résistance mécanique qui est loin d'être régulière.

**dur** au sens de difficulté à usiner le matériau, conséquence de sa très mauvaise usinabilité, un matériau peut être difficile à usiner sans pour autant être dur ! Peut être cité par exemple le tournage du cuivre électrolytique qui pose de véritables problèmes de fragmentation du copeau liés à sa très grande ductilité.

**dur** au sens de la difficulté de l'opération d'usinage (alésage profond, travail aux chocs...).

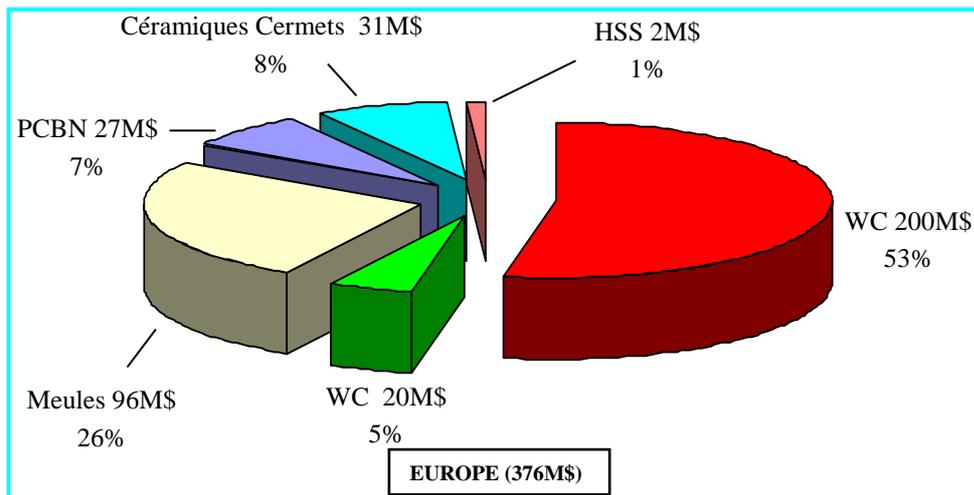
## I.2. Le marché du PCBN

### I.2.1. Le marché potentiel / PCBN en 1994 d'après General Electric

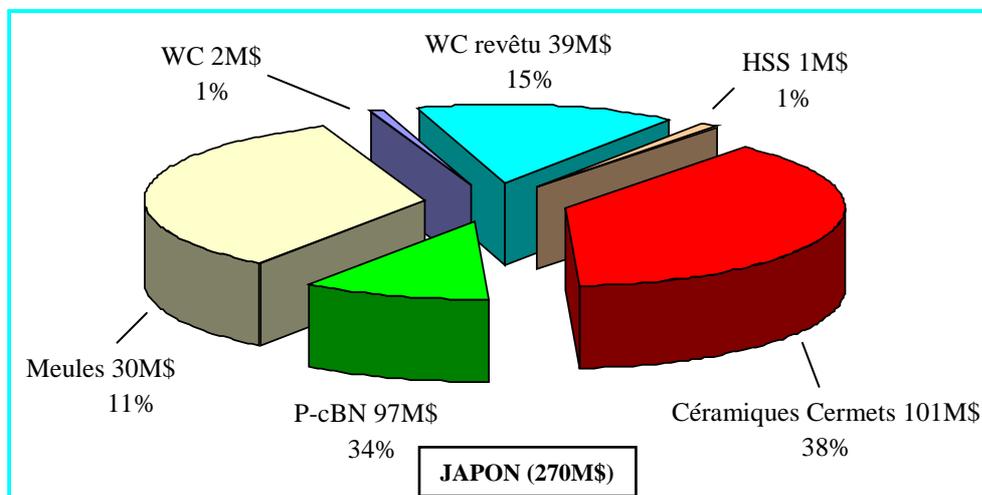
Le marché potentiel du PCBN représente les parts de marché que pourrait prendre ce matériau usinant par rapport aux autres cités sur les (figures I-2 et I-3). Les 376M\$ correspondent à toutes les applications confondues (tournage dur, tournage grande vitesse,

surfaçage de culasse,...). L'usinage des aciers trempés et des fontes représente environ 85% des potentiels des outils PCBN.

Il existe encore un nombre important d'applications de rectification conventionnelle qui pourraient être réalisées à un coût nettement inférieur avec des outils PCBN. On peut d'ailleurs noter que l'Europe, comparée au Japon, utilise encore peu le PCBN, et beaucoup le procédé de rectification.



**Figure I-2.** *Marché potentiel européen du PCBN en 1994*

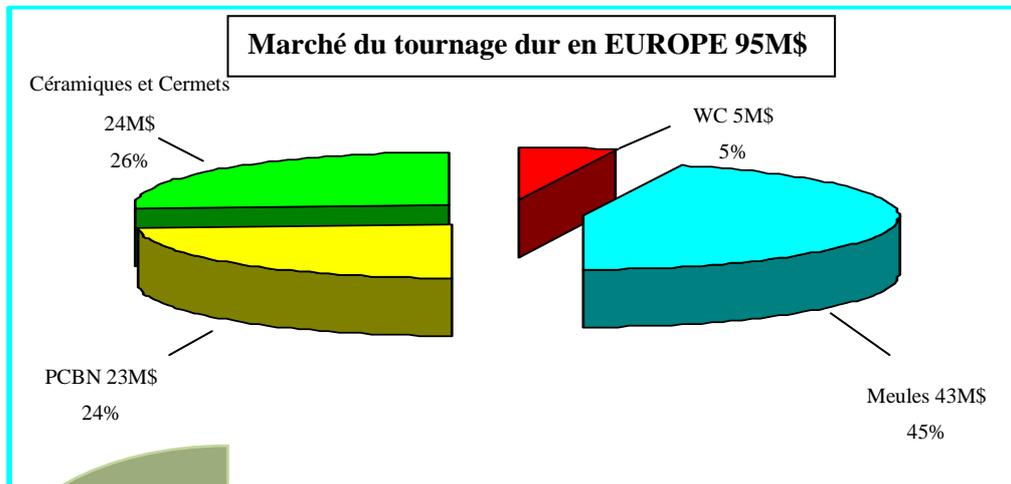


**Figure I-3.** *Marché potentiel japonais du PCBN en 1994*

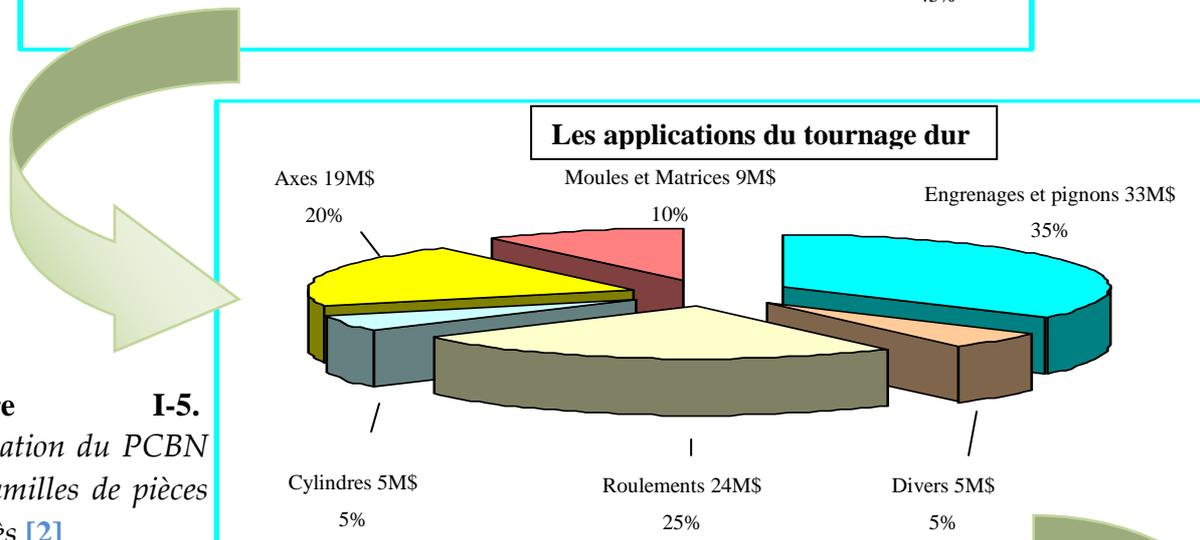
L'Europe se place comme le parent pauvre, même si elle a tendance à réagir actuellement, pour combler son retard. D'une étude du marché mondial, il ressort que 47% de la demande provient du Japon, 33% des USA, et que l'Europe vient loin derrière, avec 20% seulement.

## I.2.2. Le marché potentiel du tournage dur pour le PCBN d'après General Electric

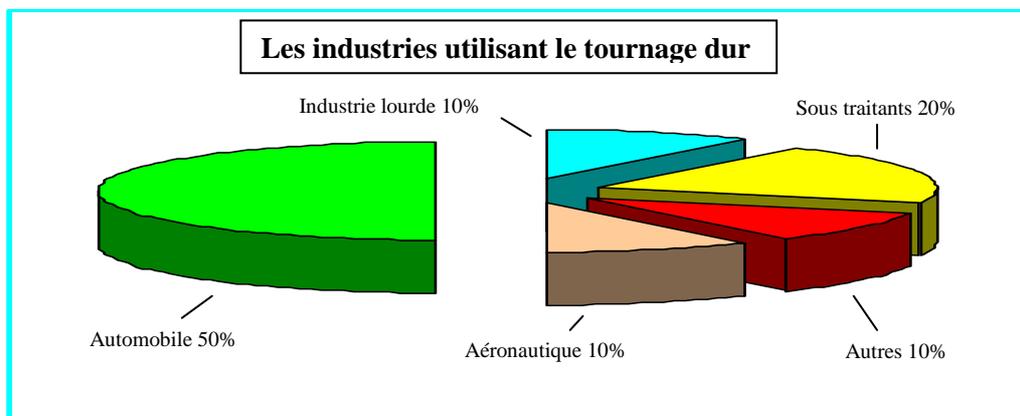
Parmi les 376M\$ cité à la (figure I-2), le tournage dur représenterait 95M\$. On peut à nouveau remarquer que le PCBN a les possibilités de se développer par rapport aux autres matériaux usinants utilisés dans le procédé du tournage dur (figures I-4, I-5 et I-6).



**Figure I-4.** Matériaux à outil utilisés pour les opérations de tournage dur en Europe en 1994 d'après [2]



**Figure I-5.** Utilisation du PCBN par familles de pièces d'après [2]



**Figure I-6.** Marché du PCBN par type d'industries d'après [3]

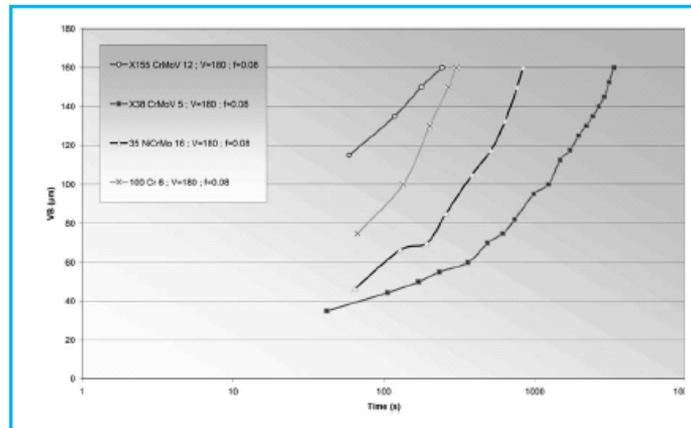
Par types d'opérations, le tournage extérieur représente 61% des cas, l'alésage 31% et le fraisage 8%. En ce qui concerne le Japon, plus de 50% de la demande provient de l'industrie automobile [4].

### I.3. Recherche en tournage dur

L'usure d'outil de coupe est une question clé dans tous les processus de coupe des matériaux, principalement en raison de son effet néfaste sur l'intégrité extérieure de la surface usinée.

En raison des développements récents des matériaux modernes d'outil de coupe tels que les outils en nitrure de bore cubique (CBN), la productivité d'usinage des aciers durcis a augmenté sensiblement. La flexibilité et la capacité élevées de fabriquer des éprouvettes à géométrie complexe sont les avantages principaux du tournage dur comparé à la rectification.

Pour voir l'évolution de l'usure en dépouille de l'outil en fonction de la microstructure du matériau usiné dans le cas de tournage dur (à sec) on utilisant des outils en nitrure de bore cubique, G. Poulachon et al. [5] ont étudié l'évolution de l'usure en dépouille lors du tournage de différents matériaux : acier pour travail à froid X155CrMoV12 [AISI D2], acier pour travail à chaud X38CrMoV5 [AISI H11], acier pour résilience 35NiCrMo15 et acier à roulement 100Cr6 [AISI 52100]. En plus de confirmer et vérifier certaines théories, cette étude a permis de donner de nouvelle information sur les caractéristiques de l'usure de l'outil en fonction de la microstructure du matériau usiné. Les matériaux avec une microstructure grossière (les matériaux à grande pourcentage de carbone AISI D2 et 100Cr6) l'usure est très rapide. Par contre, les matériaux avec une microstructure fine (AISI H11 et 35NiCrMo15), les taux de l'usure sont moins rapides (figure I-7).

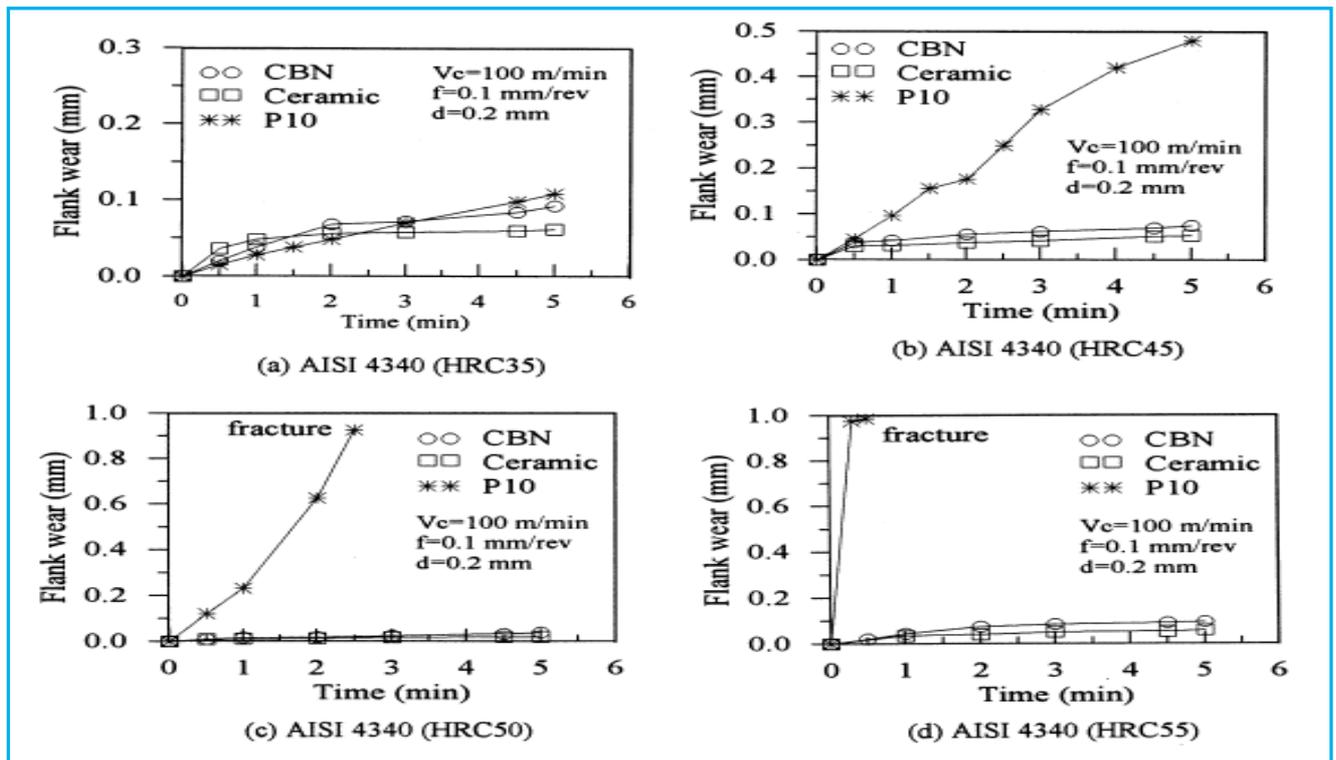


**Figure I-7.** Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps, de la vitesse de coupe et du matériau usiné [5]

S.Y. Luo et al. [6] ont étudié le comportement à l'usure lors du tournage de l'acier allié durci 35NCD6 [AISI 4340] avec une dureté de (35-55HRC), ils ont utilisé des outils en CBN (liants TiC et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et des outils en céramique (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et TiC). Ils ont trouvé que le principal mécanisme d'usure pour les outils CBN a été montré comme une abrasion du liant du matériau par les dures particules en carbure de la pièce, alors que pour les outils en

céramique, l'usure est dominée par l'adhésion et l'abrasion (figures I-8). Basé sur ces résultats expérimentaux, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

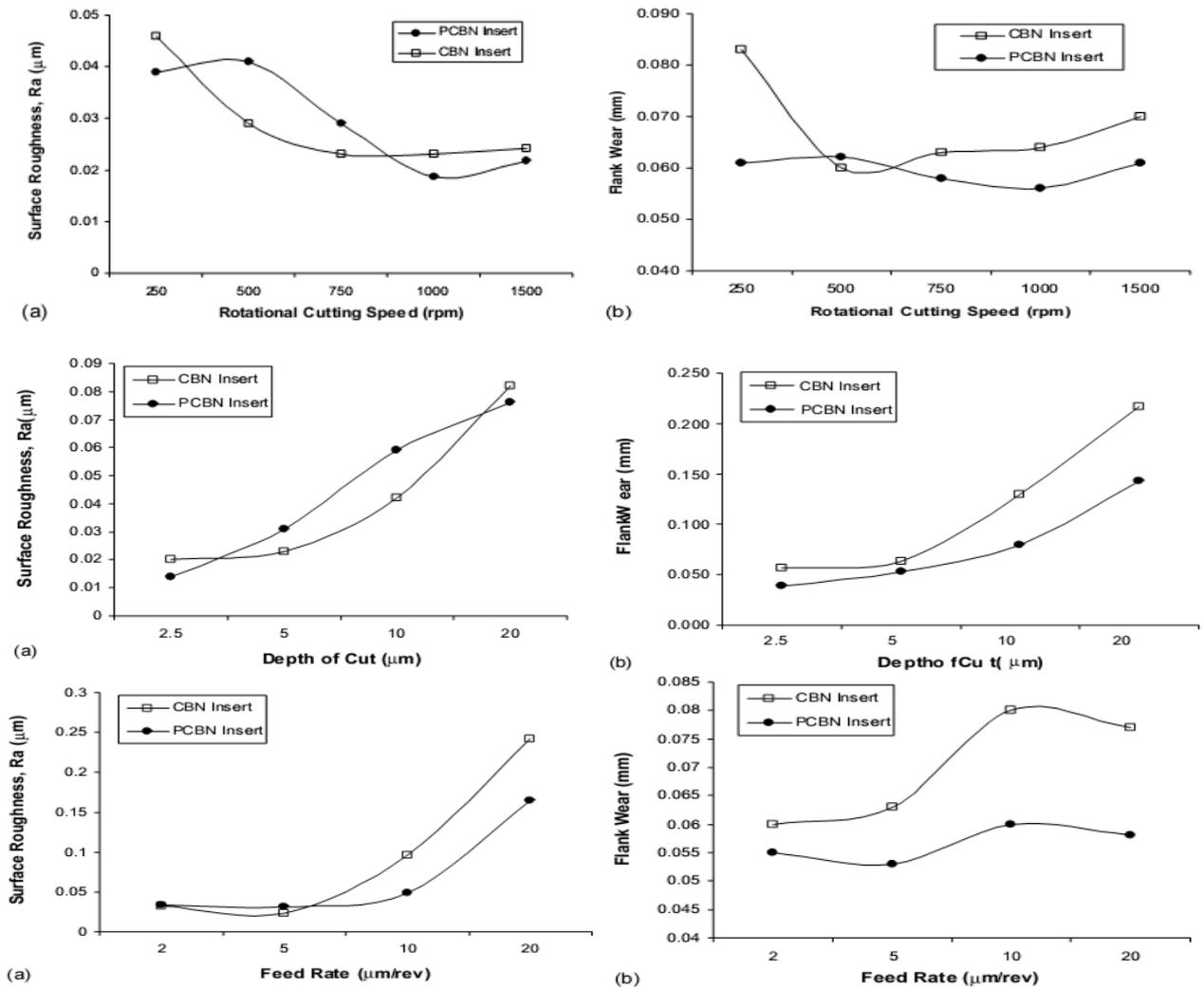
- L'usure des outils en céramique et en CBN a diminué avec une augmentation de la dureté, mais aux environs de 50HRC l'usure commence à augmenter. Ce comportement est conforme à la variation de la force de coupe, qui alternativement a été inversement liée à la température de coupe.



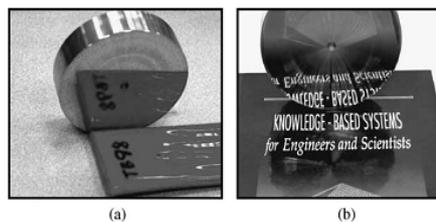
**Figure I-8.** Evolution de l'usure en dépouille en fonction des paramètres de coupe, de la dureté de la pièce et des matériaux de coupe [6]

Les travaux de recherche effectués par K.S. Neo et al. [7] ont mis en évidence la performance des outils en CBN et PCBN, en termes d'usure et rugosité lors de l'usinage ultraprécis de l'acier X38Cr13, dans différentes conditions d'usinage, étaient étudiés et comparés. Sur la base des résultats expérimentaux, les conclusions qualitatives suivantes peut être tirées (figures I-9 et 10) :

- Afin de réaliser une bonne qualité de surface sur Stavax (X38Cr13), la vitesse de coupe élevée est exigée pour les outils en CBN et en PCBN, ce dernier peut réaliser un meilleur état de surface. Il a été constaté qu'à la gamme élevée de la vitesse de coupe, l'outil en PCBN peut mieux résister à l'usure, suggérant qu'il a de meilleures propriétés mécaniques et thermiques ;



**Figure I-9.** Evolution de la rugosité ( $R_a$ ) et l'usure en dépouille en fonction des paramètres de coupe [7]



**Figure I-10.** Photos des états de surfaces finies par les outils en (a) PCBN et (b) CBN [7]

- La rugosité de surface et l'usure augmentent rapidement avec l'augmentation de la profondeur de passe. Il a été constaté que la profondeur de passe ne devrait pas excéder  $7,5\mu\text{m}$  afin de réaliser une rugosité de surface  $R_a$  de  $0,05\mu\text{m}$  pour les outils en PCBN et en CBN. Il a été constaté que l'outil en PCBN peut mieux résister à l'usure à de diverses profondeurs de passe ;

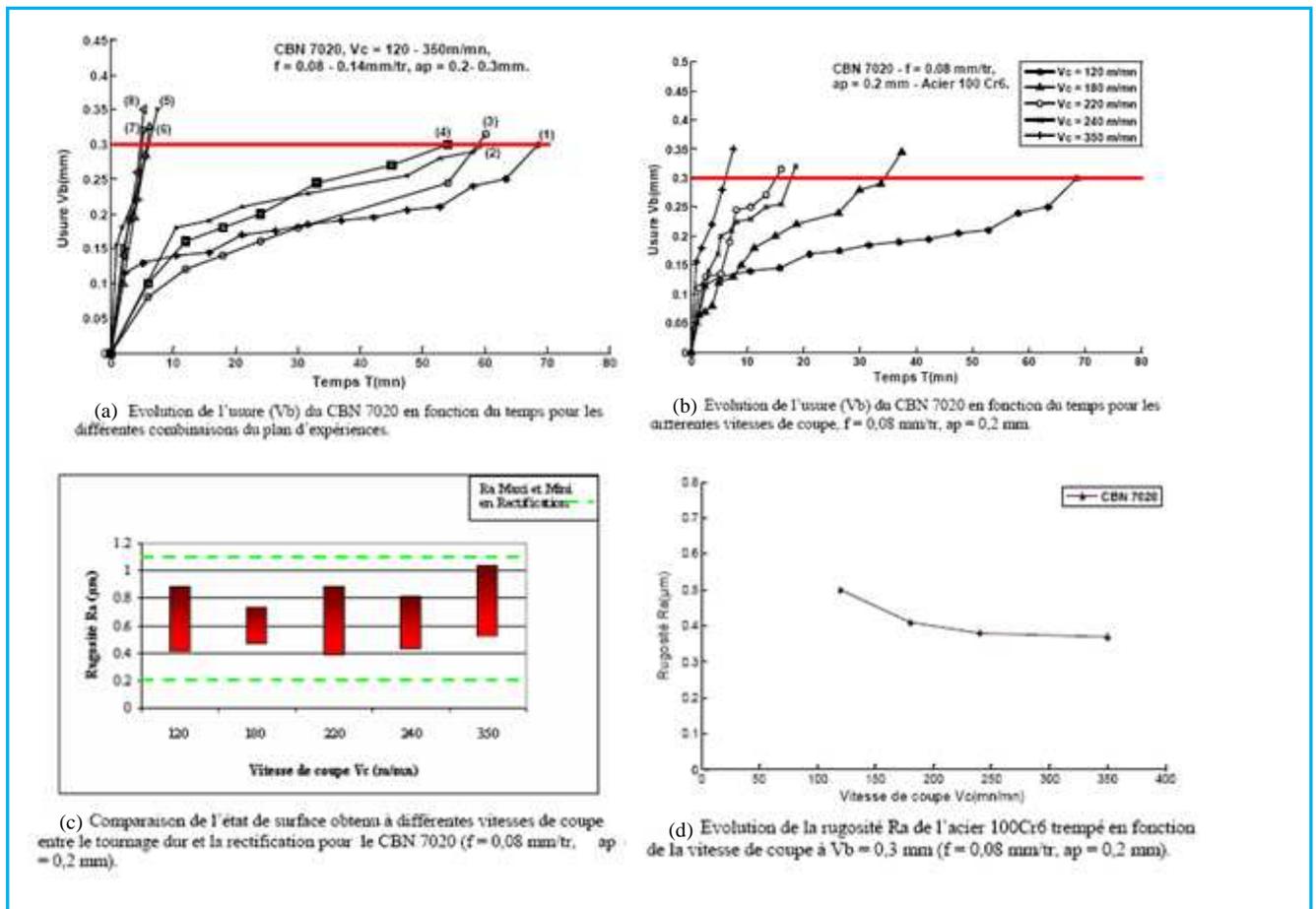
- La rugosité de surface augmente rapidement quand l'avance excède  $7,5\mu\text{m}/\text{tr}$  pour les outils de coupe PCBN et en CBN. Pour maintenir la rugosité de surface  $R_a$  inférieure à  $0,05\mu\text{m}$ , l'avance devrait être gradée au-dessous de  $0,05\mu\text{m}/\text{tr}$ , et dans cette gamme il n'y a aucune différence significative entre les deux outils de coupe. En termes d'usure, il a été trouvé encore que la propagation de l'usure est plus importante pour les outils en CBN.

Basé sur les résultats expérimentaux, le PCBN s'est avéré plus performant en termes de résistance à l'usure comparé à l'outil conventionnel en CBN. Il peut également réaliser un état de surface près du miroir dont  $R_a$  est inférieure à  $30\text{nm}$ , et par conséquent il semble être un outil prometteur pour la coupe directe des matériaux de matrice et de moule.

Les travaux de recherche effectués par S. Benchiheub et L. Boulanouar [8] ont pour but d'évaluer les performances du matériau à outils de coupe CBN 7020 lors de l'usinage de l'acier de roulement 100Cr6 trempé. La méthode retenue pour la réalisation de ces essais est celle des plans d'expériences dans le but de déterminer l'influence des éléments du régime de coupe sur sa tenue et sur l'état de surface produit. Les résultats expérimentaux obtenus à la vitesse de coupe  $V_c = 120\text{m}/\text{min}$  montrent que l'outil CBN 7020 a conduit à un meilleur rendement en termes de durée de vie et de productivité et que les modes d'usures observés sont ceux de l'abrasion et de la diffusion. Par ailleurs le CBN 7020 a donné lieu à des états de surfaces ( $R_a = 0,38$  à  $1,04\mu\text{m}$ ) comparables à ceux de la rectification ( $R_a = 0,2$  à  $1,1\mu\text{m}$ ). Le traitement statistique des résultats a permis d'établir des modèles mathématiques permettant de prédire la durée de vie de ce matériau ainsi que la rugosité attendue, nécessaires pour l'optimisation et l'exploitation industrielles. L'étude menée sur la tenue du matériau de coupe (CBN 7020) et sur l'état de surface produit lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 a permis de tirer les principales conclusions suivantes (figures I-11) :

- L'acier 100Cr6 trempé (60HRC) est très difficile à usiner, d'où la nécessité d'un matériau à outil de coupe ayant des capacités de coupe très élevées ;
- Les modes d'usure observés sont ceux d'abrasion : une usure régulière au début sur la surface en dépouille et de diffusion : un cratère sur la surface d'attaque ;
- L'analyse des courbes de suivi de l'usure en fonction du temps montre que l'allure de cette dernière obéit à la loi universelle de l'usure de n'importe quelle pièce mécanique. A la vitesse de coupe  $120\text{m}/\text{min}$ , le CBN 7020 a conduit à un meilleur rendement en terme de durée de vie ;

- L'influence de l'avance et celle de la profondeur de passe sur la tenue sont peu significatives par rapport à la vitesse de coupe.
- Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la rugosité de la surface usinée diminue tout d'abord rapidement puis lentement tout en se stabilisant aux grandes vitesses.

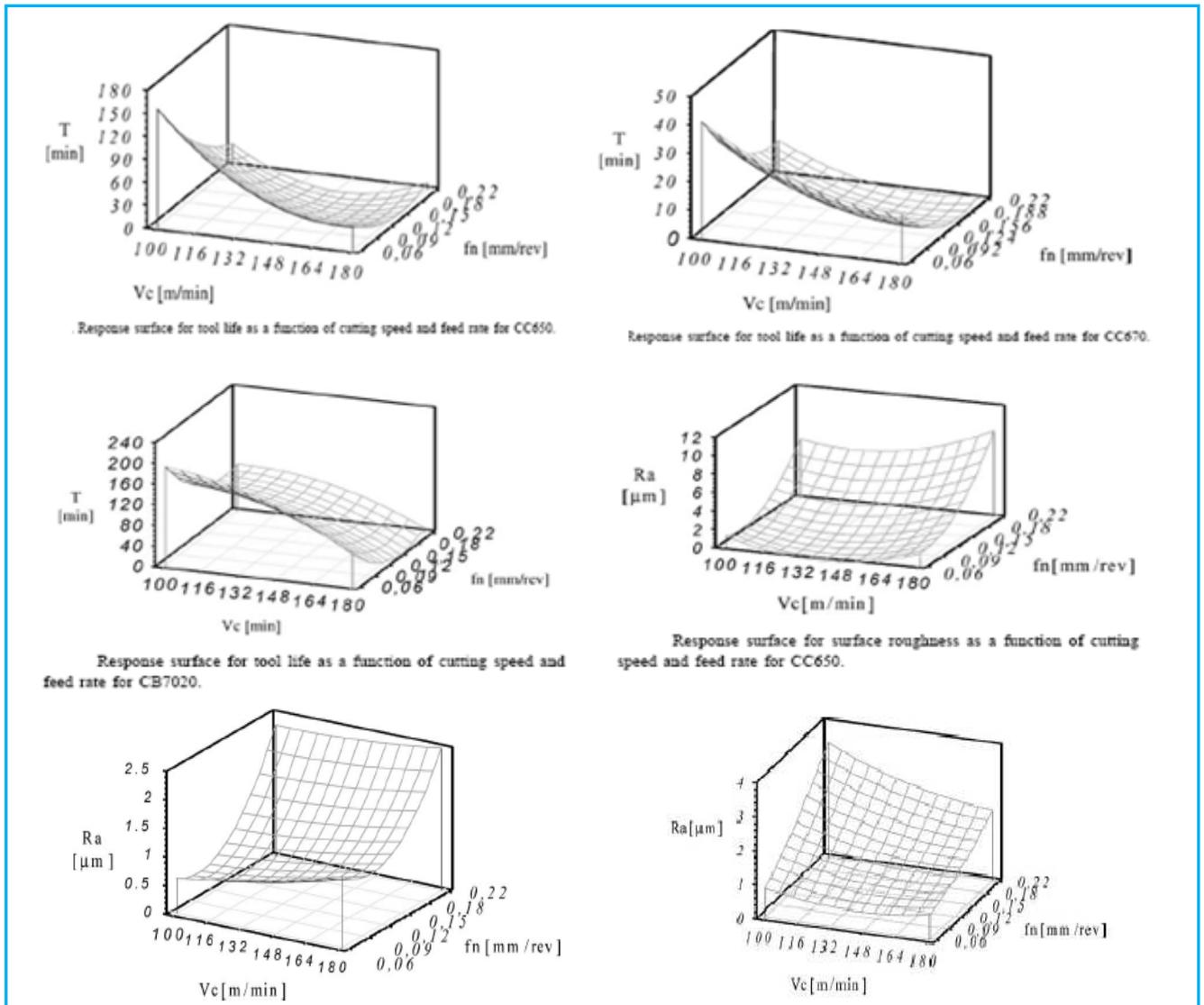


**Figure I-11.** (a) et (b) Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps, (c) et (d) évolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe [8]

- L'avance est le facteur prépondérant sur la qualité de la surface usinée, tandis que la profondeur de passe a exprimé une influence peu significative. Par conséquent si on veut augmenter la productivité, il est préférable d'augmenter la profondeur de passe au lieu de l'avance tout en gardant les mêmes valeurs de la rugosité.
- Le CBN 7020 permet d'obtenir des états de surfaces ( $R_a = 0,38$  à  $1,04\mu\text{m}$ ) compris dans les limites de la rugosité obtenue par la rectification ( $R_a = 0,2$  à  $1,1\mu\text{m}$ ).

G. C. Benga et al. [9] ont étudié l'usinabilité de l'acier à roulement 100Cr6 (62 à 64 HRC) pendant le tournage dur continu et à sec, avec des matériaux de coupe différentes, céramique mixte, céramique renforcée dénommée Whiskers et nitrure de bore cubique. Le

plan de travail basé sur la méthode multifactorielle, la gamme de coupe examinée était comme suit : vitesse de coupe de (70 à 210) m/min et l'avance de (0,08 à 0,28) mm/tr.



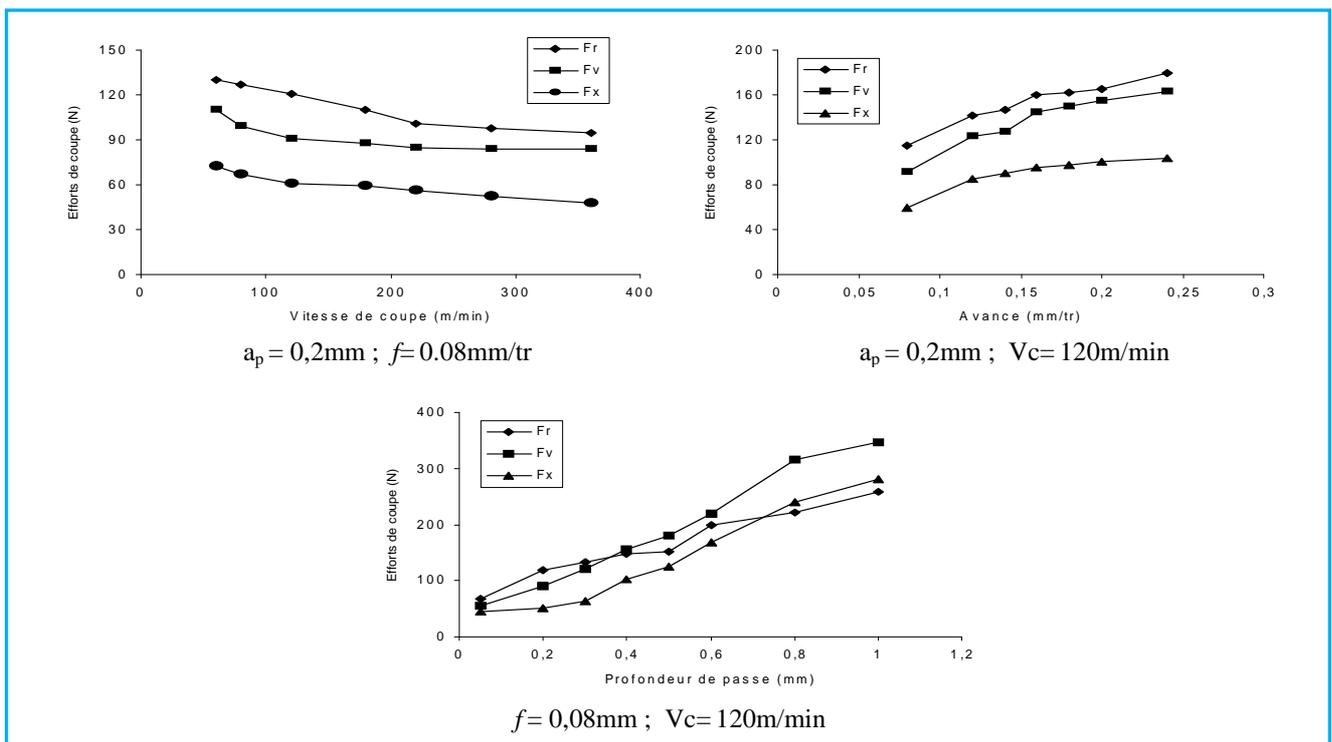
**Figure I-12.** Evolution de la rugosité et la durée de vie en fonction des paramètres de coupe et du matériau de coupe [9]

La durée de vie et l'état de la surface ont été évalués. En ce qui concerne la durée de vie. Basé sur ces résultats expérimentaux, les conclusions suivantes peuvent être tirées (figures I-12) :

- Les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'outil de PCBN, suivi par la céramique mixte et en dernier par la céramique renforcée dénommée Whiskers.
- Les graphiques de surface pour la rugosité montrent que l'avance est le facteur le plus influent. Mais la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur la durée de vie (pour tous les matériaux d'outil de coupe utilisés) ;

- Les outils de coupe de PCBN fournissent une plus longue durée de vie que la céramique, lors de tournage de l'acier à roulement 100Cr6, pour une gamme de vitesse de coupe entre 100 et 180m/min et l'avance entre 0,06 et 0,22mm/tr.

M.A. Yallese et al. [10] ont étudié l'influence des conditions de coupe sur les efforts de coupe lors du tournage du 100Cr6 (60HRC) avec le CBN 7020. Cette étude, basée sur des essais unifactoriel et multifactoriel (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) a permis la mise en évidence de l'influence des conditions de coupe sur les composantes des efforts de coupe. Le traitement des résultats obtenus a permis la détermination des différents modèles qui expriment la relation entre les paramètres d'usinage étudiés et les composantes de l'effort de coupe (figures I-13). L'étude des efforts de coupe réalisée dans cet article 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 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.

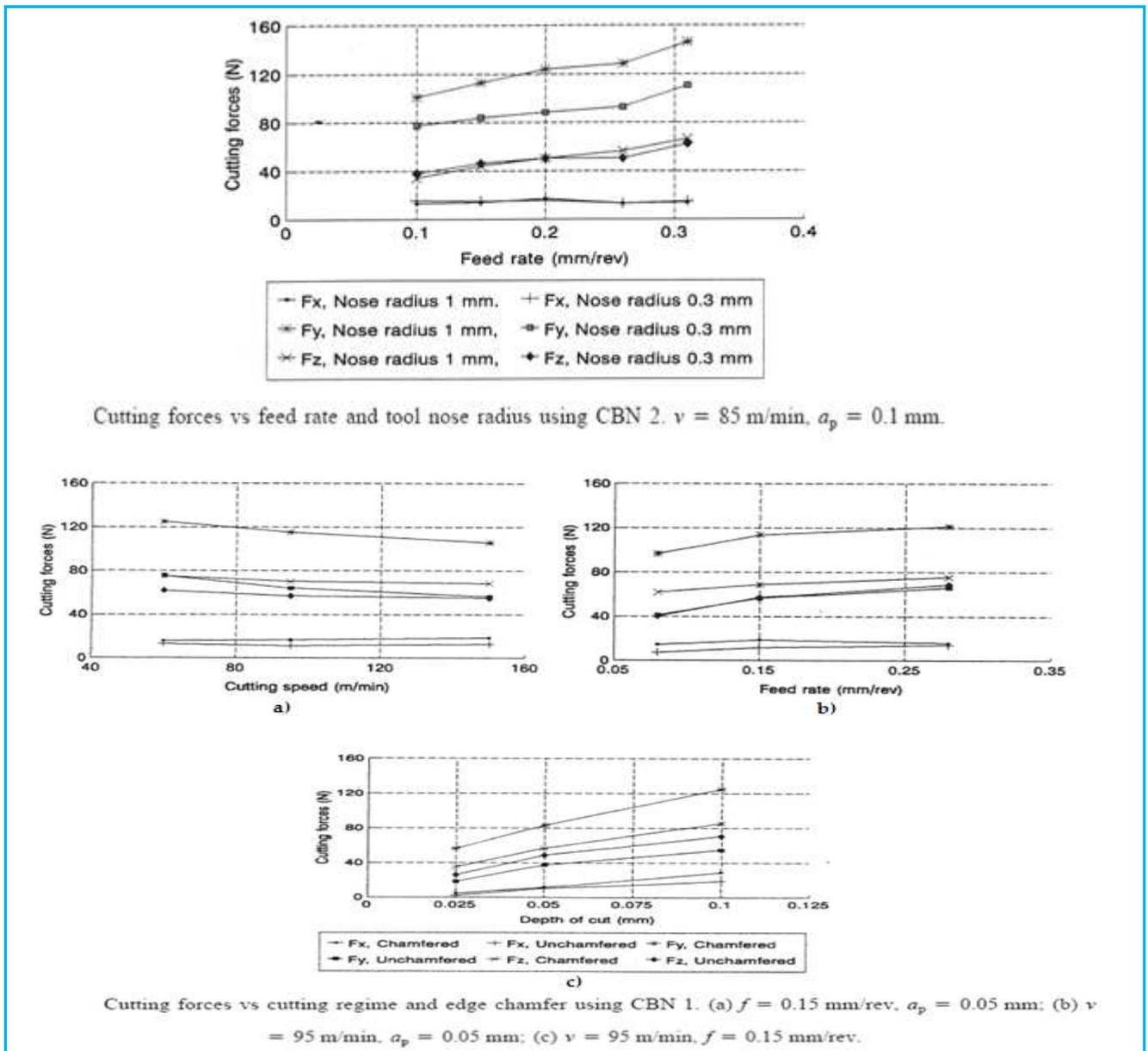


**Figure I-13.** Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe [10]

W. Chen [11] a étudié l'influence de changement de la géométrie d'arête tranchante (angle d'attaque, en dépouille et d'inclinaison), la taille et pourcentage CBN sur les composantes d'effort de coupe et l'état de surface. L'état de la surface produit par des outils CBN était compatible avec les résultats de la rectification et a été affecté par la vitesse de

coupe, par l'usure d'outil et par le comportement plastique du matériau de la pièce. Sur la base des résultats expérimentaux, les conclusions qualitatives suivantes peuvent être tirées (figures I-14) :

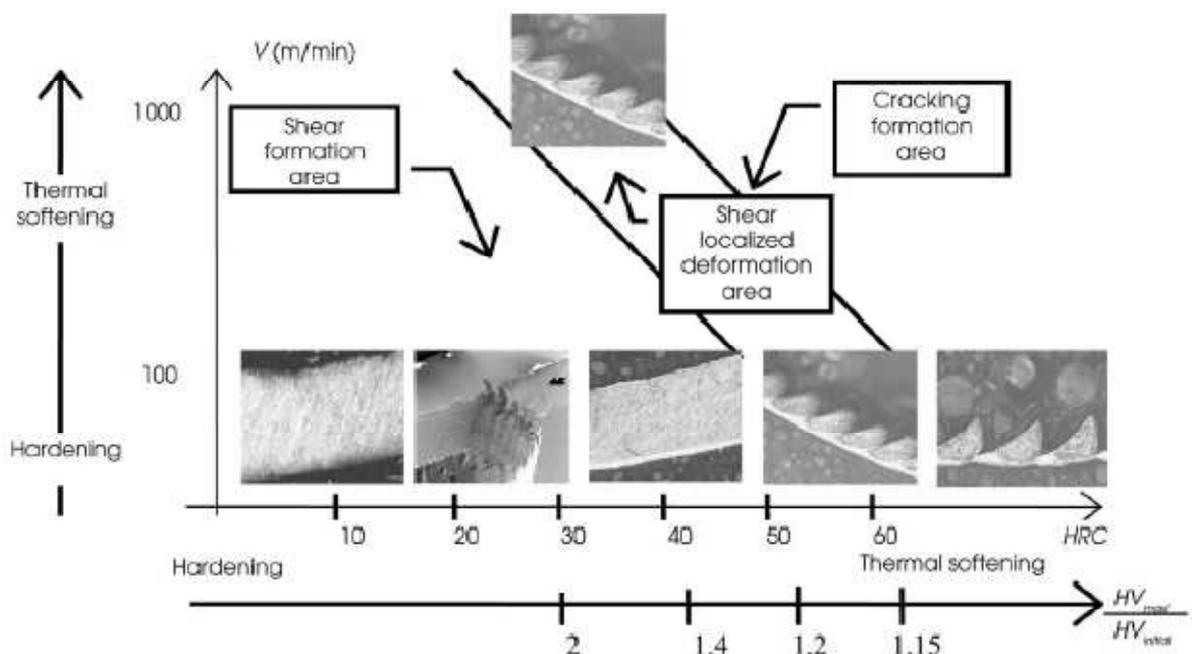
- L'usinage de finition des aciers durcis, l'effort radial ( $F_y$ ) est le plus grand par rapport aux autres composantes de l'effort de coupe et il est le plus sensible aux changements du chanfrein, du rayon de bec de l'outil et de l'usure en dépouille d'arête tranchante;



**Figure I-14.** Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe [11]

- L'écoulement plastique latéral du matériau de la pièce devant une arête tranchante a augmenté la rugosité des surfaces usinées. Par conséquent, plus le matériau de la pièce est dur, et plus il est moins plastique, plus l'état de la surface est meilleur ;
- La rugosité de la surface a pu être améliorée en augmentant la vitesse de coupe. Deux raisons possibles sont : (i) la déformation de matériau de la pièce est faible à une vitesse plus élevée, (ii) la formation d'usure en dépouille devient plus rapide à une vitesse de coupe plus élevée.

Pour l'usinage des aciers très durs (~ 55 HRC), la formation de copeaux est différente de celle de l'usinage classique. En général, la coupe des aciers très durs entraîne la formation de copeaux discontinus appelés aussi dents de scie. Plusieurs auteurs Davies [12] et Poulachon [13] ont étudié les mécanismes de génération de ce type de copeau tout en essayant d'expliquer les causes d'instabilités responsables de cette géométrie. D'après Komanduri et al. [14], cette instabilité dépend des conditions de coupe, de la rhéologie, des propriétés thermoplastiques du matériau, du cisaillement variable produit dans la zone de cisaillement, de la nature du contact outil.

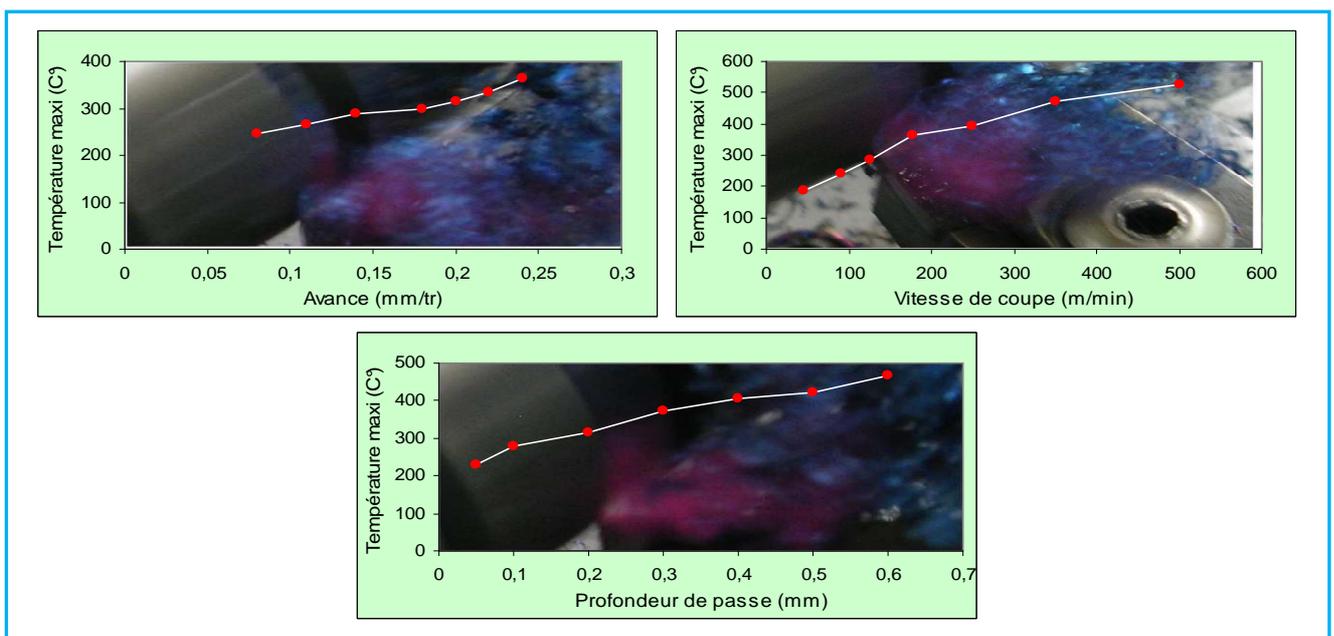


**Figure I-15.** Morphologie du copeau en fonction de la dureté et de la vitesse de coupe [13]

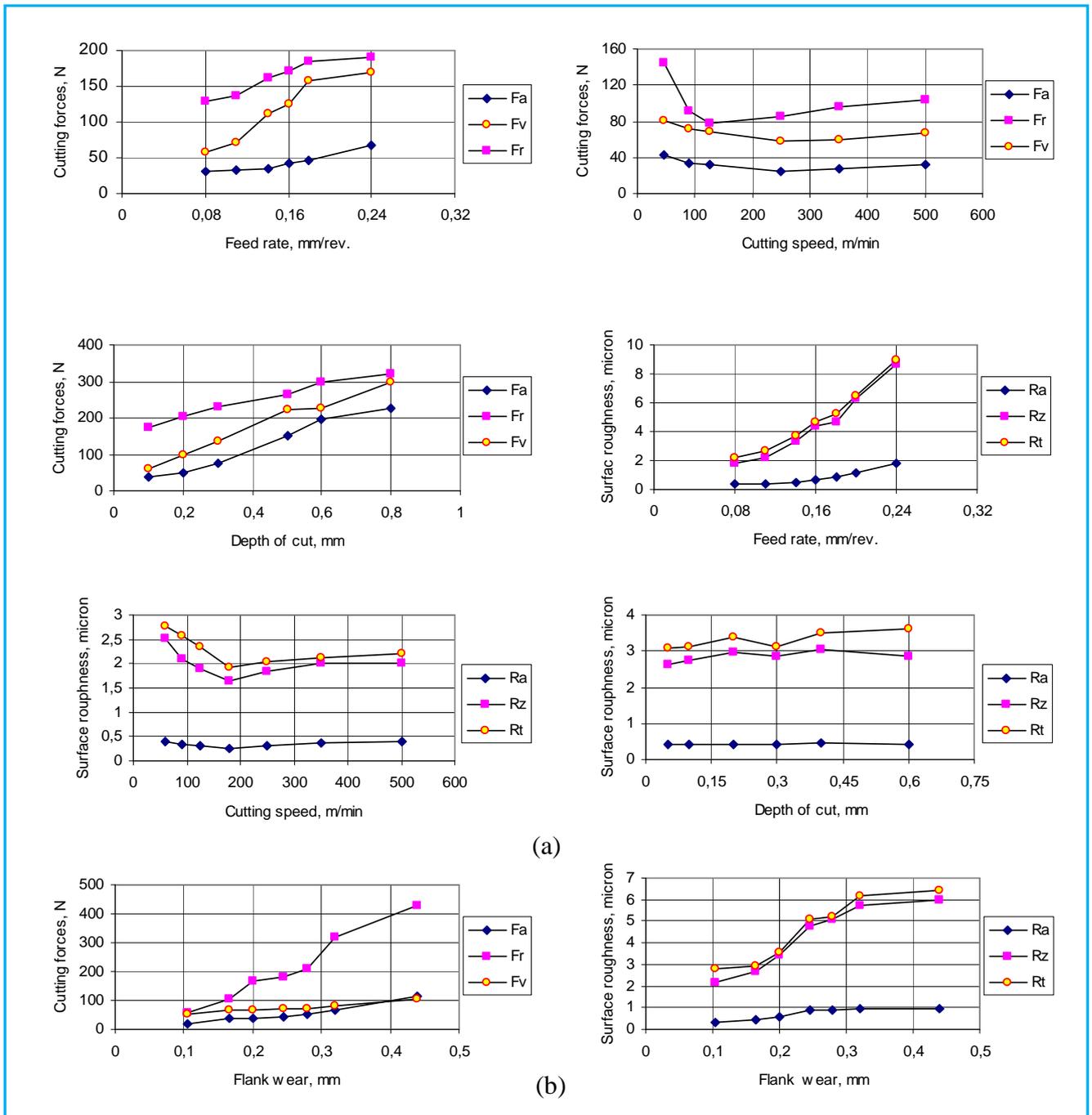
B. Fnides et al. [15 et 16] ont étudié l'évolution de la rugosité et de la température, en tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50HRC, usiné par une céramique mixte (70%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+30%TiC). Cet acier est destiné pour le travail à chaud, exempt de tungstène sur

base CrMoV, insensible aux changements de température et ayant une résistance à l'usure élevée. Il est employé pour la fabrication des matrices, des coquilles, des moules et inserts de coulée sous pression fortement sollicités avec durée de vie élevée. Les essais de chariotage ont été effectués selon la méthode de planification des expériences. Les résultats obtenus ont permis d'étudier l'influence des variables de coupe (l'avance par tour, la vitesse de coupe et la profondeur de passe) sur la rugosité et la température dans la zone de coupe. L'impact de l'usure en dépouille (VB) sur la rugosité a été mis en évidence. Des modèles mathématiques ont été établis pour exprimer le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les paramètres technologiques étudiés. Ainsi, les plages de conditions de coupe les mieux adaptées, ont été déterminées. Sur la base des résultats expérimentaux, les conclusions qualitatives suivantes peuvent être tirées (figures I-16 et 17) :

- Il est à signaler que l'effort axial 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 remarque que la vitesse de coupe affecte la température d'une manière considérable. On note aussi que l'usure en dépouille a une grande influence sur l'évolution des critères de rugosité.
- Les modèles mathématiques établis ont défini le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les paramètres technologiques étudiés. Ainsi, les plages de conditions de coupe les mieux adaptées, ont été déterminées.



**Figure I-16.** Evolution de la température en fonction des paramètres de coupe [15]

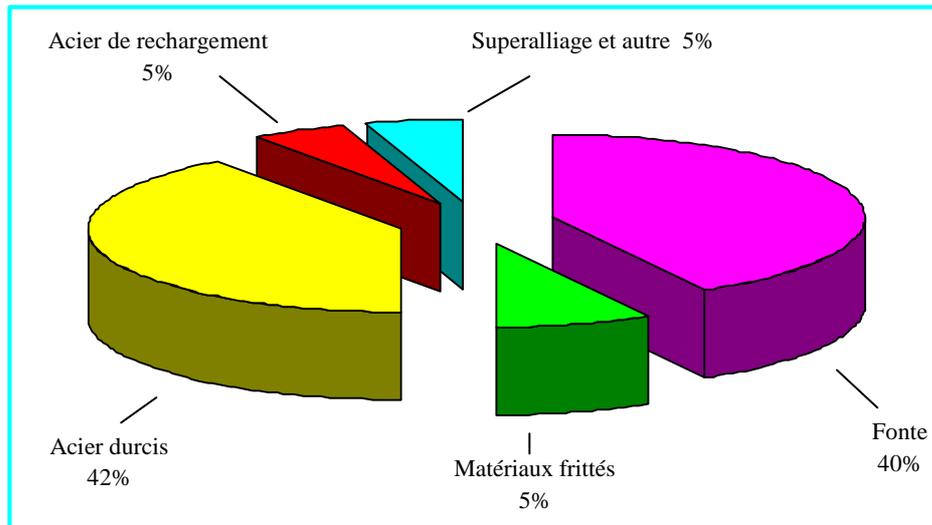


**Figure I-17.** Evolution des efforts de coupe et des rugosités en fonction de :  
 (a) paramètres de coupe  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$  ;  
 (b) Usure en dépouille  $VB$  [16]

## I.4. Matériaux usinés et usinants

### I.4.1. Matériaux usinés

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

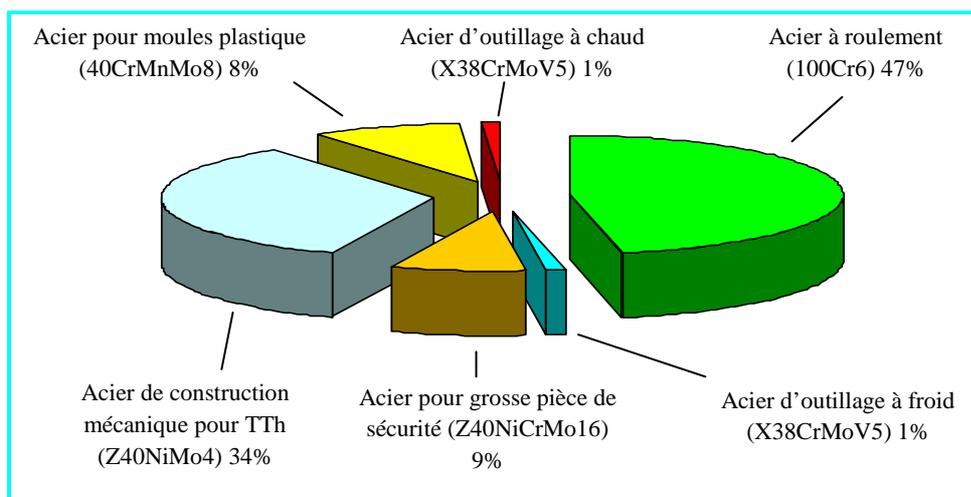


**Figure I-18.** Répartition des matériaux usinés en tournage dur [d'après Gorham Advanced Metal Institue (2002)]

L'aptitude à être usiné et le niveau des propriétés mécaniques sont antagonistes [17]. Les réfractaires, les aciers fortement alliés dans leur état durci, les fontes alliées... sont souvent difficilement usinables par des procédés conventionnels.

Une étude récente sur les applications de l'usinage dur, fait ressortir que 66% d'entre elles concernent les aciers traités, 26% couvrent les fontes et 8% les superalliages et autres matériaux (figure I-18).

La répartition française des aciers traités (figure I-19) montre que l'acier pour roulement 100Cr6 représente à lui seul 47% (120 000t) du volume total des aciers destinés aux traitements thermiques. La production européenne représente cinq fois le marché français.



**Figure I-19.** Répartition de la production française des aciers destinés aux traitements thermiques [1996]

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

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure et à la compression exceptionnelles. Ils sont remarquables pour leurs faibles variations dimensionnelles au traitement thermique. La dureté de ces aciers peut varier de 50 à 65HRC. Ils sont principalement utilisés pour tous travaux à froid tels que : poinçons d'estampage, outils de coupe, molettes à rouler les pas de vis, outils d'extrusion, lames de cisaille, outils de travail du bois, cames....

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

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

**d) Les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI 52100)**

Fortement utilisé (figure I-19), ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils CBN sont employés avec succès lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à faible concentration de CBN est préférable à un outil à forte concentration de CBN ou à une céramique mixte ( $Al_2O_3 + TiC$ ) donnant une durée de vie trois fois supérieure dans le cas de la céramique, et six fois plus dans le cas du CBN à forte concentration.

#### **I.4.2. Matériaux usinants**

L'usinage des matériaux durs nécessite des outils coupants de plus en plus performants. En tournage dur, les plaquettes utilisées peuvent être en carbure, en diamant synthétique, en céramique ou en nitrure de bore cubique. Ces dernières sont plus utilisées car elles possèdent une bonne ténacité avec une dureté élevée.

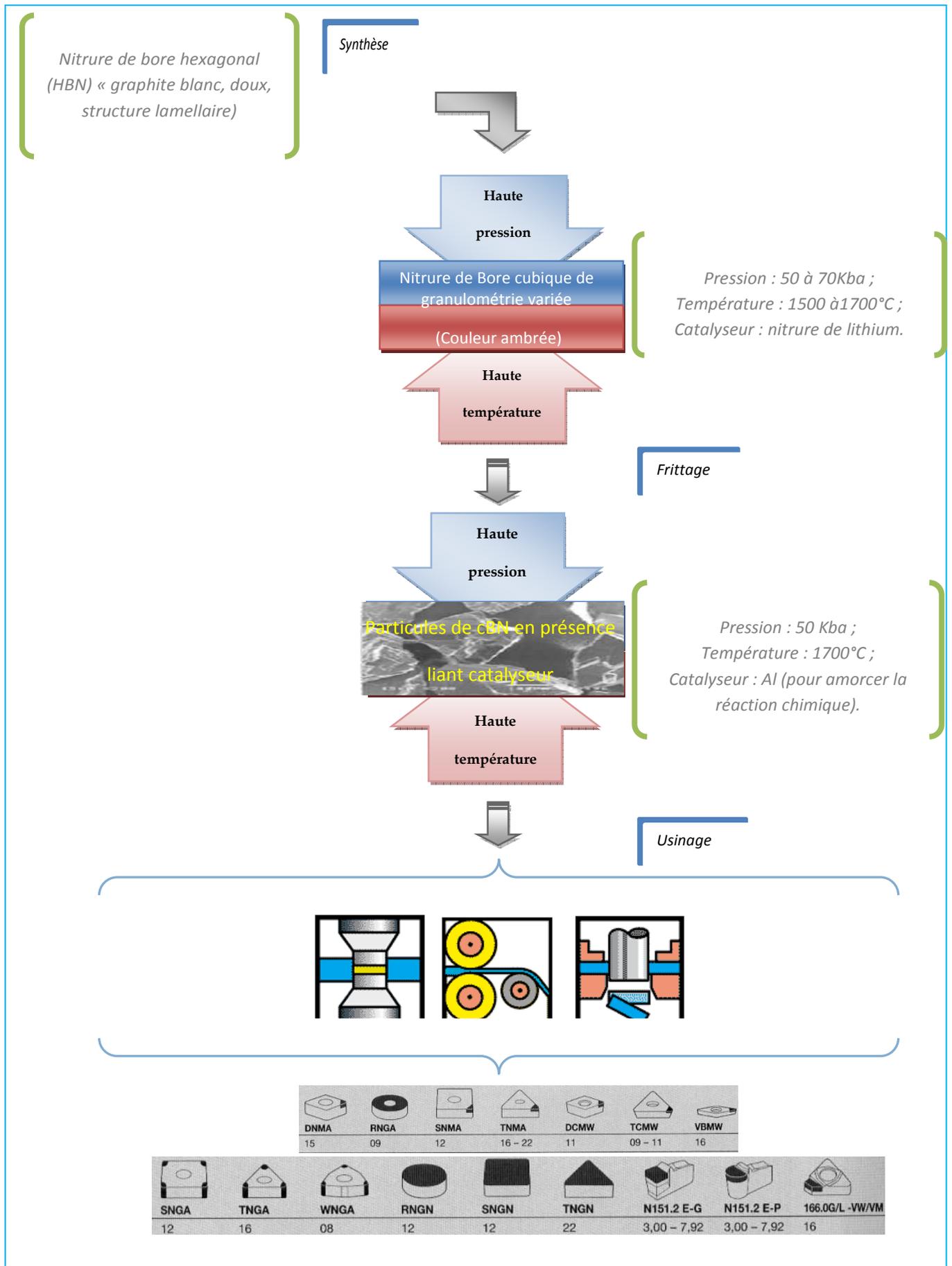
Le nitrure de bore cubique, le matériau le plus dur après le diamant, entièrement fabriqué par l'homme, a été synthétisé avec succès pour la première fois en 1957 par la General Electric Company aux USA. Mais il n'a été utilisé industriellement pour la coupe que dans le milieu des années 1970. Plus de 90% du diamant industriel et 100% du CBN sont produits de synthèse de structure atomique à des températures de 1500°C (figure I-20). Le nitrure de bore polycristallin (PCBN) a été mis en application au milieu des années 70 en raison de la difficulté d'usiner des matériaux ferreux très durs (de 45HRC jusqu'à 70HRC) et pour répondre aux cadences de production souhaitées.

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

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

- Les outils PCBN dits « purs » dont la teneur en nitrure de bore cubique dépasse 90% sont caractérisés par une deuxième phase *liante de nature métallique* (2%  $ALB_2/AIN$ ). Cette nuance possède une grande résistance mécanique et aux chocs. Elle sera recommandée pour l'usinage des alliages de rechargement, des fontes perlitiques, des superalliages et des pièces en métaux frittés. Du fait de sa grande résistance, on utilisera cette nuance pour des travaux d'ébauche et de coupe interrompue d'alliages durs ;
- Les outils PCBN dits « mixtes » métal/céramique : la teneur en nitrure de bore cubique reste inférieure à 70%, et la seconde phase est complexe pour associer les propriétés de *composés métalliques* et celles de *composés céramiques* ; cette seconde phase peut comprendre des composés à base d'alumine {(nitrure  $AIN$ , borure  $ALB_2$ ), de titane (nitrure  $TiN$ , carbure  $TiC$ , carbo-nitrure  $Ti(CN)$ )} et éventuellement d'autres éléments composés. Une nuance à liant céramique possède une plus grande résistance à l'usure thermochimique, ce qui est préférable pour les coupes continues à vitesses élevées des aciers traités [4].

Le pourcentage de CBN joue énormément sur la valeur de la conductivité thermique de plaquette CBN, une plaquette à fort pourcentage de CBN ayant une grande valeur de conductivité thermique évacuera rapidement la chaleur au niveau de la zone de coupe, entraînant moins d'adoucissement du matériau usiné, le rendant ainsi plus dur à cisailer pour l'outil.



**Figure I-20.** Étapes de fabrication des outils CBN

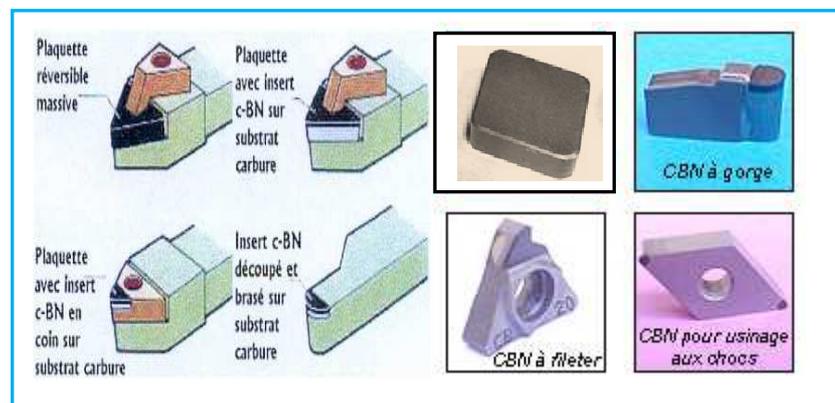
Les différentes marques commerciales de CBN existantes sont : *Amborite* (De Beers), *Borazon* (General Electric), *Sumiboron* (Sumitomo), *Elbor* (origine russe) et *SupraCBN* (Supradiamant).

### 1.4.3. Plaquettes CBN utilisées

#### a) Types d'outils

On trouve plusieurs types de plaquettes commercialisées. Elles distinguent en fonction du type d'usinage. On retrouve (figure I-21) [18] :

- les outils massifs, plus robustes et résistants aux chocs, sont utilisés de préférence pour les opérations d'ébauche. Les plaquettes céramiques sont toujours massives, alors que les CBN peuvent se présenter sous d'autres formes ;
- les outils revêtus sur une face de CBN sont brasés à un substrat de tungstène. Ils sont moins chers, mais résistent moins bien aux chocs ; on les utilise pour des opérations de semi-finition ou finition ;
- les outils revêtus en coin de CBN. Ils n'ont qu'une arête de coupe et sont moins chers. Ils résistent moins à la chaleur. Dans le cas de températures de coupe très élevées, un débrasage se produit entre le CBN et le substrat ;
- les outils avec des inserts CBN sont dans les coins sur toute l'épaisseur de la plaquette, sont utilisables des deux cotés.

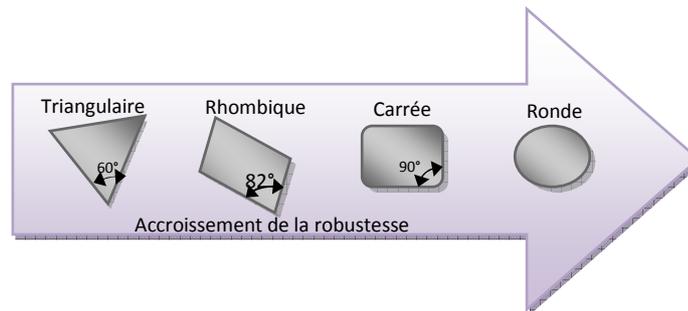


**Figure I-21.** Types d'outils CBN commercialisés

#### b) Géométrie

L'outil doit avoir une rigidité maximale pour supporter les contraintes d'usinage dues aux grandes valeurs de dureté des pièces usinées. L'angle de pointe  $\epsilon_r$  morphologie de la pièce. Pour obtenir la résistance optimale, le rayon de pointe  $R\epsilon$  (0,4 ; 0,8 et 1,2) mm, sera le plus grand possible minimisant ainsi les risques de rupture sous de fortes pressions ou des

coupes interrompues. L'utilisation d'une plaquette ronde réunissant ces considérations est souvent le meilleur choix. Toutes les géométries disponibles sont représentées la figure I-22.



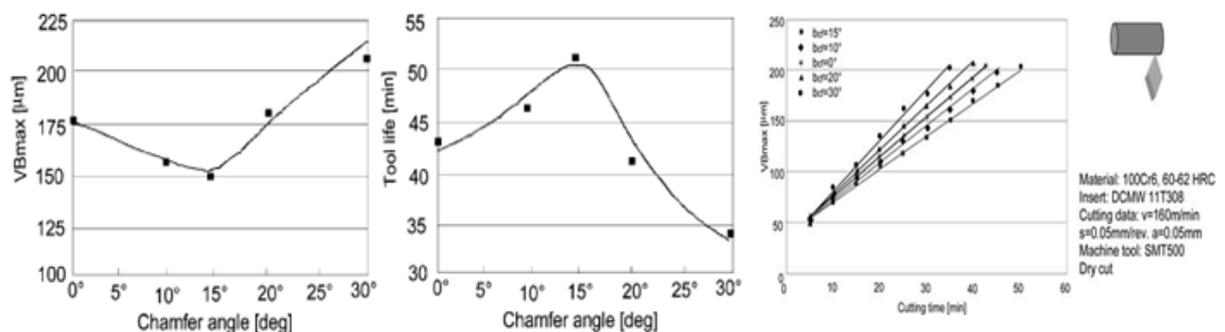
**Figure I-22.** *Accroissement de la robustesse par l'angle de pointe  $\epsilon_r$*

L'utilisation de ces matériaux de plus en plus durs, mais de fragilité croissante nécessite des valeurs d'angle de coupe fortement négatives ( $-15^\circ$  à  $-25^\circ$ ), permettant d'augmenter l'angle de taillant (robustesse), et des protections d'arête compatibles avec une tenue correcte de celle-ci.

En général, le chanfrein permet de renforcer et protéger l'arête d'une usure rapide et des écaillages ; il améliore la durée de vie de la plaquette. L'arête chanfreinée est recommandée dans le cas de travail aux chocs ou de gros enlèvement de matière. La largeur du chanfrein sur la face de coupe doit être supérieure à la valeur de l'avance de l'outil. Les plaquettes à arête vive sont utilisées uniquement en finition et donnent de meilleurs états de surface [4].

J.M. Zhou et al. [19] ont étudié l'effet de l'angle de chanfrein d'une plaquette en PCBN, lors du tournage à sec de l'acier 100Cr6 traité à 62HRC sur l'usure en dépouille et la durée de vie de l'outil.

Il a été constaté que pour un angle de chanfrein de  $15^\circ$ , la durée de vie de l'outil est supérieure 53 pourcent à celle d'un angle de  $30^\circ$  (figure I-23).



**Figure I-23.** *Evolution de l'usure en dépouille et la durée de vie de l'outil en fonction de l'angle de chanfrein [19]*

- L'usure en dépouille est de 0,15mm pour un angle de chanfrein de 15° alors qu'elle est supérieure à 0,2mm pour un angle de chanfrein de 30°.
- Le temps d'usinage est de 60mn pour un angle de chanfrein de 15° par contre il est inférieur à 36mn pour un angle de chanfrein de 30°.

Donc l'outil qui a un angle de chanfrein de 15° avec une largeur de 0,1mm est le plus performant d'après cet article.

#### 1.4.4. Les substrats

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

*a) Les cermets* : sont des carbures, des nitrures, des carbonitrides 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, 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 [20].

*b) Les céramiques* : Le terme céramique désigne aujourd'hui de façon paradoxale des matériaux dont les applications peuvent être à la fois très traditionnelles et souvent utilitaires : briques, vaisselle, etc., mais aussi très spécialisées et parfois même hypersophistiquées : électronique, optique, nucléaire, astronautique, matériaux de coupe [4].

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

Sous le nom de céramique, il est courant de désigner l'oxyde d'aluminium où alumine  $Al_2O_3$ . L'apparition de ce matériau sur le marché remonte aux années 1960. Les céramiques ont été introduites en premier lieu pour l'usinage grande vitesse des fontes et pour les applications nécessitant des taux d'enlèvement de matière importants. Les outils céramiques sont hautement réfractaires (point de fusion supérieur à 1500°C), plus résistant à l'usure et plus stable chimiquement que les carbures cémentés. Grâce à leur exceptionnelle stabilité à haute température, les céramiques conviennent bien pour l'usinage grande vitesse et l'usinage des alliages ferreux très durs jusqu'à 790HV (63HRC).

Leurs principales limitations sont de faibles résistances aux chocs mécanique et thermique. En raison de leur forte affinité chimique, les céramiques ne conviennent pas pour l'usinage des alliages d'aluminium, de titane et autres alliages de métaux réagissant avec l'alumine. Plusieurs céramiques ont été développées et ne cessent encore de s'améliorer pour concurrencer les outils CBN sur certaines applications. Les céramiques utilisées dans le cas de l'usinage de matériaux à haute dureté sont principalement :

- les céramiques mixtes (de couleur noire) ;
- les céramiques renforcées dénommées Whiskers (de couleur verte).



**Figure I-24.** Plaquettes en céramique

## I.5. Les efforts de coupe

### I.5.1. Définition

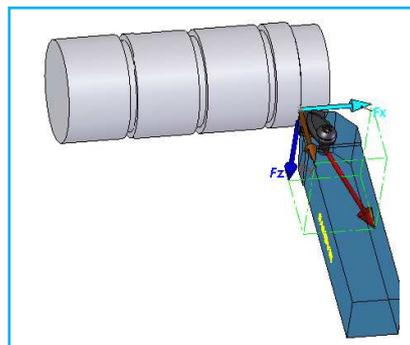
Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec une certaine force « F » dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe (figure I-25). La résultante de coupe « F » est la somme de 3 composantes suivantes [1]:

- 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.

### Rapport des composantes :

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

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad \text{I-1}$$



**Figure I-25.** Composantes de l'effort de coupe

### I.5.2. Intérêt de mesure des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir qu'elle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines, et à prévoir les déformations de pièces. Elle intervient également dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau.

### I.6. Puissance de coupe

Elle est donnée par la relation :

$$P_c = F_c V_c \quad \text{I-2}$$

Où :

- $V_c$  : Vitesse de coupe [m/s] ;
- $F_c$  : Force de coupe [N].

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

$$P_c = K a_p V_c f \quad \text{I-3}$$

Où

- $P_c$  : Puissance de coupe [W] ;
- $V_c$  : Vitesse de coupe [m/s] ;
- $K$  : Effort spécifique de coupe [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] ;
- $f$  : 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  $\eta$ .

$$P_b = \frac{P_c}{\eta} \quad \text{I-4}$$

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

## I.7. Rugosité

### I.7.1. Définition et importance de la rugosité superficielle

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.7.2. Principaux critères d'états de surface

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne (figure I-26), soit [21] :

#### a) Rugosité moyenne arithmétique $R_a$ (figure I-26)

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

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad \text{I-5}$$

#### b) Rugosité totale $R_t$ (figure I-26)

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

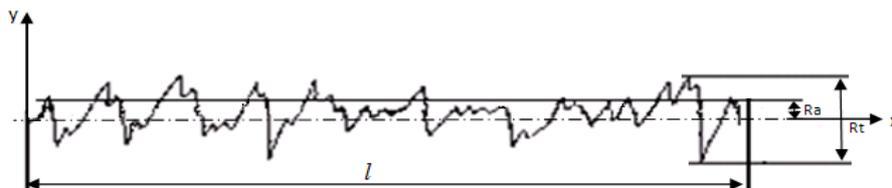


Figure I-26. Critères de rugosité  $R_a$  et  $R_t$

#### c) Rugosité $R_z$ (hauteur des irrégularités)

Représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas. (Figure I-27)

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

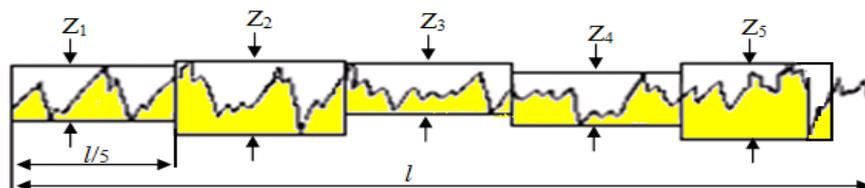


Figure I-27. Critère de rugosité  $R_z$

## I.8. Usure

L'usure de l'outil est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique qui doit obtenir la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes. Il s'ensuit une usure de l'outil qui peut être d'origine thermomécanique ou chimique. Cette usure est provoquée par la concentration de contraintes en divers endroits de l'outil. Donc on peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et lubrification) [20] :

- *Vitesse de coupe* : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure ;
- *Avance* : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil.
- *Profondeur de passe* : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure ;
- *Matériau usiné* : Son influence sur l'usure de ses propriétés physiques (conductibilité thermique) et de ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition) ;
- *Lubrification* : Son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la zone de coupe.

Le second groupe est formé par les paramètres physiques et mécaniques de l'outil (géométrie et propriété chimiques). Des chercheurs comme [22] et [23] ont observé que les différents mécanismes de l'usure interviennent pour différentes plages de vitesses. L'usure par abrasion est la plus forte à basse vitesse, mais lorsque la vitesse augmente, l'usure adhésive devient de plus en plus dominante et l'effet d'abrasion diminue ou disparaît. La température est une fonction de la vitesse, l'excès de chaleur catalyse le phénomène d'usure. Diminuer la chaleur dans le système d'usinage est une méthode naturelle pour contrôler la vitesse et le niveau d'usure. Comme les propriétés thermiques sont supposées constantes, la seule manière de changer les conditions thermiques est d'agir par des moyens extérieurs au système [18].

### I.8.1. Mécanisme et forme d'usure

L'usure des outils est la conséquence de divers mécanismes décrits ci-dessous.

### a) *Processus d'abrasion* (MECANIQUE)

L'usure par abrasion se caractérise par la formation de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou dans la direction du copeau qui glisse le long de la face de coupe. L'usure par abrasion apparaît donc à la fois sur la face de coupe et sur la face de dépouille des outils (figure I-28). Ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure. Elles peuvent être présentes dans la pièce sous la forme d'inclusions et de précipités ou provenir de l'outil lui-même par d'autres mécanismes d'usure telle que l'adhésion. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage. L'usure par abrasion est l'usure dominante quand le contact à l'interface outil-copeau est essentiellement du glissement [20].



**Figure I-28.** *Usure par abrasion*

La vitesse d'usure abrasive croit avec la qualité de particules abrasives qui entrent en contact avec l'outil par unité de temps. Elle croit donc avec la vitesse de coupe.

### b) *Processus d'adhésion* (MECANIQUE)

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

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

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

Cette usure est très faible et généralement négligeable.

### c) *Processus de déformation plastique* (MECANIQUE)

Elle est occasionnée par une sollicitation trop importante de l'arête de coupe (matériaux usinés trop durs) en combinaison avec des températures d'usinages élevées. Si on dépasse la zone de déformation plastique du matériau, il y aura rupture !

On peut trouver cette déformation plastique en parallèle d'une cratérisation. En effet le cratère affaiblit la section de l'outil (figure I-29).

Ses critères caractéristiques :  $VB_C$  et  $SV_P$



**Figure I-29.** Déformation plastique

#### **d) Processus de diffusion (PHYSICO-CHIMIQUE)**

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

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

#### **e) Processus d'oxydation (PHYSICO-CHIMIQUE)**

Le milieu de l'usinage est constitué :

- De l'oxygène dans l'air ;
- Des hautes températures ;
- De l'eau dans les huiles de coupe solubles.

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoque localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier.

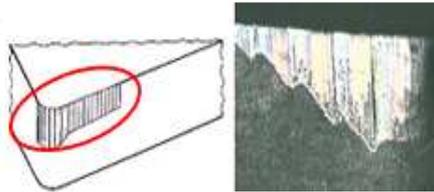
De plus, le potentiel d'oxydo-réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.

#### **f) Usure en dépouille ou usure frontale**

Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête, et elle est caractérisée par la largeur moyenne de cette bande  $VB$  (figure I-30).

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

VB critique = 0,6 mm en ébauche et 0,3 mm en finition



**Figure I-30.** Usure en dépouille

### **g) Usure en cratère**

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

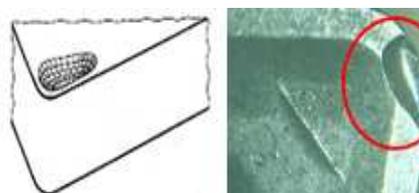
Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage, la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoquent une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion (figure I-31).

Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par une flèche  $S_{VP}$  et un renflement de la face de dépouille. L'usure est souvent constatée sur les outils carbures, elle provoque généralement la rupture de la pointe de l'outil.

$$\text{Valeur limite : } K_{T \text{ critique}} = 0,06 + 0,3 f \quad \text{I-7}$$

—  $f$ : avance par tour [ $\text{mm.tr}^{-1}$ ].

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



**Figure I-31.** Usure en cratère

### **h) Usure en entaille ou par oxydation**

Elle apparaît ponctuellement au niveau du point de contact entre l'arête principale de coupe et la surface de la pièce mais elle peut aussi apparaître sur la face de dépouille secondaire. Elle est due à l'écaillage ou l'oxydation de la pièce. Ce genre d'usure due à

des phénomènes métallurgiques (calamine des pièces forgées, différence de taille de grain des pièces moulées, oxydation des aciers, austénitiques par exemple) est caractérisé par l'indice  $V_N$ . Suivant l'importance de cette usure, il y a des risques de rupture !

En général :  $V_{N \text{ critique}} = 1 \text{ mm}$

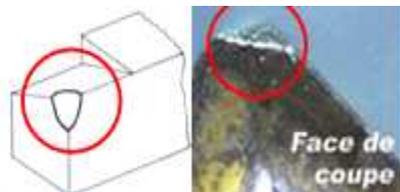


**Figure I-32.** Usure en entaille

Remarque : cette usure en entaille est souvent accompagnée d'une usure en dépouille. Cependant il est à remarquer que les entailles doivent être exclues de la mesure de VB (figure I-32).

#### *i) Rupture de la plaquette*

Une rupture de la plaquette signifie en général détérioration de l'outil et de la pièce. Ses causes sont multiples et dépendent de la machine et de la pièce. Elle est souvent le résultat d'entailles sur l'arête de coupe, d'une cratérisation ou d'une usure trop importante (figure I-33).



**Figure I-33.** Rupture par cassure en pointe

#### *j) Arêtes rapportées*

Les arêtes rapportées résultent d'une accumulation de métal de la pièce usinée sur la face de coupe de l'outil, en particulier dans le cas de matériaux difficilement usinables. Il arrive parfois que cet apport de métal se détache et détériore l'arête de coupe. Il mène en outre à des états de surface médiocres. Le phénomène est dû à une vitesse de coupe et une avance trop faible ou des angles de coupe non appropriés (figure I-34).



**Figure I-34.** Arête rapportée

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

Légères fissures sensiblement perpendiculaires à l'arête de coupe occasionnées par les chocs thermiques résultant des interruptions de coupe, en particulier dans le cas du fraisage (figure I-35).

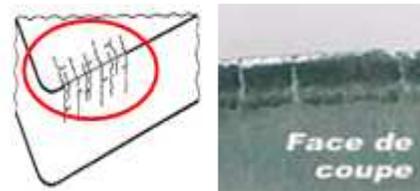


Figure I-35. Fissuration d'arête

### I.8.2. Usure visible sur l'outil

L'ensemble des processus décrits dans les deux paragraphes précédents, en se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils. Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures. Ces dernières sont mesurables (figure I-36) [18].

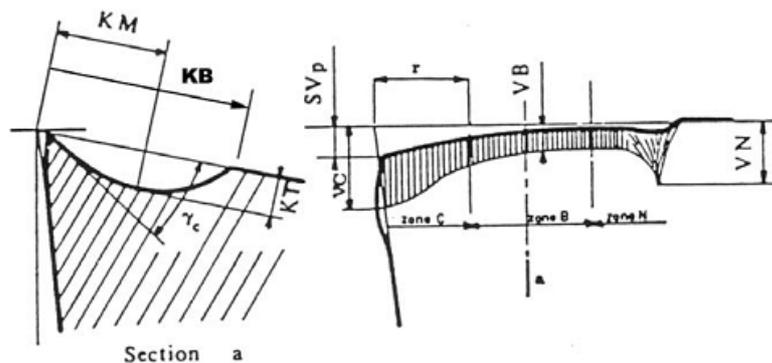


Figure I-36. Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil d'après la norme NFE 66 505

- KM: Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil ;
- KT : Profondeur d'un cratère ;
- KB : Largeur du cratère ;
- $\gamma_c$  : Angle de cratérisation ;
- VB : Hauteur de l'usure en dépouille ;
- VN : Profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale ;
- VC : Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée ;
- $SV_p$  : Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée.

### I.8.3. Modèles de lois d'usure

#### a) Modèle de Taylor généralisé

Taylor fut le premier à proposer en 1907, un modèle mathématique reliant la durée effective de coupe  $T$  d'un outil aux paramètres de coupe [24].

$$T = C V^n \quad \text{I-8}$$

- $V$  : Vitesse de coupe [m/min] ;
- $T$  : Durée de vie [min] ;
- $n$  : Exposant de TAYLOR ;
- $C$  : Constant dépendant du couple outil/pièce.

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

$$\log T = n \log V + \log C \quad \text{I-9}$$

Gilbert (1950) a proposé la généralisation du modèle de Taylor. La constante  $C$  est remplacée par une expression qui tient compte de la géométrie de l'outil et du copeau.

$$T = K a_p^x f^y V^n \quad \text{I-10}$$

- $K$  : dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné ;
- $a_p$  : profondeur de passe [mm] ;
- $f$  : avance [mm/tr] ;
- $x, y$  : exposants dépendant de la nuance de l'outil.

### I.8.4. Autres modèles

#### a) Modèle de Kronenberg (1968)

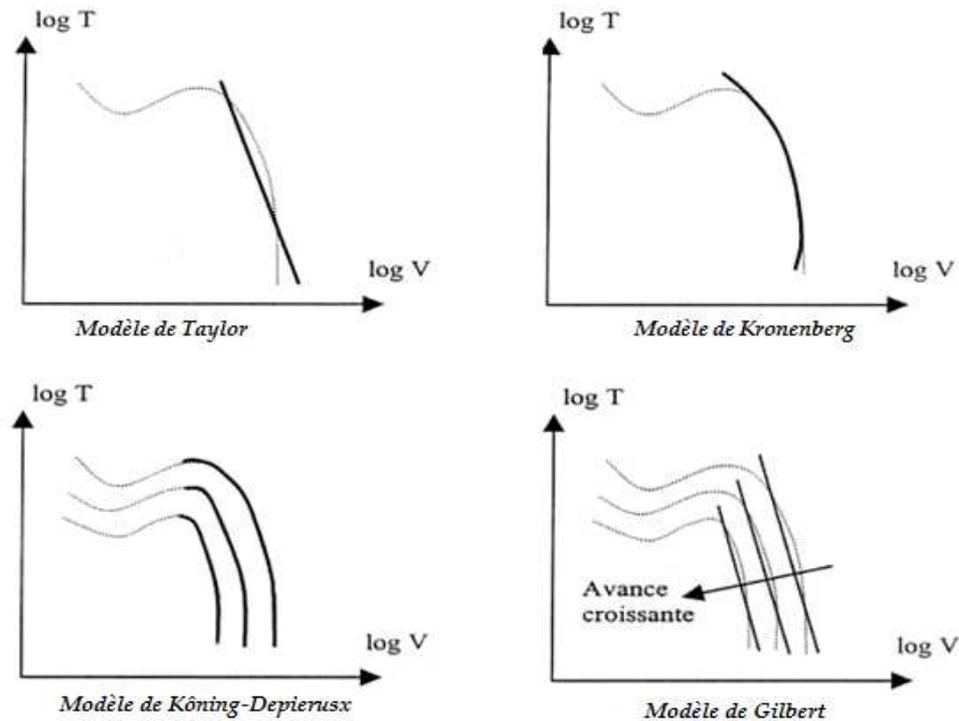
Il donne une vitesse finie pour une durée de vie nulle :

$$T + K = C \times V^n \quad \text{I-11}$$

#### b) Modèle de Kôning-Depierusx (1969)

Modèle très proche des résultats expérimentaux mais nécessitant des moyens de calcul important :

$$T = \exp(-\alpha \cdot V^\nu - \gamma a^\mu - \sigma f^\lambda) \quad \text{I-12}$$

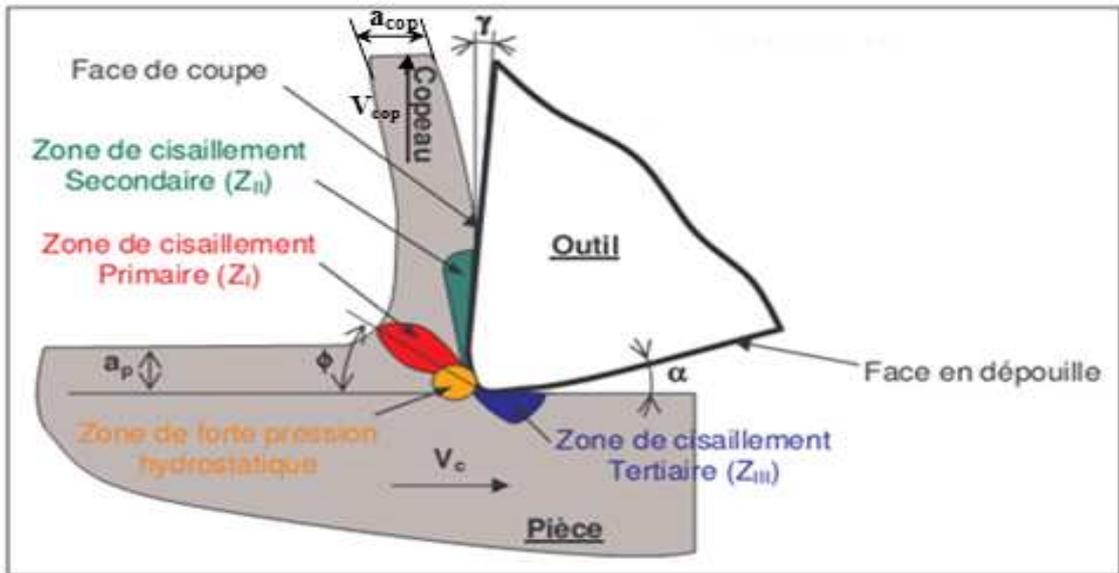


**Figure I-37.** Représentation graphique des différents modèles [24]

## I.9. Formation du copeau

La compréhension des différents phénomènes qui interviennent lors du tournage est complexe et pas encore maîtrisée. L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil coupant. Dans le cas de la coupe orthogonale en régime stationnaire, la force exercée par l'outil lors de son engagement dans la matière provoque, à l'échelle microscopique, une forte compression de la matière (une déformation plastique et un échauffement considérable) et engendre une zone de cisaillement intense entre la pointe de l'outil et la surface externe du copeau. Cette zone est appelée zone de cisaillement primaire et c'est aussi la zone de formation de copeau [25]. En outre, le copeau ( $Z_I$ ) formé s'écoule et frotte sur la face de coupe de l'outil. Ce frottement intense génère la zone de cisaillement secondaire ( $Z_{II}$ ) [26]. Cette dernière est constituée d'une fine bande de frottement intense entre le copeau et l'outil et d'une autre bande d'influence du frottement du copeau sur l'outil (cisaillement secondaire) [27] et [28]. De plus, pendant l'avance de l'outil, la face en dépouille de ce dernier frotte sur la nouvelle surface et produit une troisième zone de cisaillement nommée zone de cisaillement tertiaire  $Z_{III}$ .

Ainsi et comme le montre la figure I-36, la formation du copeau peut être décrite en définissant différentes zones d'absorption de l'énergie mécanique apportée lors de la coupe, une zone de forte pression hydrostatique au niveau de la pointe de l'outil et les trois zones de cisaillement citées précédemment.



**Figure I-38.** Les différentes zones de déformation lors de la formation d'un copeau en coupe orthogonale

- $\emptyset$  : Angle de cisaillement [degré] ;
- $V_c$  : Vitesse de coupe [m/min] ;
- $V_{cop}$  : Vitesse de copeau [m/min] ;
- $\alpha$  : Angle en dépouille [degré] ;
- $\gamma$  : Angle de coupe [degré] ;
- $a_{cop}$  : Épaisseur du copeau [mm] ;
- $a_p$  : Profondeur de passe [mm].

Le phénomène complexe de formation de copeau dépend également de :

- La rhéologie du matériau usiné (matériau dur, matériau à usinabilité amélioré ...etc.) ;
- Les propriétés thermo-physiques du matériau usiné et usinant ;
- La nature et la géométrie de l'outil ;
- La nature du contact outil-copeau ;
- La nature de l'opération effectuée (coupe orthogonale, chariotage, ...etc.) ;
- Procédé d'usinage utilisé (usinage dur, usinage avec assistance ...etc.) [1].

#### *Zone de cisaillement primaire*

La zone de cisaillement primaire est le lieu où s'effectue le changement de direction de la matière usinée qui passe de la vitesse de coupe  $V_c$  à la vitesse du copeau  $V_{cop}$ . C'est une zone intense de déformation qui s'étend de la pointe de l'outil jusqu'à la surface libre du copeau. Dans de nombreux modèles de coupe [25], [29], la zone de cisaillement primaire est idéalement représentée par un plan (dit de « cisaillement ») incliné d'un angle  $\emptyset$  par rapport à la direction de coupe. L'angle de cisaillement  $\emptyset$  est alors géométriquement relié à  $a_{cop}$ ,  $a_p$  et  $\alpha$  par la relation :

$$\frac{a_p}{a_{cop}} = \frac{\sin \varnothing}{\cos(\varnothing - \alpha)} \quad \text{I-13}$$

L'expression de la vitesse du copeau  $V_{cop}$  :

$$V_{cop} = \frac{\sin \varnothing}{\cos(\varnothing - \alpha)} V_c \quad \text{I-14}$$

### *Zone de cisaillement secondaire*

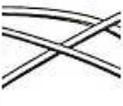
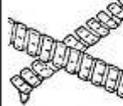
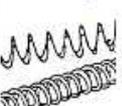
Les phénomènes de frottement à l'interface outil-copeau induisent également des déformations plastiques dans une région du copeau adjacente à la face de coupe de l'outil. Dans cette zone de cisaillement secondaire la matière est soumise à de forts taux de cisaillement et subit une forte élévation de température en plus de celle subie lors du passage dans la zone de cisaillement primaire.

### *Zone de cisaillement tertiaire*

Le contact entre l'outil (au niveau du bec et de la face en dépouille) et la surface usinée peut également provoquer des déformations plastiques dans la pièce. Elles sont beaucoup moins intenses que dans les deux précédentes zones de déformation, mais d'elles dépendent aussi de la qualité de la surface usinée (rugosité et contraintes résiduelles) [30].

## **I.9.1. Échelle microscopique**

Pour mieux comprendre les mécanismes de génération de copeaux, plusieurs auteurs [31] et [4] ont eu recours à des essais de coupe interrompue. Ce type de test permet à la fin de l'essai de conserver la racine du copeau attaché à la pièce, et de donner ainsi des informations sur le mécanisme mis en jeu lors de la génération du copeau (figure I-39).

1 : copeau ruban	2 : copeau tubulaire	3 : copeau en spirale	4 : copeau hélicoïdal en rondelle	5 : copeau hélicoïdal conique	6 : copeau élémentaire	7 : copeau aiguille	8 : copeau en arc
11 : Long 	21 : Long 	32 : plat 	41 : Long 	51 : Long 	61 : Enchevêtré 		
12 : Court 	22 : Court 	32 : Conique 	42 : Court 	52 : Court 	62 : détaché 		
13 : Enchevêtré 	23 : Enchevêtré 		43 : Enchevêtré 	53 : Enchevêtré 			

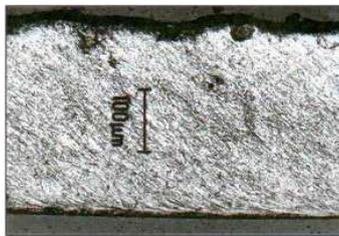
**Figure I-39.** Formes macrographiques de copeaux classés selon la norme ISO NFE 66 505

Les mécanismes de génération de copeaux et les phénomènes thermomécaniques intervenant conduisent à l'échelle micrographique, à la formation de copeaux de natures et de morphologies très différentes. Les copeaux peuvent être classifiés suivant trois grands groupes : copeau continu, copeau avec arête rapportée, copeau discontinu [1].

#### **a) Copeau continu**

Les copeaux continus formés dans un état de déformation plastique stationnaire (associés à une coupe stable) les champs de déformation, des vitesses de déformation et de la température sont constants dans le temps [30].

La figure I-40 donne un exemple de copeau continu obtenu par [32] pendant l'usinage d'un acier 32CrMoV13 d'une dureté de 270 HV avec une nuance d'outil en Cermet.



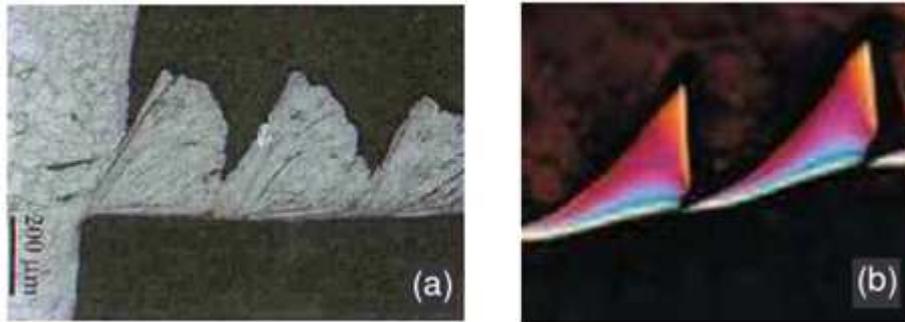
**Figure I-40.** Copeau continu  
( $V_c = 100\text{m/min}$ ,  $f = 0,2\text{mm/tr}$ ) [32]

Lors de la génération d'un copeau continu, la valeur de la contrainte de cisaillement que subit la matière à la traversée de la zone primaire n'atteint pas la limite de rupture du métal et ce dernier s'écoule de manière continue le long de l'outil. Généralement, ce type de copeau est obtenu pour de faibles vitesses de coupe et/ou d'avance [33].

#### **b) Copeau discontinu**

Dans ce cas, la valeur de la contrainte de cisaillement dans la zone primaire atteint la limite de rupture du métal usiné et le copeau se casse sous l'effet de cette rupture finale du matériau. Cette morphologie est souvent observée dans l'usinage des aciers inoxydables austénitiques (figure I-41a), des aciers durs (figure I-41b) et des aciers fragiles.

Il est très important de comprendre la genèse des copeaux en dents de scie car d'une part, ils sont faciles à fragmenter vu la faible épaisseur qui joint chaque feston, qui à son tour va permettre de dissiper plus de chaleur en comparaison avec un copeau continu. Ainsi, cette petite épaisseur va permettre de diminuer la température de coupe à l'interface Pièce-outil-copeau [34]. D'autre part, la segmentation peut conduire à de fortes variations de la fréquence périodique sur les efforts de coupe [12], à l'augmentation de l'usure de l'outil et à la diminution de la précision de la pièce usinée [14].



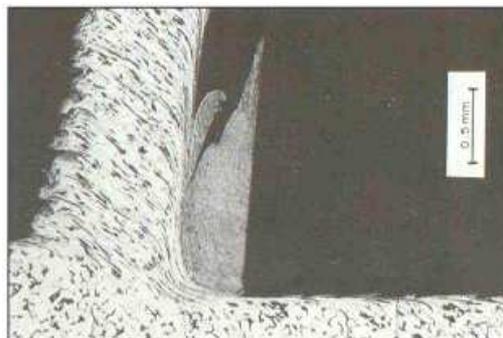
**Figure I-41.** Copeau discontinu

(a) cas d'un acier austénitique inoxydable usiné avec un outil carbure ( $V_c = 130\text{m/min}$ ,  
 $f = 0,1\text{mm/tr}$ ) [33]

(b) cas d'un acier à roulement 100Cr6 à 62HRC usiné avec un outil en céramique renforcé SIC [35]

### c) Copeau avec arête rapportée

Pendant la coupe et pour de faibles vitesses de coupe, une arête rapportée peut se former par accumulation de la matière à la pointe de l'outil de coupe générant ainsi une nouvelle arête, qui déplacera le contact outil copeau (figure I-42) (Trent 1991). Les dimensions de l'arête rapportée (l'épaisseur et la longueur), conditionnent la rugosité totale [31].



**Figure I-42.** Copeau avec arête rapportée [31]

Les différentes morphologies présentées ci-dessus, représentent les grandes familles de formes de copeaux obtenus en coupe. Il existe aussi d'autres formes (voir la figure I-39).

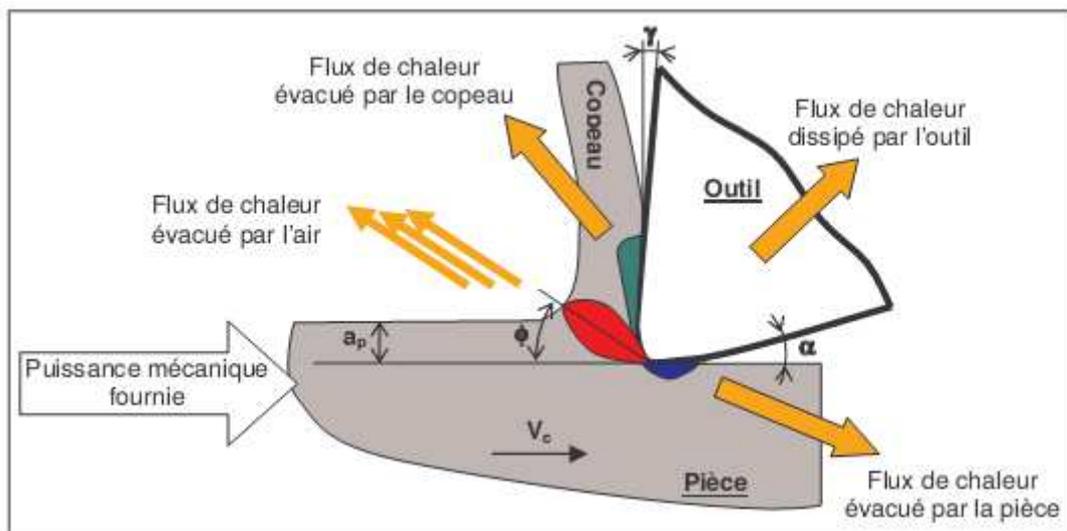
## I.10. Température

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

deux corps. On peut mesurer la température d'un corps en observant le changement de l'une de ses propriétés spécifiques, telle que la résistivité électrique.

Durant l'usinage, il est supposé que la majorité de la puissance mécanique mise en œuvre se transforme en puissance thermique. Les zones de cisaillement (primaire, secondaire et tertiaire) générées par la coupe sont le siège de production de chaleur. Les flux de chaleur issus de ces zones sources sont dissipés, d'une façon non équivalente, dans la pièce, l'outil de coupe, le copeau, et une partie minime est évacuée par l'air (figure I-43).

Lors de la coupe, la connaissance des phénomènes thermiques induits est primordiale pour la compréhension de la coupe et pour améliorer l'usinabilité de certains matériaux. De plus, ces températures influent sur le produit final (contraintes résiduelles, états de surfaces, tolérances géométriques ...). A cet effet, dans ce qui suit, nous présenterons les différentes techniques expérimentales qui permettent d'évaluer le champ thermique généré par la coupe à l'interface outil-pièce-copeau et d'analyser les contraintes résiduelles des surfaces usinées.



**Figure I-43.** *Distribution des flux de chaleur générés en coupe orthogonale*

L'analyse de température dans la zone de coupe est très complexe et difficile. En effet, les forts gradients thermiques et le mouvement des différents antagonistes (pièce, outil, copeau) nécessitent d'avoir un système de mesure de température qui prend en compte toutes ces spécificités. Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes permettant de remonter à la température de l'arête de coupe de l'outil [1].

## I.11 Conclusion

Le premier chapitre a été réservé à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux. La définition du tournage dur, le marché du PCBN, la recherche en tournage dur, les

matériaux usinés et usinants, les efforts, les pressions et la puissance de coupe, la rugosité, l'usure et ses modèles, la formation du copeau et la température dans la zone de coupe ont été définis.

# Introduction

## Étude bibliographique sur la coupe des métaux

### **Procédures expérimentales**

- II.1. Introduction
- II.2. Matériels utilisés
- II.3. Planification des expériences

## Résultats des essais d'usinage

## Traitement et analyse des résultats

## II.1. Introduction

Les essais d'usinage de l'acier **X38CrMoV5-1**, nécessaires à la réalisation de notre projet, ont été effectués au laboratoire de coupe des métaux du département de génie mécanique 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** de puissance sur la broche égale à 6.6KW (figure II-1). Les fréquences de rotation disponibles sur le tour sont : (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min.

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

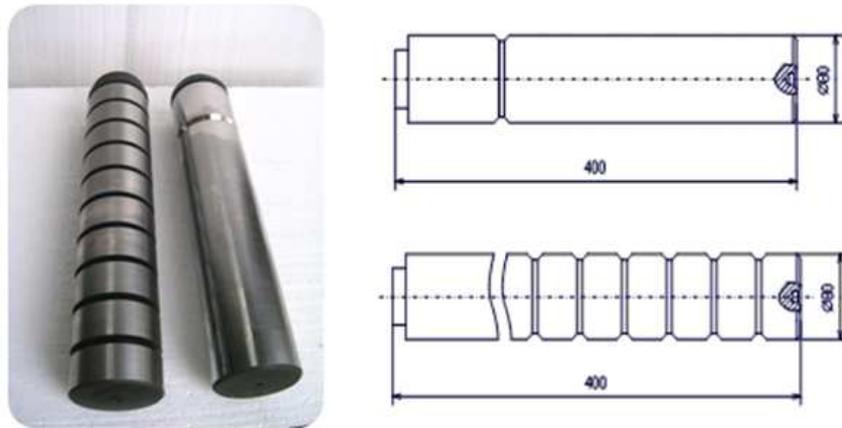


**Figure II-1.** *Tour parallèle modèle SN 40C*

### II.2.2. Matériau utilisé pour les essais d'usinage

C'est un acier fortement allié travaillant à chaud, sa nuance ISO est **X38CrMoV5-1**. Il possède une excellente résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Sa résistance à haute température, sa ténacité et son aptitude au polissage, lui permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants : matriçage à chaud, moules sous pression, etc.

Pour les 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 **X38CrMoV5-1** est représentée dans le tableau II-1:

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

**Tableau II-1.** *Composition chimique de l'acier X 38 CrMoV 5-1*

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

### **II.2.3. Four à chambre pour 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	Dureté après traitement	Traitement thermique		Temps de maintien
			trempe	Revenu	
X38CrMoV5-1	26 HRC	50HRC	1010°C	250°C	45 minutes

**Tableau II-2.** Conditions de traitement thermique

Les traitements thermiques des éprouvettes ont été réalisés dans un four électrique pour atelier de production (figure II-3). Les caractéristiques de ce four sont citées dans le tableau II-3.

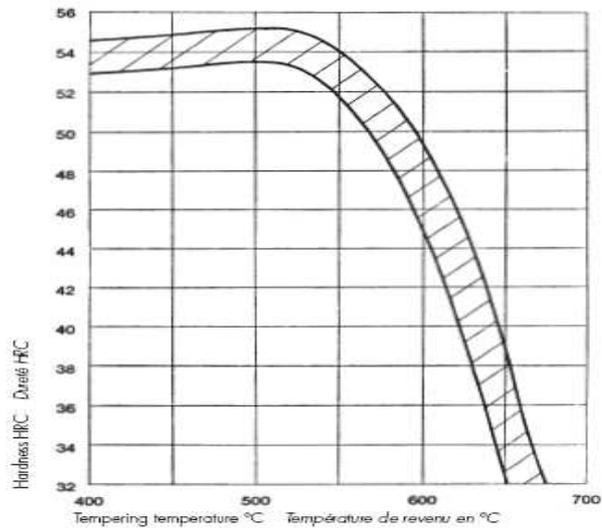
Marque	Dimensions (mm)			Puissance (KW)	T°max
	Largeur (b)	Longueur (L)	Hauteur (h)		
C100S	400	600	430	14	1200°C

**Tableau II-3.** Caractéristiques du four électrique



**Figure II-3.** Four à chambre électrique pour le traitement thermique des éprouvettes

La figure II-4 représente le diagramme de revenu de l'acier X38CrMoV5-1 établi par le fabricant.



**Figure II-4.** Diagramme de revenu

#### II.2.4. Plaquette de coupe

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée (figure II-5) à fixation par trou central, toutes les informations relatives aux plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau II-4 :

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Marque	Composition
Nitride de Bore cubique	CBN 7020	SNGA 120408S01020	Sandvik	57% CBN + 35% TiCN + 8% (AlN+AlB <sub>2</sub> +WC+Co)

**Tableau II-4.** Informations relatives au matériau de coupe utilisé



**Figure II-5.** Plaquette de coupe utilisée

#### II.2.5. Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil sur lequel se fixe la plaquette mécaniquement par trou central (figure II-5).

Désignation	Marque	$\alpha$	$\gamma$	$\chi$	$\lambda$
PSBNR 25×25 K12	TIZIT SIMPLEX	6°	-6°	75°	-6°

**Tableau II-5.** Caractéristiques du porte plaquette utilisé



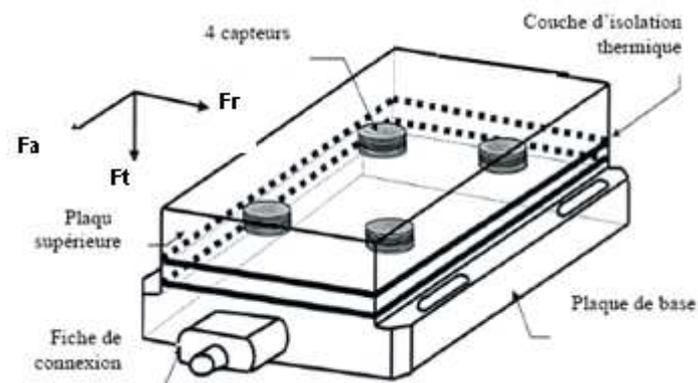
**Figure II-6.** *Porte outil utilisé*

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

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne dynamomètre (*KISTLER*), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin 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 est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (figure II-7). Le porte outil type 9403 vissable est employé pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26. Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (*DYNOWARE*) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes :

- Force axiale :  $F_x$  ;
- Force radiale :  $F_y$  ;
- Force tangentielle :  $F_z$ .



**Figure II-7.** *Capteur d'effort de coupe KISTLER*

### Chaîne de mesure et caractéristiques

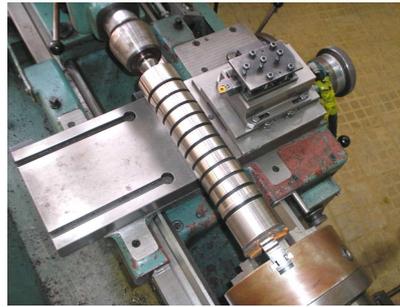
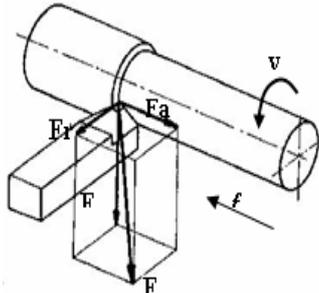


Plate forme Kistler modèle 9257 B



Traceur



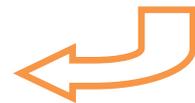
Détermination des trois composantes de l'effort de coupe



Amplificateur multicanaux



Ordinateur PC avec logiciel dynoware



**Figure II-8.** *Dynamomètre utilisé pour la mesure des efforts de coupe*

Les caractéristiques du dynamomètre 9257B 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 ;
- ordinateur personnel (PC) ;
- traceur.

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

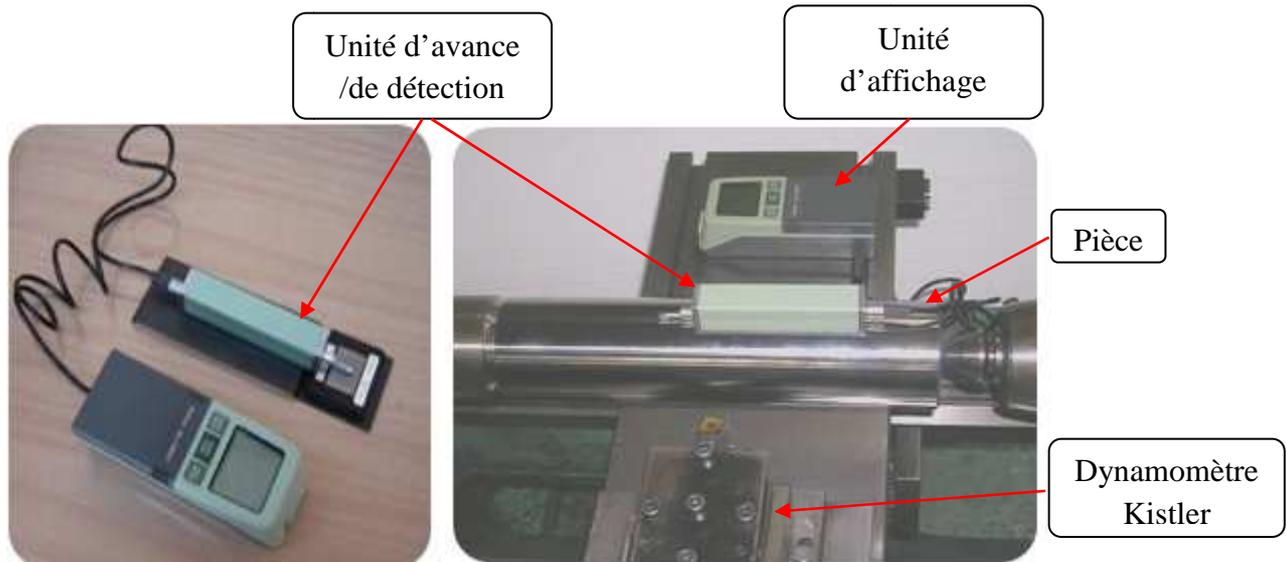
Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) est du type HUND (W-AD). La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0.001mm. La ligne de référence 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-9).



**Figure II-9.** *Microscope 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-10). Il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de  $5\mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.



**Figure II-10.** *Mesure de rugosité sans démontage de la pièce*

### II.2.9. Mesure de la température (Pyromètre à infrarouge)

Durant l'usinage, pour mesurer les températures maximales dans la zone de coupe, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge modèle **Raynger 3I** (figure II.11). Le pyromètre mesure les températures de surface à distance. Il concentre l'énergie infrarouge rayonnant de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (moyenne, maximale et minimale) qui seront affichées sur l'écran digital en degré Celsius ou Fahrenheit.

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

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



**Figure II-11.** *Pyromètre à infrarouge*

### II.2.10. Autres équipements:

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

### II.3. Planification des expériences

Les paramètres de coupe ( $V_c, f, a_p$ ), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil ( $\alpha, \gamma, \lambda, \chi, \epsilon_r$ ), 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 :

- Méthode uni factorielle
- 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-10). 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°	Facteur variable	Paramètre de sortie						
	X	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	-	Y <sub>g</sub>	-	Y <sub>n</sub>	Y <sub>moy</sub>
1	X <sub>1</sub>	Y <sub>11</sub>	Y <sub>21</sub>	-	Y <sub>g1</sub>	-	Y <sub>n1</sub>	Y <sub>moy1</sub>
2	X <sub>2</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>22</sub>	-	Y <sub>g2</sub>	-	Y <sub>n2</sub>	Y <sub>moy2</sub>
3	X <sub>3</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>23</sub>	-	Y <sub>g3</sub>	-	Y <sub>n3</sub>	Y <sub>moy3</sub>
i	X <sub>i</sub>	X <sub>li</sub>	Y <sub>2i</sub>	-	Y <sub>gi</sub>	-	Y <sub>ni</sub>	Y <sub>moyi</sub>
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X <sub>N</sub>	X <sub>1N</sub>	Y <sub>2N</sub>	-	Y <sub>gN</sub>	-	Y <sub>nN</sub>	Y <sub>moyN</sub>

**Tableau II-6.** 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 :

$$N = q^k \quad \text{II-1}$$

Où ;

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

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ( $k=3$ ) et chaque facteur a trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyen (0) et un niveau inférieur (-1)). Nous avons alors :  $N = 3^3 = 27$ .

Les résultats représentés dans le tableau II-11 sont analysés par le logiciel MINITAB 13 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, la durée de vie 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 moyen (0)	Valeur moyenne	Valeur moyenne	Valeur moyenne
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	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

**Tableau II-7.** Matrice de planification pour un plan 3<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>), la géométrie de la partie active de l'outil (α, γ, λ, χ et ε<sub>r</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-8 à II-10. Tous les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification.

Les paramètres constats	Valeurs	Les paramètres variables	valeurs
Vc (m/min)	180	f (mm/tr)	0,08 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,20 ; 0,24.
a <sub>p</sub> (mm)	0,15		
Vc (m/min)	180	a <sub>p</sub> (mm)	0,05 ; 0,15 ; 0,30 ; 0,45 ; 0,60 ; 0,75.
f (mm/tr)	0,08		
a <sub>p</sub> (mm)	0,15	Vc (m/min)	45 ; 90 ; 125 ; 180 ; 250 ; 350.
f (mm/tr)	0,08		

**Tableau II-8.** Conditions de coupe pour les essais d'effort de coupe, de rugosité et de température

paramètre constat	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
a <sub>p</sub> (mm)	0,15	Vc (m/min)	120 ; 180 ; 240.
		f (mm/tr)	0,08 ; 0,12 ; 0,16.

**Tableau II-9.** Conditions de coupe pour les essais d'usure

Conditions de coupe	Vc (m/min)	f (mm/tr)	a <sub>p</sub> (mm)
	120 ; 180 ; 240.	0,08 ; 0,12 ; 0,16.	0,15 ; 0,30 ; 0,45.

**Tableau II-10.** Conditions de coupe de matrice de planification pour un plan 3<sup>3</sup>

## II. 5 Conclusion

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

# Introduction

Étude bibliographique sur la coupe des métaux

Procédures expérimentales

## **Résultats des essais d'usinage**

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

Traitement et analyse des résultats

### III.1. Introduction

Les essais effectués sur l'acier X38CrMoV5-1, traité à 50HRC, usiné par un outil en CBN (7020) nous ont permis d'étudier l'évolution des efforts et des pressions de coupe, la rugosité des éprouvettes usinées et la température dans la zone de coupe en fonction des trois paramètres principaux de coupe qui sont  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ . L'ensemble des résultats obtenus permettra de borner ces 3 paramètres.

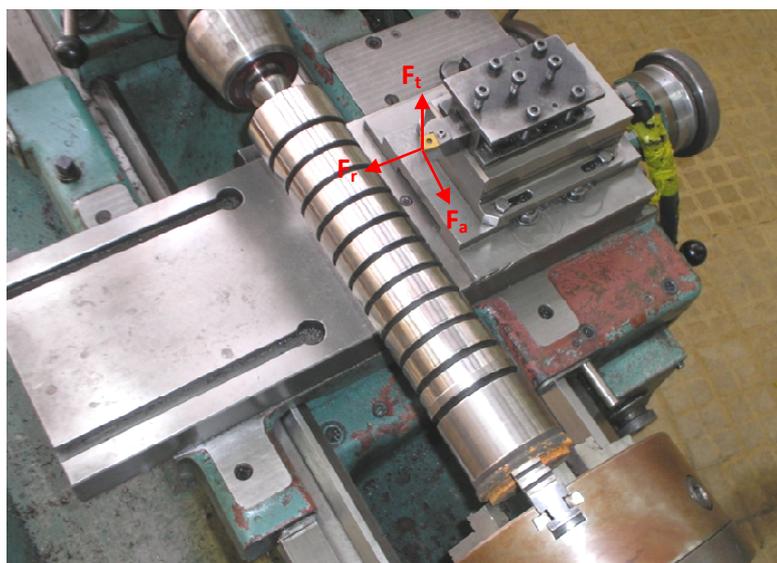
### III.2. Evolution des efforts de coupe et de la pression spécifique

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, effort radial et effort axial ramené à la section du copeau non déformé, a été déterminée en utilisant l'équation suivante :

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

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

#### Effort de coupe résultant



**Figure III-1.** 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-1).

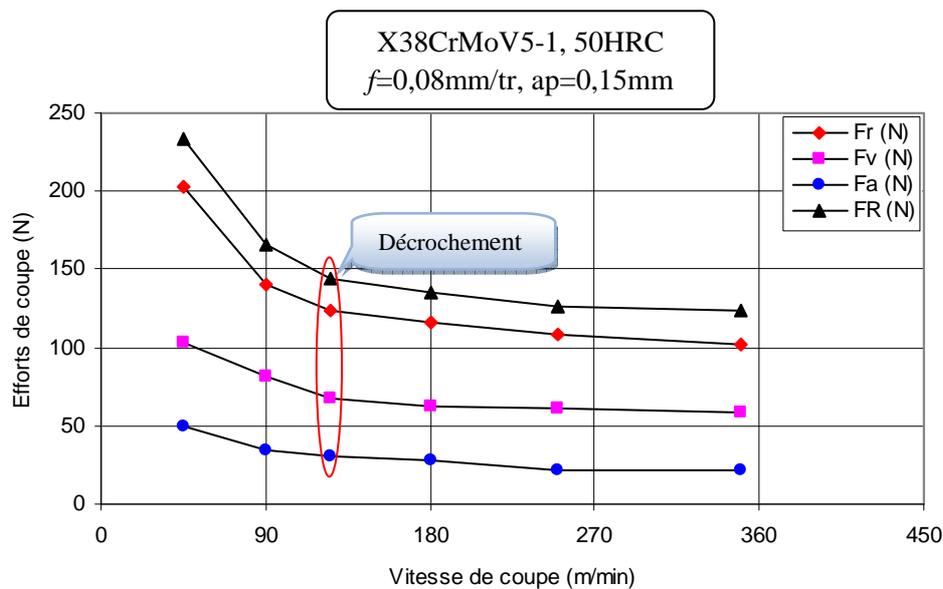
La résultante de coupe  $F_R$ , peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes :

$$F_R = \sqrt{F_f^2 + F_v^2 + F_a^2} \quad \text{III-2}$$

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.2.1. Variation de la vitesse de coupe

#### III.2.1.1. Effort de coupe



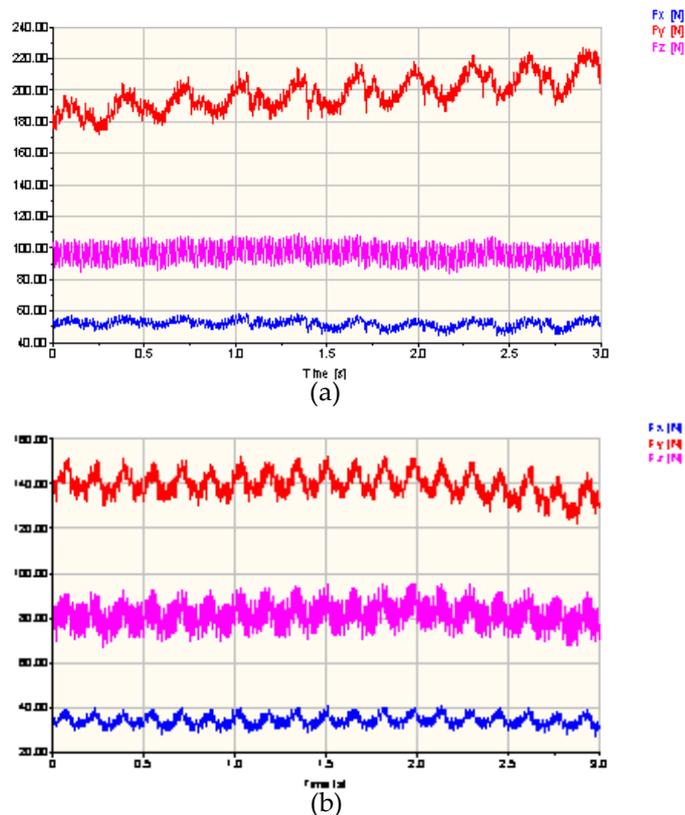
**Figure III-2.** Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de la vitesse de coupe

La figure III-2 montre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts présentent une décroissance lorsque la vitesse de coupe augmente avec des pentes différentes, ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui rend le métal usiné plus plastique et par conséquent les efforts nécessaires à la coupe diminuent. Ce constat n'est pas propre à l'usinage de matériaux durs, c'est ce qui est appelé l'effet grande vitesse.

En examinant l'allure des courbes, on enregistre une décroissance très nette de l'effort radial jusqu'à la vitesse de 125m/min, par contre les efforts tangentiel et axial diminuent légèrement moins, au-delà de cette limite, les efforts ( $F_r$ ,  $F_v$  et  $F_a$ ) se stabilisent légèrement. En effet, une élévation de la vitesse de coupe de 45 à 125m/min, conduit à une diminution des trois composantes de l'effort ( $F_r$ ,  $F_v$  et  $F_a$ ) respectivement de (39% ; 34,20% et 38%). Alors qu'une augmentation de la vitesse de 125 à 350m/min, conduit à une diminution de (18% ; 14,25% et 30,5%). Les résultats du tournage du X38CrMoV5-1 à l'état trempé, montrent que l'effort radial ( $F_r$ ) est prépondérant par rapport aux deux autres efforts ( $F_v$  et  $F_a$ ). Avec une profondeur de passe 0,15mm l'effort principal en tournage dur est l'effort radial. 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  $\gamma = -6^\circ$ .

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

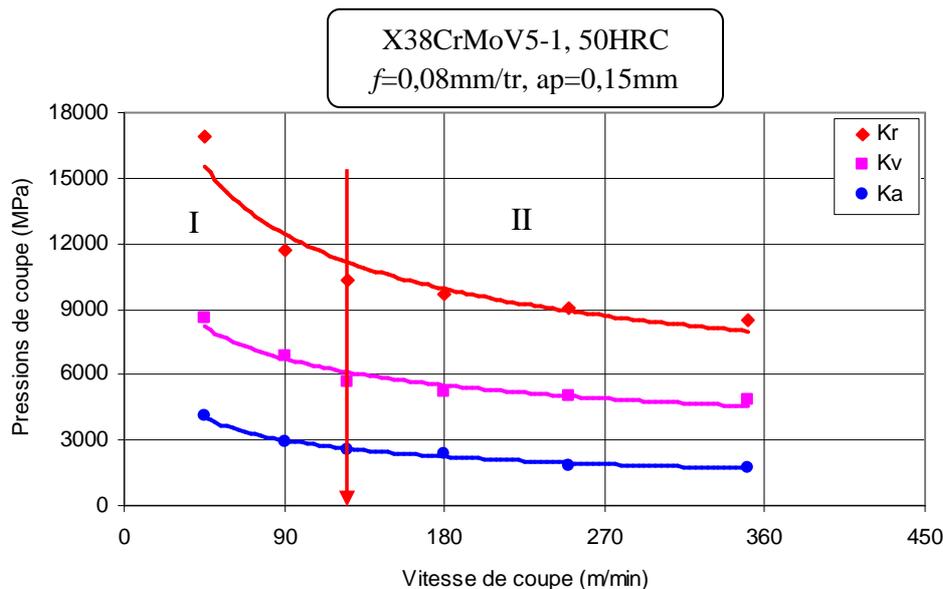
Les deux profils des trois composantes de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe sont représentés dans la figure III-3



**Figure III-3.** Profils des composantes des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe  
 (a)  $f=0,08\text{mm/tr}$ ,  $a_p=0,15\text{mm}$  et  $V_c=45\text{m/min}$  (b)  $V_c=90\text{m/min}$

### III.2.1.2. Pression de coupe

La courbe de tendance passant au mieux du nuage de points présente une décroissance des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe. On peut remarquer sur cette figure que les pressions de coupe diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Il faut bien noter les valeurs extrêmes des pressions que peut subir la pointe de l'outil CBN lorsque les vitesses de coupe sont faibles. Pour une vitesse de coupe de 45m/min, les pressions ( $K_r$  ;  $K_v$  et  $K_a$ ) ont pour valeurs (16929,17 ; 8607,50 et 4127,50) MPa.



**Figure III-4.** Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse de coupe

Les pressions de coupe passent de (16929,17 ; 8607,50 et 4127,50) MPa à (8480,84 ; 4856,67 et 1780) MPa lorsque la vitesse de coupe passe de 45m/min à 350m/min. Cette réduction peut s'expliquer par les hautes températures générées pendant la coupe, à l'interface pièce-outil-copeau, qui à leur tour entraînent un adoucissement plastique important du matériau usiné et ainsi une diminution des efforts de coupe et de la pression spécifique, nous soutiendrons l'explication donnée par Poulachon [2] concernant la dominance du caractère visqueux due aux très hautes températures atteintes dans la zone de coupe pour ces hautes vitesses de coupe.

Sur la graphie de la figure III-4, on constat deux zones.

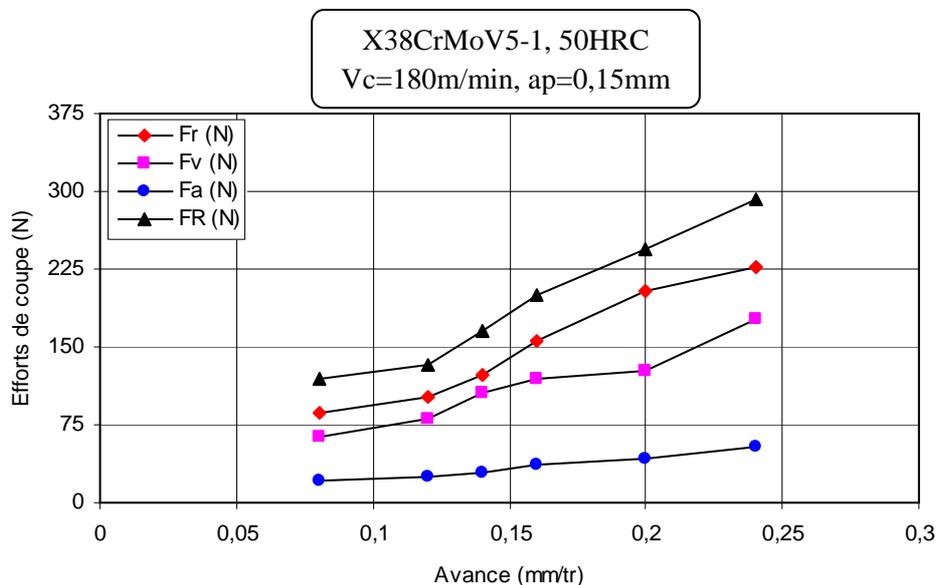
La première zone décroissante qui correspond à la vitesse de coupe 45m/min, les valeurs maximales des pressions de coupe ( $K_r$  ;  $K_v$  et  $K_a$ ) sont de l'ordre de (16929,17 ; 8607,50 et 4127,50) MPa. La fin de cette zone conduit à la détermination de la vitesse minimale de domaine d'utilisation du couple outil-matière.

La deuxième zone se caractérise par un intervalle où les pressions se stabilisent, le décrochage s'effectue à partir de  $V_c = 125\text{m/min}$ .

### III.2.2. Variation de l'avance

#### III.2.2.1. Effort de coupe

Les résultats présentés sur la figure III-5 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) et tangentiel (effort de coupe). 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. La composante de pénétration présente une croissance avec pente proche de celle de  $F_v$  et différente de  $F_a$ . Cette dernière est très inférieure aux deux autres valeurs et cela pour toutes les avances testées.

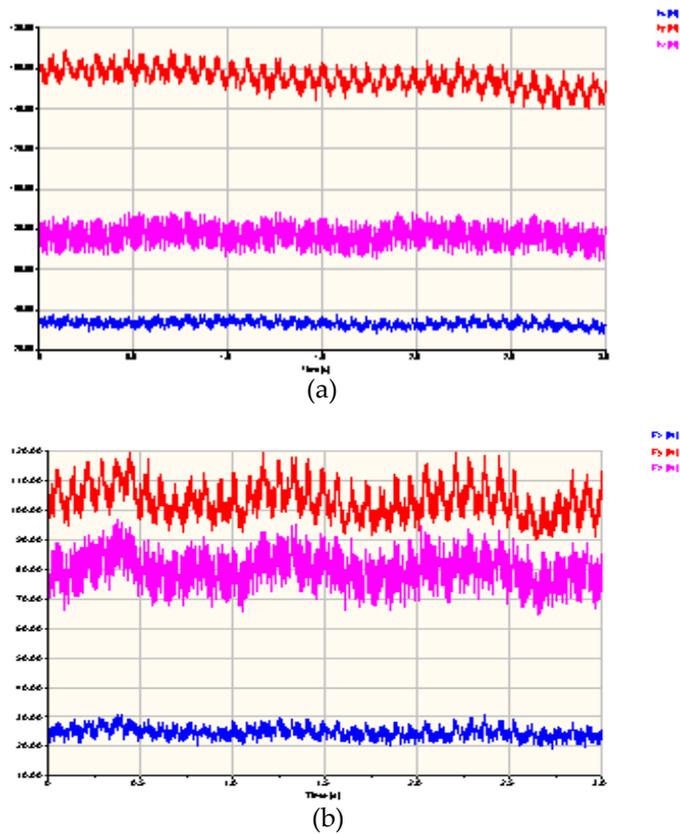


**Figure III-5.** Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de l'avance

Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de l'avance sur les efforts de coupe sont comme suit : L'augmentation de l'avance de  $0,08$  à  $0,24\text{mm/tr}$  accroît les composantes de l'effort de coupe ( $F_r$ ,  $F_v$  et  $F_a$ ) successivement de (159,08% ; 178,87% et 149,53%).

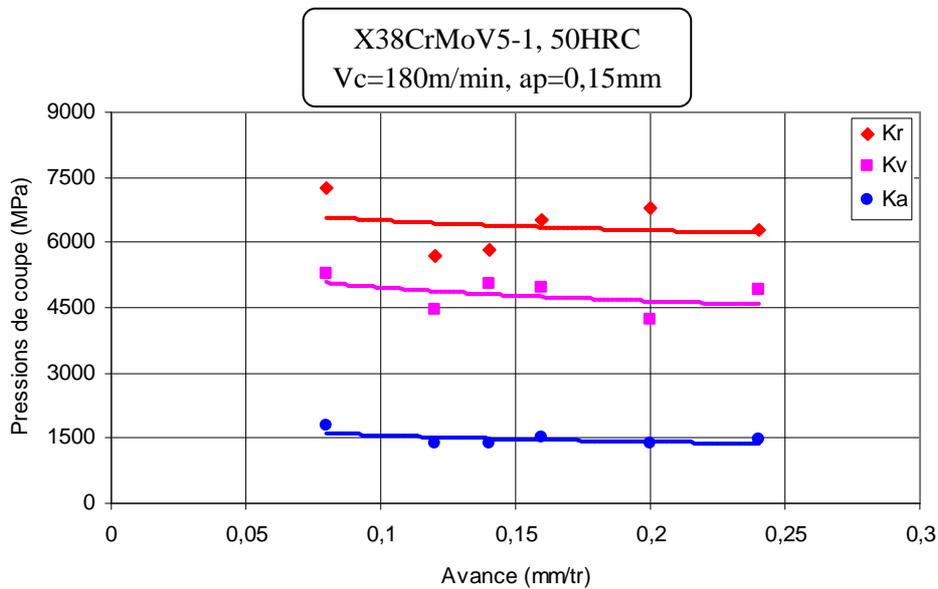
Les résultats de l'influence de l'avance sur l'effort résultant, montrent une augmentation de ce dernier avec l'augmentation de l'avance. Les conséquences sur le plan pratique sont comme suit : l'augmentation de l'avance de  $0,08$  à  $0,24\text{mm/tr}$ , accroît l'effort de coupe résultant de 146%.

Les deux profils des trois composantes de l'effort de coupe en fonction de l'avance sont représentés dans la figure III-6



**Figure III-6.** Profils des composantes des efforts de coupe en fonction de l'avance  
 (a)  $V_c=180\text{m/min}$ ,  $a_p=0,15\text{mm}$  et  $f=0,08\text{mm/tr}$  (b)  $f=0,12\text{mm/tr}$

### III.2.2.2. Pression de coupe



**Figure III-7.** Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance

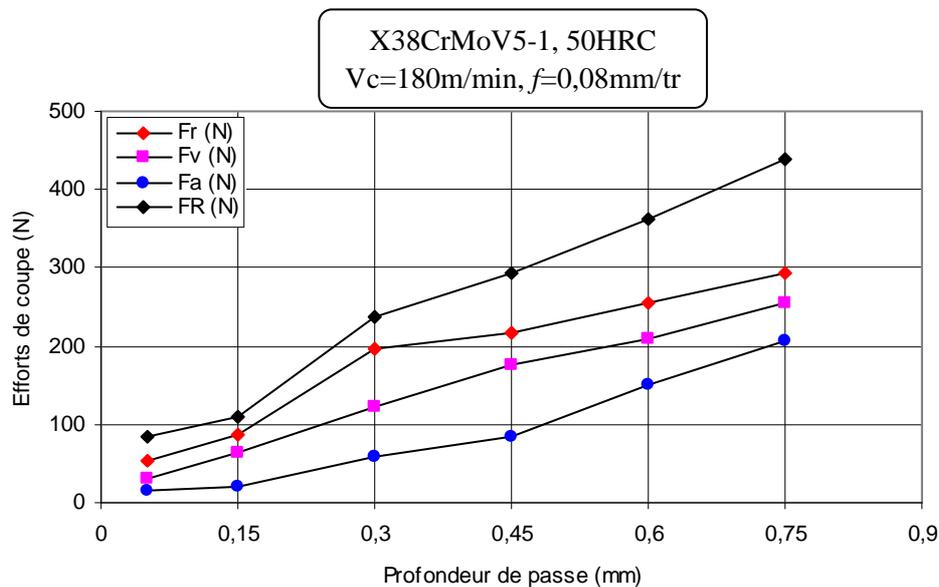
La figure III-7 montre l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance. On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance, les pressions de coupe diminuent. Pour une

avance de 0,08mm/tr, la pression exercée sur la pointe de l'outil est importante. Les pressions de coupe ( $K_r$  ;  $K_v$  et  $K_a$ ) sont de l'ordre de (7591,67 ; 5940 et 2150,83) MPa. Une diminution de (17,21% ; 17,65% et 31,35%) est observée lorsque  $f$  passe de 0,08mm/tr à 0,24mm/tr. La pression de coupe est faible pour l'avance la plus enlevée, l'usinage semble alors meilleur dans ces conditions. Par contre, le choix de faibles valeurs d'avance est souvent pris par erreur pour obtenir de bons états de surface ( $R_t = \frac{f^2}{8r_\epsilon}$ ), alors que la coupe se passe dans de très mauvaises conditions.

### III.2.3. Variation de la profondeur de passe

#### III.2.3.1. Effort de coupe

La figure III-8 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'augmentation de la profondeur de passe. D'un autre côté avec l'élévation de la profondeur de passe, les conditions de coupe deviennent sévères car la section du copeau augmente ce qui conduit à l'augmentation de la quantité de matière à enlever qui nécessite d'énormes efforts de coupe.



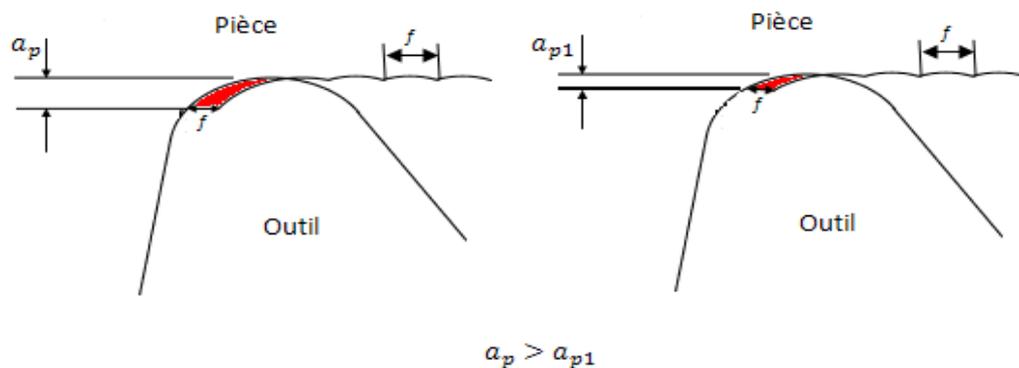
**Figure III-8.** Evolution des efforts de coupe et de l'effort résultant en fonction de la profondeur de passe

Pour les valeurs de profondeur de passe de (0,05 à 0,75) mm, on enregistre une augmentation des composantes de l'effort de coupe ( $F_r$ ,  $F_v$  et  $F_a$ ) successivement de (159% ; 187,13% et 149,53%). D'après ces résultats c'est l'effort axial qui est le plus sensible à

l'augmentation de la profondeur de passe, suivi de l'effort tangentiel et en dernier lieu de l'effort radial.

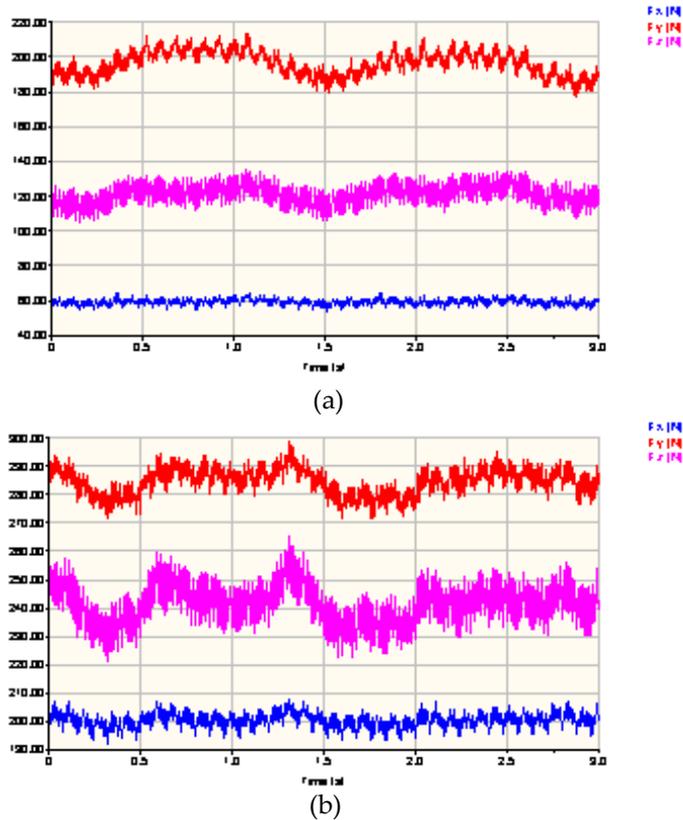
L'analyse des résultats montre une croissance de l'effort résultant avec l'augmentation de la profondeur de passe. A la profondeur de passe de 0,05mm l'effort résultant est de 84,55N, mais pour  $a_p = 0,75\text{mm}$  l'effort égal 440N, soit une augmentation de 420,40%.

Pour expliquer cette disproportion entre l'effort axial (effort d'avance) et l'effort radial (effort de pénétration), Poulachon [2] montre que plus la profondeur de passe est importante, plus le copeau se forme loin de la pointe de l'outil (figure III-9). Or plus on s'en éloigne, plus la pression entre la pièce et l'outil se décompose suivant la direction des avances.



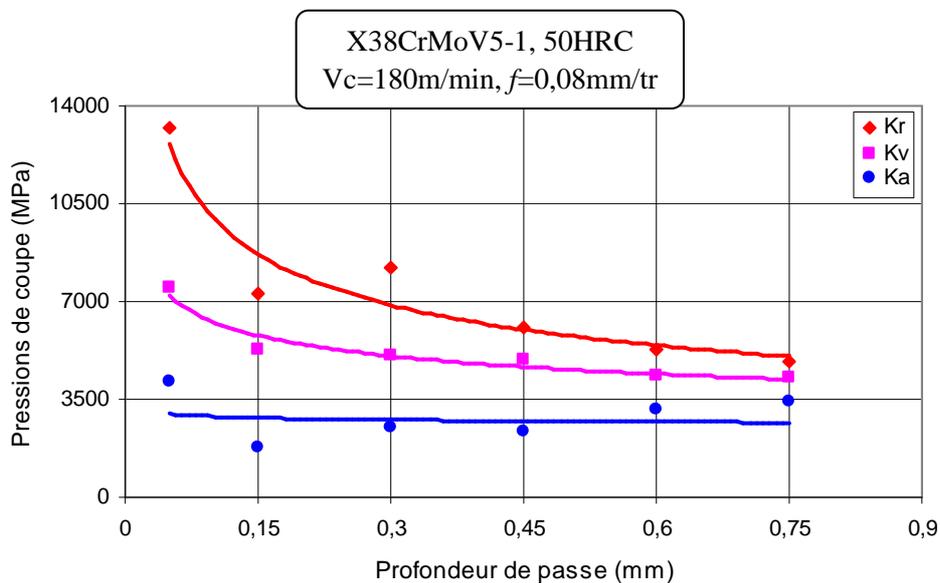
**Figure III-9.** Section du copeau à deux profondeurs de passes différentes

Les deux profils des trois composantes de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe sont représentés dans la figure III-10



**Figure III-10.** Profils des composantes des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe (a)  $V_c=180\text{m/min}$ ,  $f=0,08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0,30\text{mm}$  (b)  $a_p=0,75\text{mm}$

### III.2.3.2. Pression de coupe



**Figure III-11.** Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe

L'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe et présentée à la figure III-11. Une diminution de (63% ; 43,50% et 17%) de (Kr ; Kv et Ka) est observée

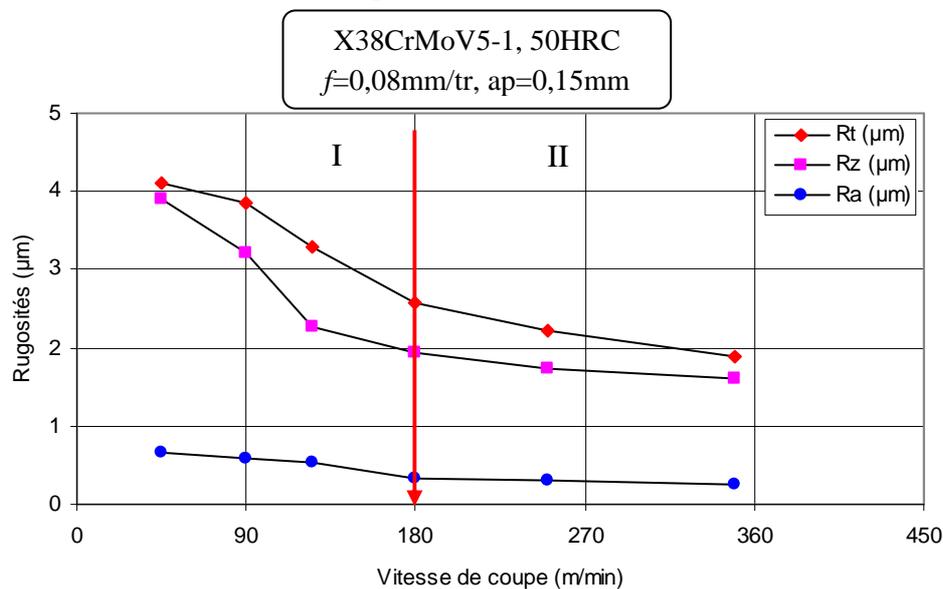
lorsque la  $a_p$  passe de 0,05 à 0,75mm. Vers les très faibles profondeurs de passe, les pressions de coupe deviennent extrêmes et rendent la coupe très difficile. D'après les valeurs des pressions, il est fortement déconseillé de travailler aux très faibles profondeurs de passe (~13,22GPa pour  $a_p = 0,05\text{mm}$ ). D'un autre côté, avec l'élévation de  $a_p$ , les conditions de coupe deviennent sévères avec l'augmentation de la section du copeau (figure III-8).

On remarque que l'augmentation de la profondeur de passe conduit à une chute des pressions de coupe et cela en deux périodes d'évolution différentes. La première période ( $a_p = 0,15\text{mm}$ ), décroissante correspond à un chargement énorme de l'arête de coupe. Les pressions enregistrées sont très élevées dans cette zone, à titre d'exemple, pour une profondeur de 0,05mm, on enregistre des pressions ( $K_r$  ;  $K_v$  et  $K_a$ ) de l'ordre de (13,22 ; 7,53 et 4,14) GPa. La deuxième zone est caractérisée par une stabilité des pressions de coupe.

### III.3. Evolution de la rugosité de surface de l'acier X38CrMoV5-1

La caractérisation de la qualité de surface usinée a été limitée aux critères de rugosité totale ( $R_t$ ), moyenne arithmétique ( $R_a$ ) et moyenne des hauteurs des irrégularités ( $R_z$ ).

#### III.3.1. Variation de la vitesse de coupe

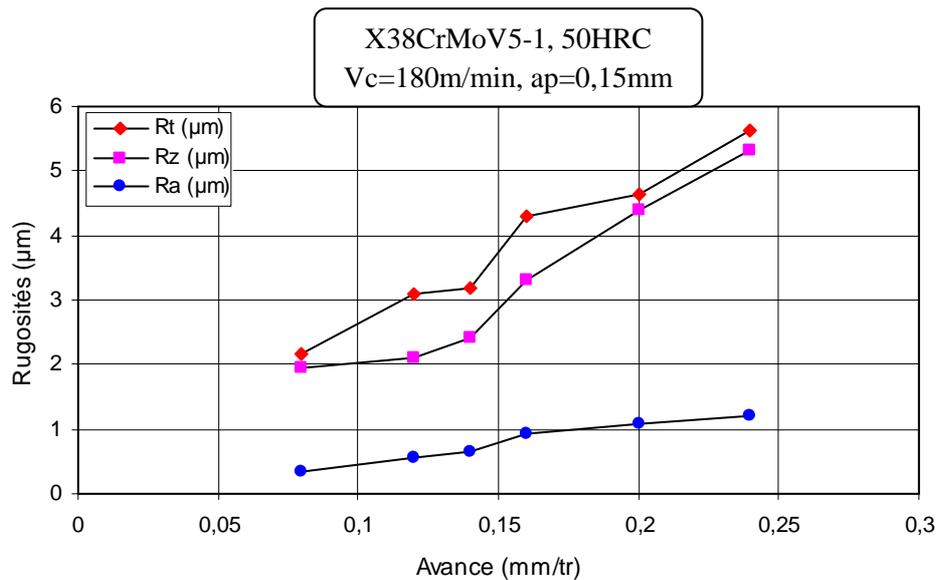


**Figure III-12.** Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe

La figure III-12 montre l'évolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe. Les trois courbes de la rugosité présentent une décroissance lorsque  $V_c$  augmente lors de la coupe d'un acier frottement allié travaillant à chaud durci à 50HRC, des essais ont été effectués en chariotage tout en gardant l'avance et la profondeur de passe constantes. Cette courbe montre qu'à des vitesses de coupe inférieures à 180m/min (zone I) les critères de

rugosité (Rt, Rz et Ra) chutent successivement de (37,73% ; 50,25% et 48,50%). Dans la deuxième zone, la rugosité se stabilise légèrement à cause de la diminution des efforts de coupe traduisant une stabilité relative du système usinant. Wuyi [9] explique cette stabilité qui revient à la faible déformation de la pièce pour des vitesses plus élevées (ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui rend le métal usiné plus plastique et par conséquent les efforts nécessaires à la coupe diminuent).

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



**Figure III-13.** Evolution de la rugosité en fonction de l'avance

La figure III-13 illustre les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction de l'avance. L'analyse des courbes montre que ce paramètre a une influence très significative, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux résultant 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 on constate que les rugosités (Rt, Rz et Ra) sont minimales pour la plus faible avance. Mais elles augmentent avec l'élévation de celle-ci. On note une augmentation d'environ 159% de Rt, et 173,71% pour Rz et 197% pour Ra lorsque la valeur de l'avance passe de 0,08 à 0,24mm/tr.

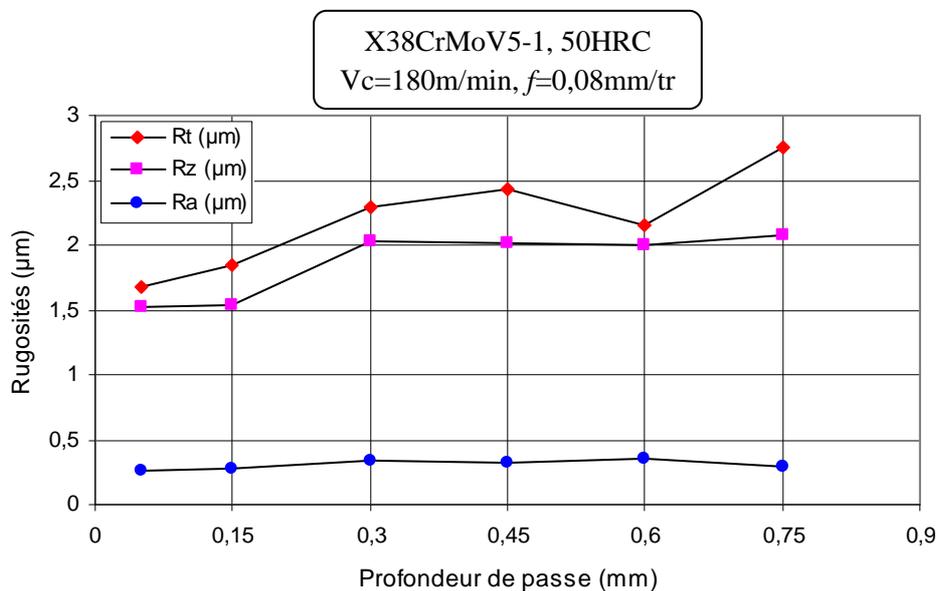
Dans la littérature les chercheurs Habak [1] et Rmadna [18] montrent que les équations  $R_a = \frac{f^2}{32 \times r_\epsilon}$  et  $R_t = \frac{f^2}{8 \times r_\epsilon}$  ne sont pas applicables à l'usinage dur. Ceci est démontré à travers les résultats présentés dans le tableau III-1. Les résultats expérimentaux sont soit inférieurs, soit supérieurs aux valeurs calculées. On peut conclure qu'en usinage dur, la valeur de la

rugosité dépend de plusieurs paramètres : la géométrie de l'outil (angle d'attaque, angle de direction....), le procédé d'usinage, la dureté de la pièce.....

Vc= 180m/min ap= 0,15mm 50HRC r <sub>e</sub> = 0,8mm	f (mm/tr)	Rugosités mesurées		Rugosités calculées	
		Rt (μm)	Ra (μm)	Rt (μm)	Ra (μm)
	0,08	2,17	0,34	1	0,25
	0,16	4,30	0,93	4	1
	0,24	5,62	1,01	9	2,25

**Tableau III-1.** Comparaison entre les rugosités mesurées et calculées

### III.3.3. Variation de la profondeur de passe



**Figure III-14.** Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe

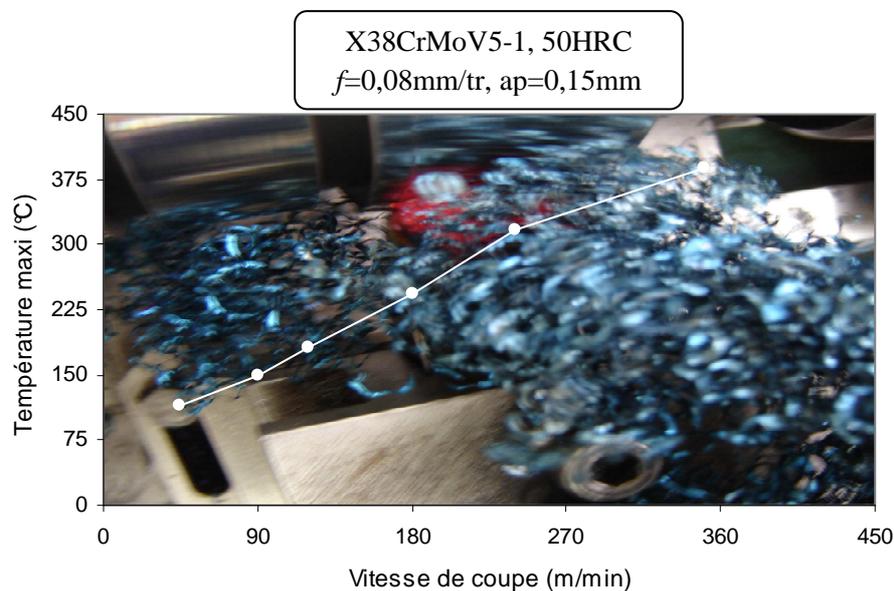
La figure III-14 montre l'évolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe. Les trois courbes de la rugosité montrent que ce paramètre a un effet très faible par rapport à celui de l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce. Celle-ci améliore 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 profondeur de passe 0,05 à 0,75mm, on enregistre une augmentation de (Rt et Rz) respectivement de (64,67% et 35,30%). Par contre la rugosité (Ra) reste stable (11,53%). Ce constat nous permet, si on veut augmenter le débit de copeau, de recommander l'augmentation de la profondeur de passe au lieu de l'avance [8].

### III.4. Evolution de la température dans la zone de coupe

La détermination de la température de coupe est faite à l'aide de pyromètre à infrarouge (Raynger 3I). Les résultats de l'évolution de la température dans la zone de coupe en fonction des paramètres de coupe sont comme suit :

#### III.4.1. Variation de la vitesse de coupe

La figure III-15 présente l'évolution de la température dans la zone de coupe. Avec l'accroissement de la vitesse de coupe, les frottements augmentent, ce qui induit une augmentation de la température dans la zone de coupe. On constate que pour une vitesse de 45m/min, la température maximale est 114°C.



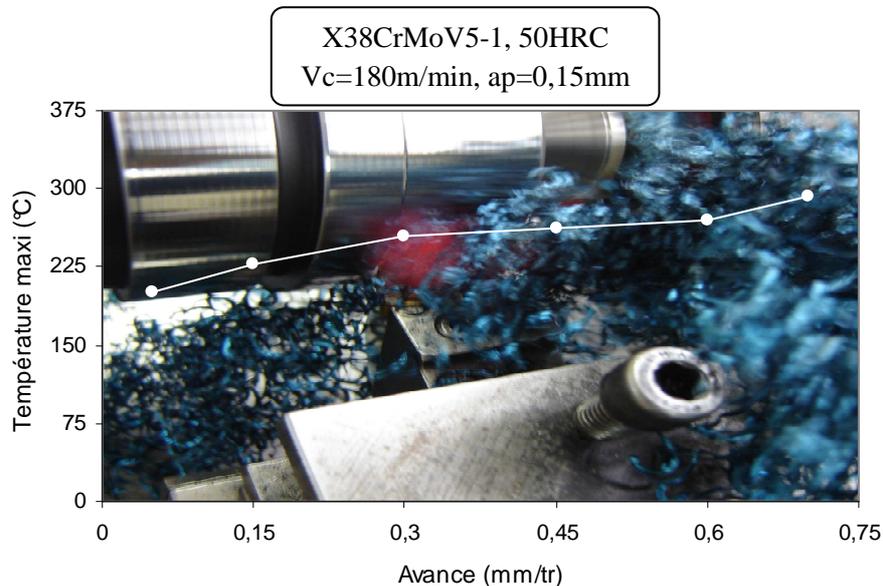
**Figure III-15.** Evolution de la température maximale en fonction de la vitesse de coupe (pour  $t=25\text{s}$ )

Pour une variation de la vitesse de coupe de (45 à 335) m/min, on enregistre une augmentation de la température dans la zone de coupe de 240,35%. L'augmentation de la vitesse de coupe conduit à une diminution des composantes de l'effort de coupe (figure III-2), donc pour déformer le copeau il faut une forte énergie, cette énergie pendant l'usinage est transformée sous forme de chaleur [36 et 37].

#### III.4.2. Variation de l'avance

La figure III-16 présente l'évolution de la température dans la zone de coupe en fonction de l'avance. Les résultats de l'influence de l'avance sur la température, montrent une augmentation de ce dernier avec l'augmentation de l'avance, puisque cette dernière accroît la

section du copeau cisailé et par conséquent le frottement augmente, ce qui entraîne une augmentation de la température.

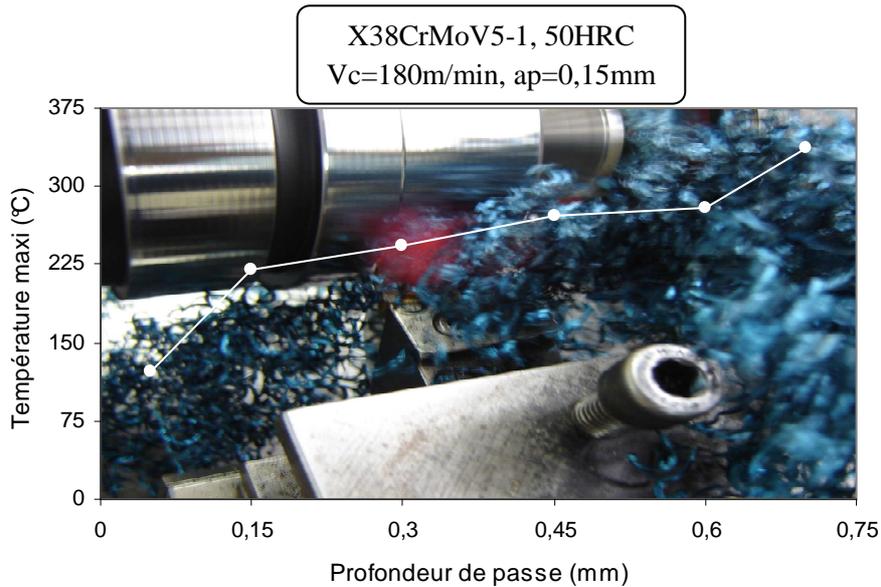


**Figure III-16.** Evolution de la température maximale en fonction de l'avance (pour  $t=25s$ )

### III.4.3. Variation de la profondeur de passe

L'évolution de la température maximale enregistrée dans la zone de coupe en fonction de la profondeur de passe présentée à la figure III-17, montre une augmentation qui vaut ~176% lorsque la profondeur de passe varie de 0,05 à 0,70mm.

- Pour une profondeur de passe de 0,05mm la température maximale enregistrée dans la zone de coupe est 122°C. Si la profondeur de passe augmente à 0,15mm, (soit 3fois), la valeur de la température maximale devient 220°C, ce qui représente une augmentation de la température de 81,96%.
- Pour la profondeur de passe de 0,45mm, (soit 9 fois), la valeur de la température maximale dans la zone de coupe atteinte 271°C, ce qui représente une augmentation de la température de 122,13%.
- Pour la profondeur de passe de 0,70mm, (soit 14 fois), la valeur de la température maximale dans la zone de coupe atteinte 337°C, ce qui représente une augmentation de la température de 176,22%, on constate, si la profondeur de passe augmente, la section du copeau augmente et la frottement copeau/ outil augmente, ce qui conduit à une augmentation de la température.



**Figure III-17.** Evolution de la température maximale en fonction de la profondeur de passe (pour  $t = 25 \text{ s}$ )

### III.5. Conclusions

Les essais d'usinage pratiqués sur l'acier **X38CrMoV5-1**; traité à 50 HRC; usiné par un outil en Nitrure de Bore Cubique (CBN7020), 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 et sur la température dans la zone de coupe. Il est à signaler que l'effort axial 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 159% de  $R_t$ , 173,71% pour  $R_z$  et 197% pour  $R_a$  lorsque la valeurs de l'avance passe pour 0,08 à 0,24mm/tr. On remarque que la vitesse de coupe affecte la température d'une manière considérable. Ainsi, les plages de conditions de coupe les mieux adaptée, ont été déterminées. 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.

# Introduction

Étude bibliographique sur la coupe des métaux

Procédures expérimentales

Résultats des essais d'usinage

## **Résultats de l'évolution de L'usure du Nitrure de Bore Cubique**

- IV.1. Introduction
- IV.2. Usure des outils en nitrure de bore cubique
- IV.3. Evaluation des durées de vie
- IV.4. Analyse des efforts coupe en fonction du temps d'usinage et VB
- IV.5. Analyse de la rugosité en fonction du temps d'usinage et l'usure VB
- IV.6. Conclusions

Traitement et analyse des résultats

## IV.1. Introduction

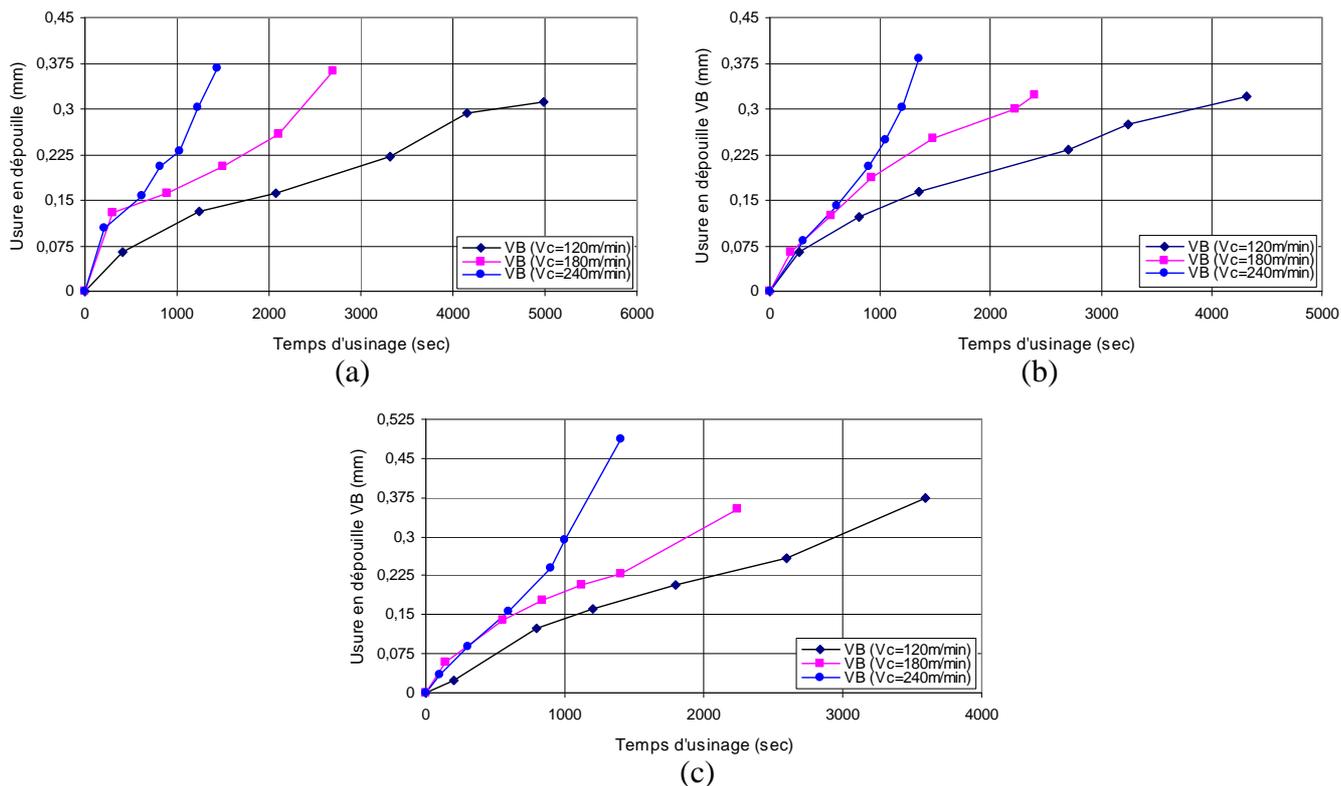
La connaissance des mécanismes d'usure est un aspect très important de la coupe des métaux car l'usure des outils participe pour une grande part dans le coût des opérations d'usinage. Le changement de la géométrie des outils modifie les conditions de coupe et par conséquent influe sur la qualité de l'usinage.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

## IV.2. Usure des outils en nitrure de bore cubique (CBN)

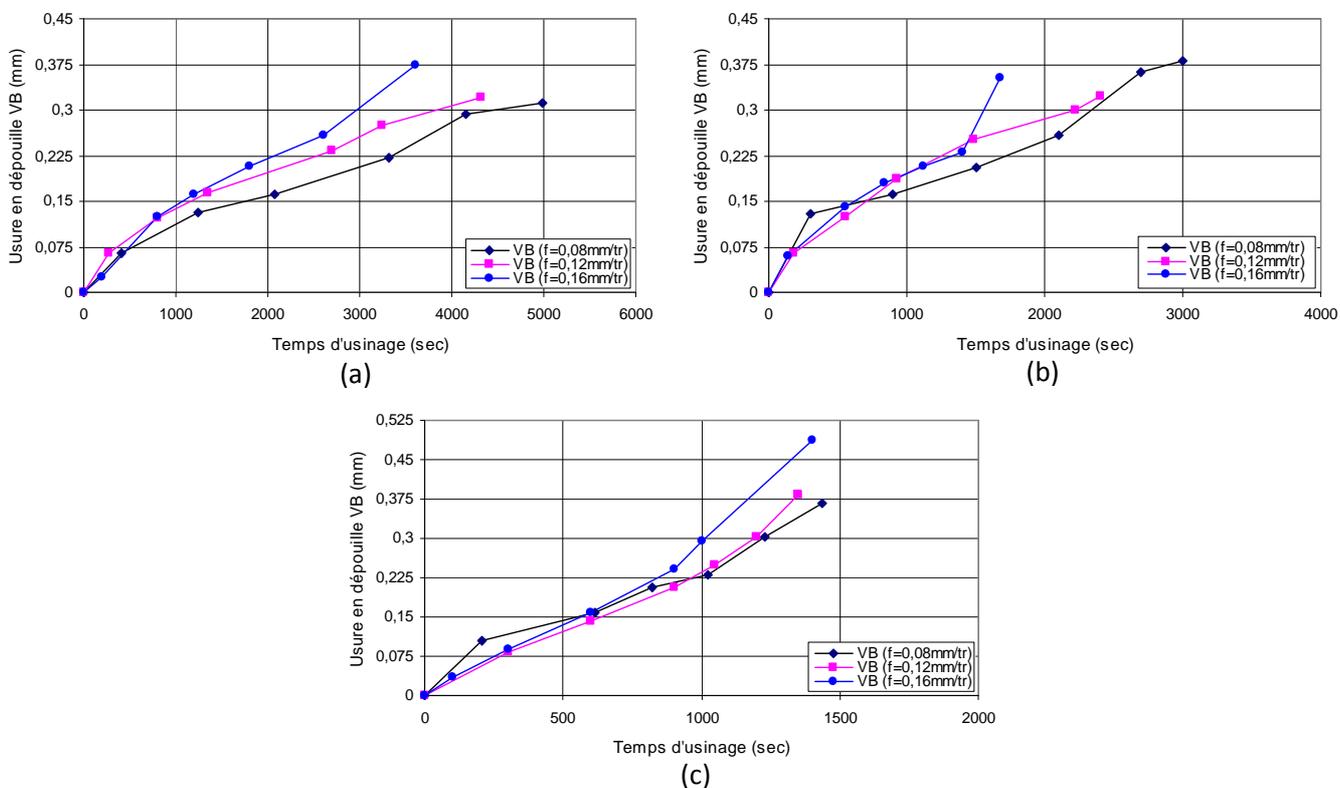
Lors du tournage dur, l'arête rapportée n'est pas observée en raison des températures de coupe élevées et de l'absence de ductilité au matériau de la pièce. Le haut pouvoir abrasif des phases dures du copeau à haute température de coupe entraîne une usure rapide de l'outil. La dépouille usée (émoussement de l'arête de coupe) augmente les forces de coupe et particulièrement l'effort de poussée, provoquant une usure supplémentaire en dépouille. L'usure en cratère apparaît beaucoup plus tôt lorsque les vitesses de coupe augmentent car la température de coupe croît, favorisant ainsi le mode d'usure par diffusion. Les profils d'usure sont très typiques. On observe une 1<sup>ère</sup> zone de rodage de l'arête avec uniquement l'usure en dépouille qui évolue rapidement (figure IV-4). Par la suite, l'usure en dépouille se stabilise légèrement, et c'est l'usure en cratère qui est observée sur le chanfrein d'arête. Enfin, l'usure en dépouille devient catastrophique en étant accompagnée d'un effondrement de l'arête.

Les figures IV-1 et IV-2 montrent l'évolution de l'usure en dépouille du CBN en fonction du temps d'usinage à trois vitesses et à trois avances différentes. 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 à trois vitesses (120 ; 180 et 240) m/min pour trois avances différentes (0,08 ; 0,12 et 0,16) mm/tr montre que la vitesse de coupe a une influence significative sur l'usure du matériau de coupe testé (figure IV-1). La tenue de l'outil pour  $V_c=240\text{m/min}$  et  $f=0,16\text{mm/tr}$  est de 18minutes. L'usure VB est considérablement élevée à  $V_c=240\text{m/min}$  comparée à celles obtenues pour les vitesses 120m/min et 180m/min. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par [38].

La variation de l'usure en fonction du temps d'usinage à trois avances (0,08 ; 0,12 et 0,16) mm/tr pour trois vitesses différentes (120 ; 180 et 240) m/min est représentée dans la figure IV-2.



**Figure IV-1.** Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage à trois vitesses pour : (a)  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ , (b)  $f = 0,12 \text{ mm/tr}$  et (c)  $f = 0,16 \text{ mm/tr}$



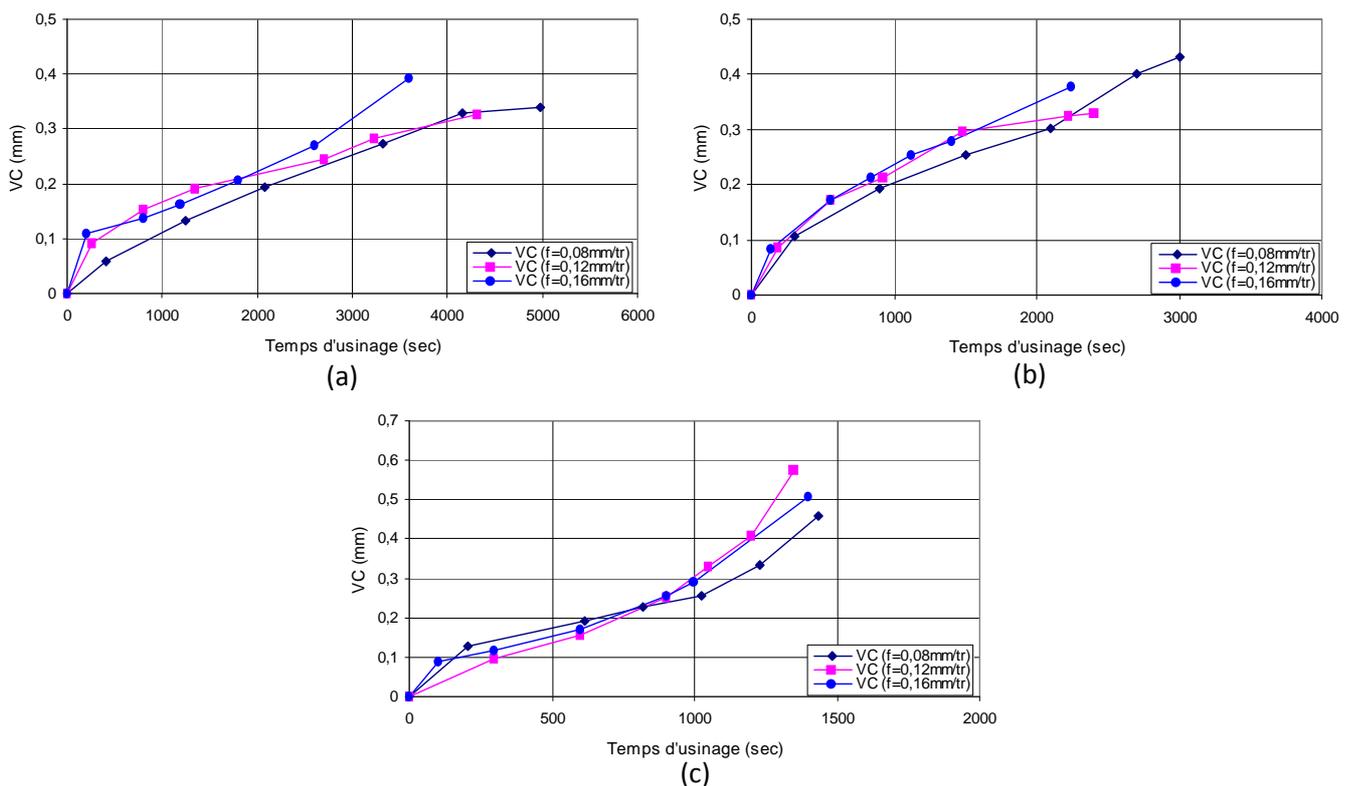
**Figure IV-2.** Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage à trois avances pour : (a)  $V_c = 120 \text{ m/min}$ , (b)  $V_c = 180 \text{ m/min}$  et (c)  $V_c = 240 \text{ m/min}$

Pour  $V_c=180\text{m/min}$  et  $f=0,08\text{mm/tr}$  et lorsque l'usure atteint la valeur de  $0,3\text{mm}$ , on enregistre une durée de vie de l'outil de  $40\text{minutes}$ . Dans les mêmes conditions de coupe et à  $f=0,16\text{mm/tr}$ , la tenue est de  $32\text{minutes}$ . On remarque que la durée de vie diminue de  $20\%$ .

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

### ➤ Usure VC

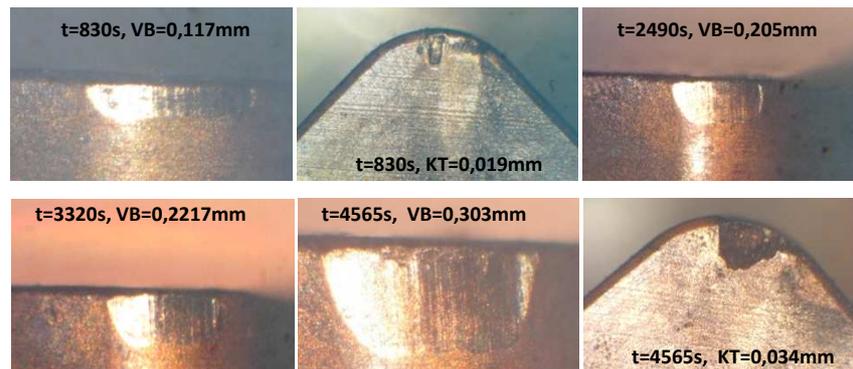
La figure IV-3 illustre l'impact du temps d'usinage sur l'usure VC de la plaquette CBN7020 à trois vitesses et à trois avances différentes. Avec l'augmentation du temps d'usinage, le frottement augmente ce qui accélère le mécanisme d'usure. A la vitesse de coupe de  $120\text{m/min}$  et pour un temps d'usinage de  $1000\text{secondes}$ , on enregistre des valeurs de ( $VC_{0,08}$  ;  $VC_{0,12}$  et  $VC_{0,16}$ ) de ( $0,11$  ;  $0,16$  et  $0,145$ ) mm. Pour les mêmes conditions de coupe et à  $V_c=240\text{m/min}$ , les valeurs de ( $VC_{0,08}$  ;  $VC_{0,12}$  et  $VC_{0,16}$ ) sont de ( $0,245$  ;  $0,3055$  et  $0,300$ ) mm, ce qui correspond à une augmentation de ( $122,720$  ;  $90,625$  et  $51,67$ ) %. Ce constat nous permet de conclure que la vitesse a un grand effet sur l'usure.



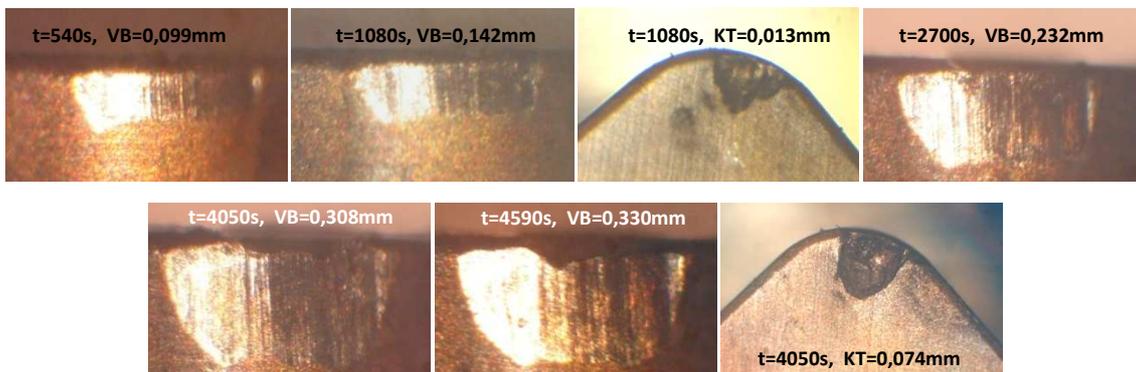
**Figure IV-3.** Evolution de l'usure VC en fonction du temps d'usinage à trois avances pour :  
 (a)  $V_c=120\text{m/min}$ , (b)  $V_c=180\text{m/min}$  et (c)  $V_c=240\text{m/min}$

Les figures (IV-4, (a) ; (b) et (c)) mettent en évidence les photos des usures en dépouille VB et en cratère KT en fonction du temps d'usinage pour une vitesse de coupe de 120m/min à trois avances différentes (0,08 ; 0,12 et 0,16) mm/tr.

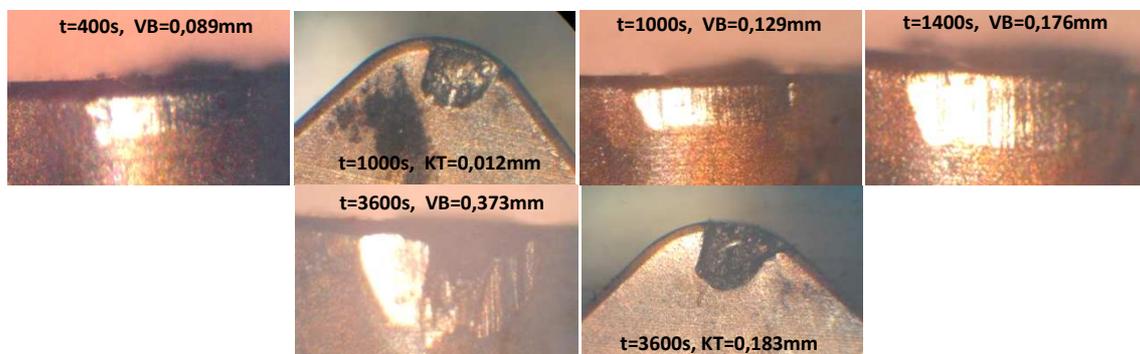
On remarque que pour  $f = 0,08$ mm/tr et pour un temps d'usinage de 4565secondes, l'usure VB est égale 0,303mm, alors que KT n'est que de 0,034mm. Il est à signaler que VB atteint sa valeur admissible tandis que KT atteint 22,67% de sa valeur admissible. L'évolution de KT est presque négligeable devant VB.



(a) :  $V_c = 120$ m/min et  $f = 0,08$ mm/tr



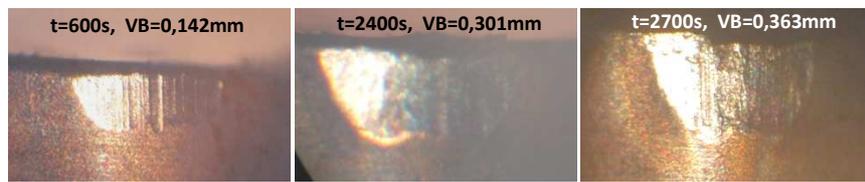
(b) :  $V_c = 120$ m/min et  $f = 0,12$ mm/tr



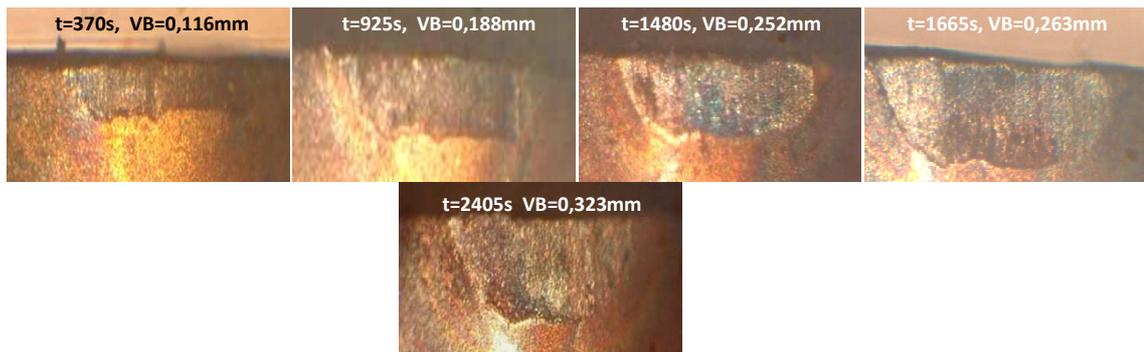
(c) :  $V_c = 120$ m/min et  $f = 0,16$ mm/tr

**Figure IV-4.** Valeurs de l'usure VB et KT en fonction du temps d'usinage à trois avances pour  $V_c = 120$ m/min

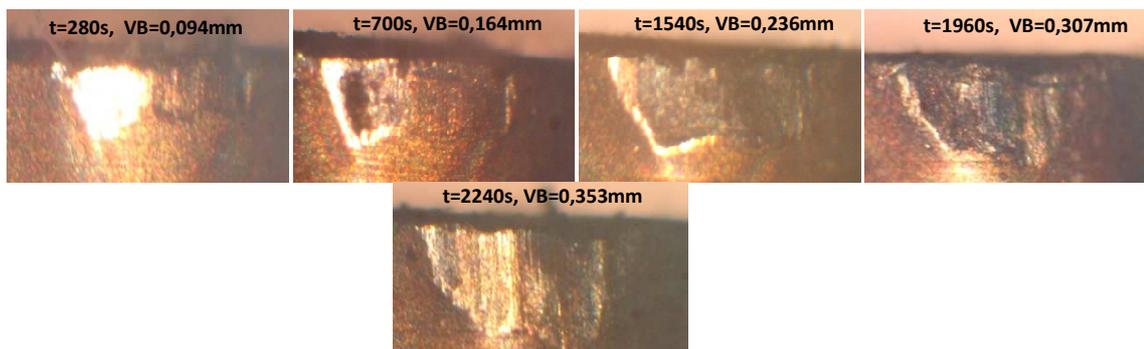
Les photos de l'usure en dépouille VB en fonction de temps d'usinage à trois avances et pour deux vitesses différentes sont présentées dans les figures (IV-5 et IV-6 (a) ; (b) et (c)).



(a) :  $V_c = 180\text{m/min}$  et  $f = 0,08\text{mm/tr}$

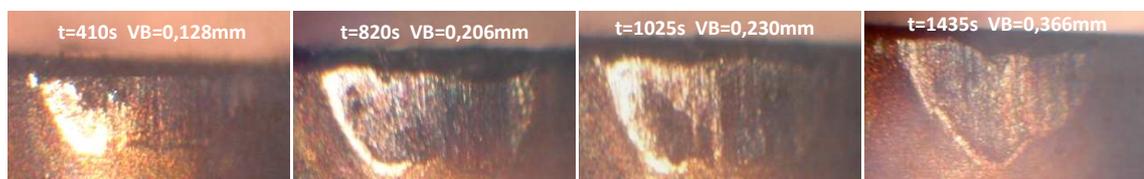


(b)  $V_c = 180\text{m/min}$  et  $f = 0,12\text{mm/tr}$

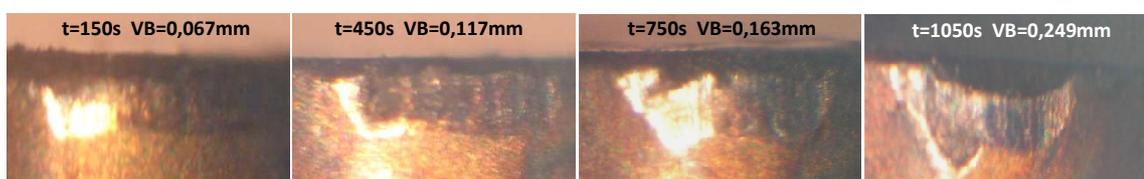


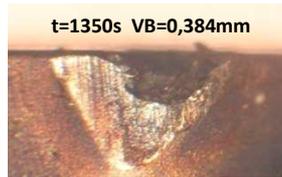
(c)  $V_c = 180\text{m/min}$  et  $f = 0,16\text{mm/tr}$

**Figure IV-5.** Valeurs de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à trois avances pour  $V_c = 180\text{m/min}$

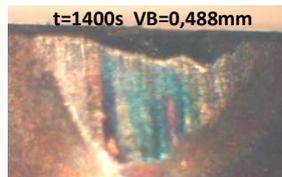
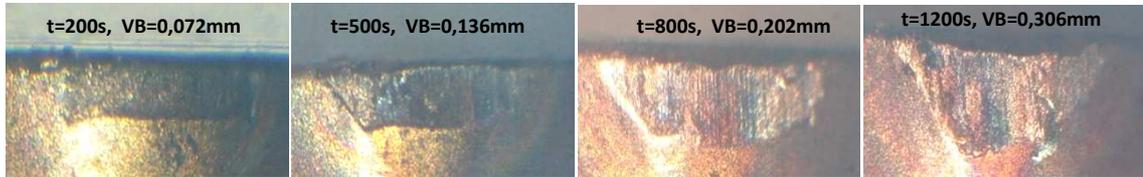


(a)  $V_c = 240\text{m/min}$  et  $f = 0,08\text{mm/tr}$





(b)  $V_c = 240\text{m/min}$  et  $f = 0,12\text{mm/tr}$



(c)  $V_c = 240\text{m/min}$  et  $f = 0,16\text{mm/tr}$

**Figure IV-6.** Valeurs de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage à trois avances pour  $V_c = 240\text{m/min}$

### IV.3. 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 définition de la durée de vie T d'un outil selon la norme ISO 3685 : « C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique » [18].

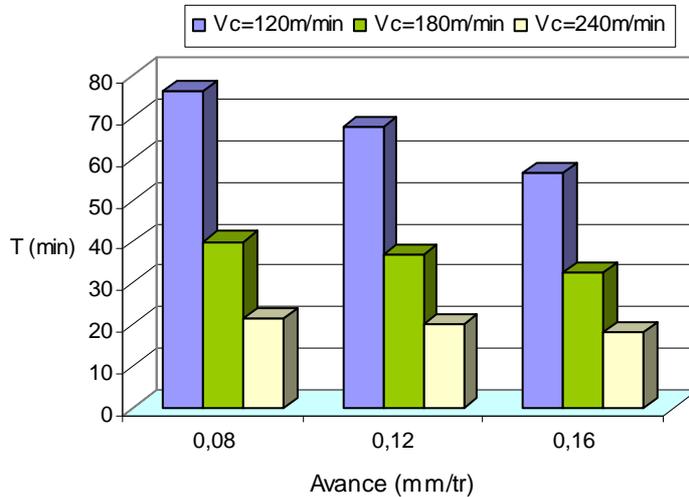
$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	Temps d'usinage (min) pour $VB = 0,30\text{mm}$
120	0,08	76,00
120	0,12	67,50
120	0,16	56,60
180	0,08	40,00
180	0,12	37,00
180	0,16	32,60
240	0,08	21,50
240	0,12	20,00
240	0,16	18,30

**Tableau IV-1.** Durées de vie pour  $VB = 0,30\text{mm}$  et  $a_p = 0,15\text{mm}$

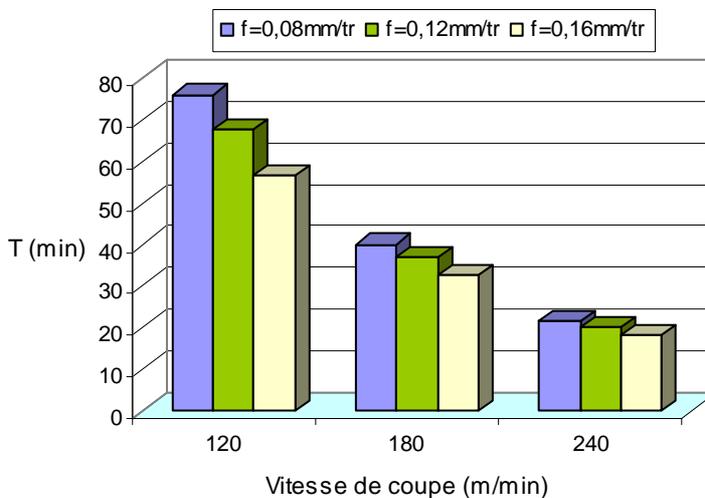
#### IV.3.1. Analyse de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe et l'avance

Les résultats obtenus sur les figures (IV-7 et 8) illustrent l'évolution de la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe à trois avances différentes (0,08 ; 0,12 et 0,16)

mm/tr et en fonction de l'avance à trois vitesses de coupe différentes (120 ; 180 et 240) m/min. D'une façon générale, la durée de vie diminue lorsque les paramètres de coupe augmentent.



**Figure IV-7.** Evolution de la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe à trois avances



**Figure IV-8.** Evolution de la durée de vie de l'outil en fonction de l'avance à trois vitesses de coupe

**a) Effet de la vitesse de coupe**

L'influence de ce paramètre est plus significative car lors des essais on a observé une diminution rapide de la durée de vie de l'outil avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Pour les valeurs de la vitesse de coupe prises de (120 à 240) m/min, on enregistre une diminution de la durée de vie de l'outil ( $T_{0,08}$  ;  $T_{0,12}$  et  $T_{0,16}$ ) successivement de (70,02% ;

70,37% et 67,59%). [8] a expliqué cette diminution par le fait que lorsqu'on travaille avec des vitesses de coupe plus élevées :

- Le système usinant devient instable en raison des grandes vibrations enregistrées lors de l'usinage.
- La température dans la zone de coupe augmente (notamment aux interfaces « copeau - surface d'attaque », et « pièce - surface de dépouille principale », ce qui favorise la manifestation des différents mécanismes d'usure de l'outil suite à la réduction de sa dureté.

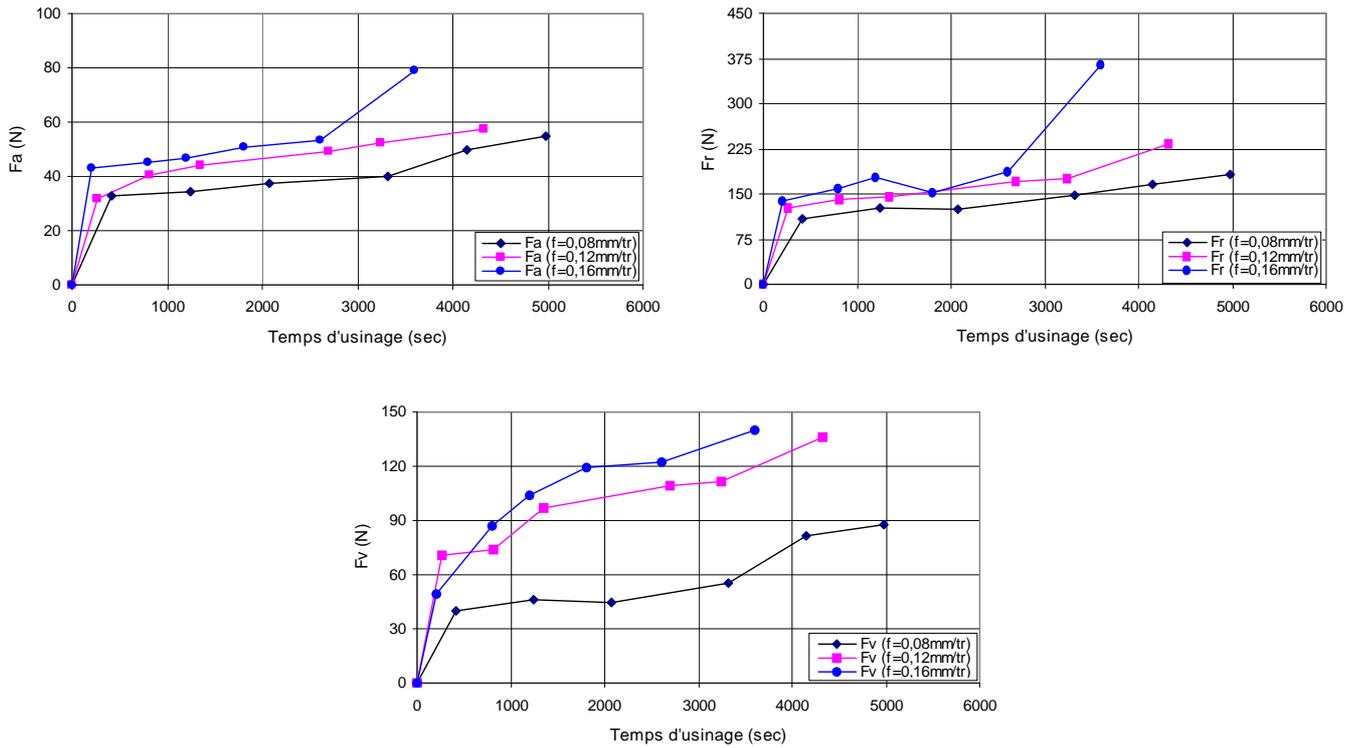
#### *b) Effet de l'avance*

De la même manière, l'influence de l'avance sur la durée de vie de l'outil est moins importante par rapport à la vitesse de coupe. Les essais réalisés ont montré une diminution de la durée de vie de l'outil avec l'augmentation de l'avance. Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de l'avance sur la durée de vie de l'outil sont comme suit : L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,16mm/tr fait chuter les durées de vie de l'outil ( $T_{120}$  ;  $T_{180}$  et  $T_{240}$ ) successivement de (25,52% ; 18,32% et 10,53%). A la  $V_c=240$ m/min, l'effet de l'avance sur la tenue est limité par rapport aux vitesses.

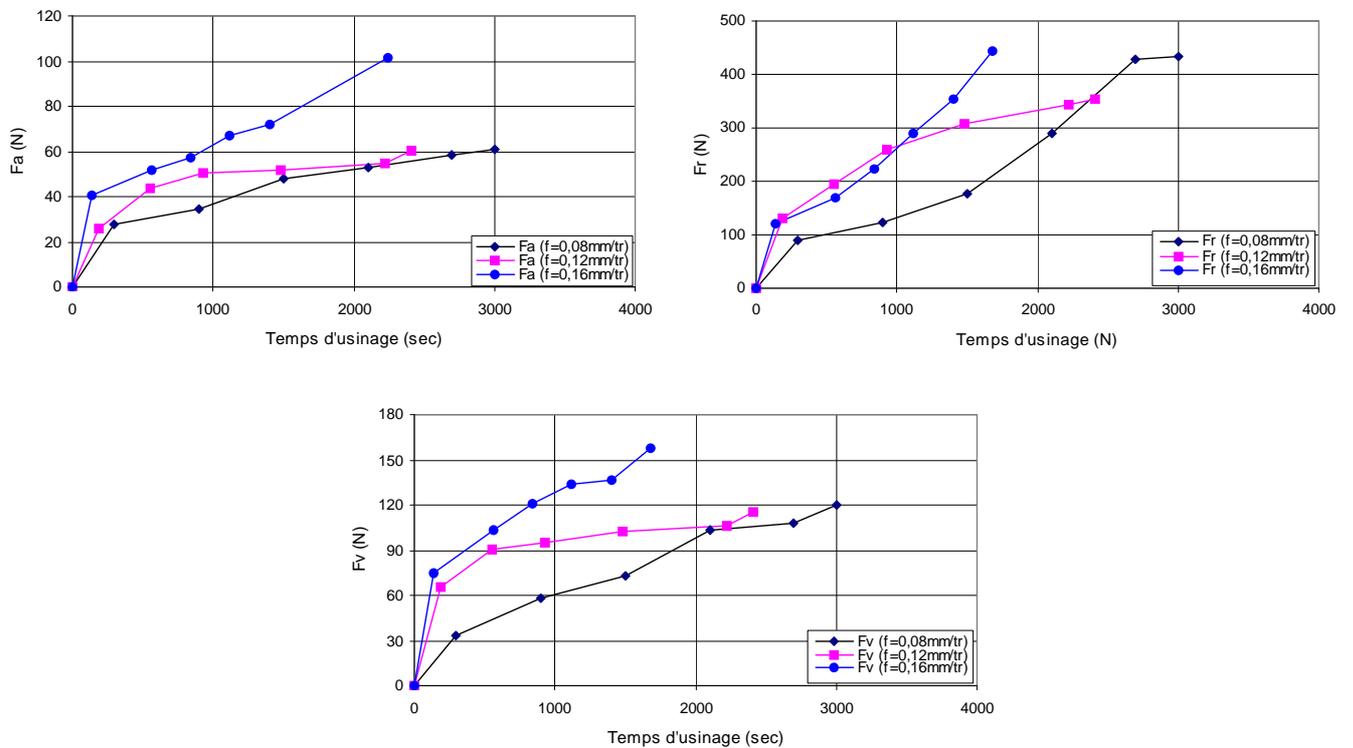
### **IV.4. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de VB**

#### **IV.4.1. Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage**

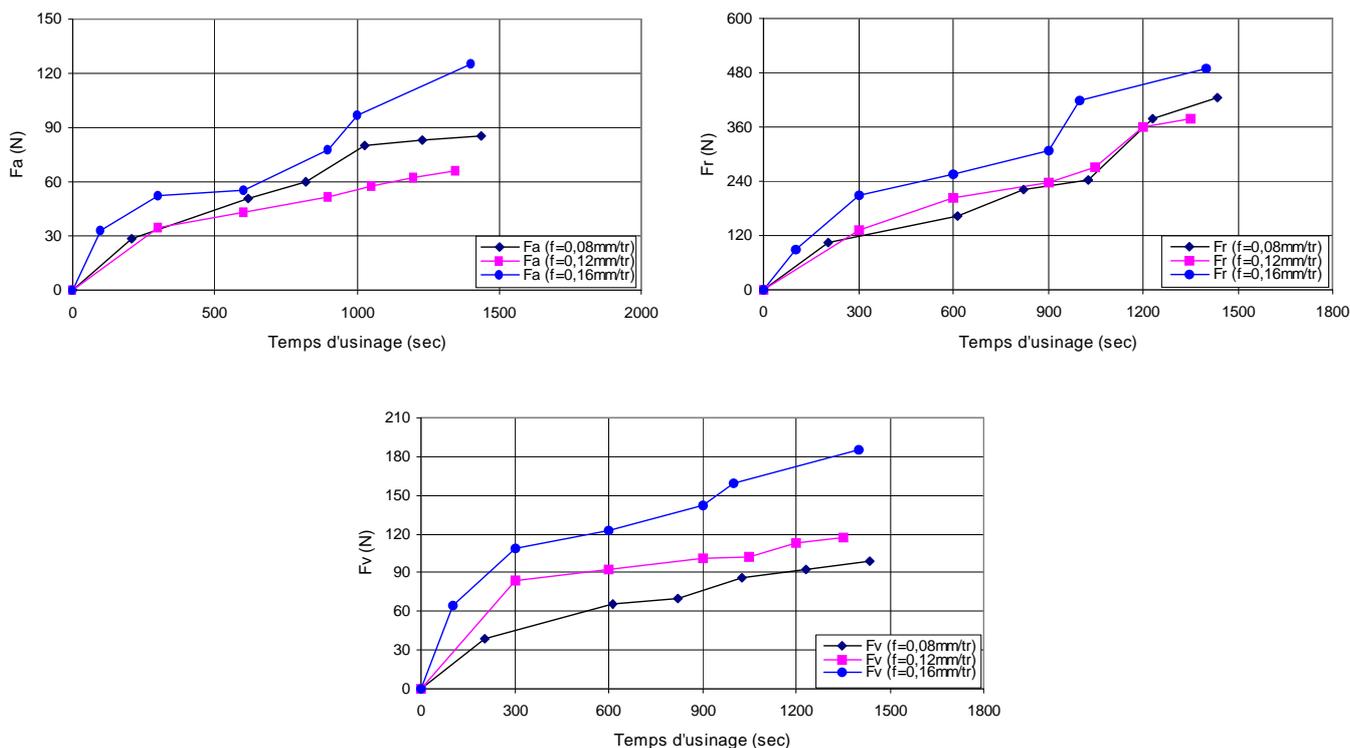
Les résultats présentés sur les figures IV-9 à IV-11 montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à trois avances (0,08 ; 0,12 et 0,16) mm/tr et pour trois vitesses différentes (120 ; 180 et 240) m/min à une profondeur de passe  $a_p=0,15$ mm. Au début de l'usinage, les efforts ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ) relatifs à  $V_c=120$ m/min sont supérieurs à ceux obtenus à  $V_c=180$ m/min et à  $V_c=240$ m/min pour les mêmes avances et les mêmes profondeurs de passe. L'analyse des résultats montre que les efforts de coupe pour des conditions sévères c à d ( $V_{c_{max}}=240$ m/min et  $f_{max}=0,16$ mm/tr), sont toujours prépondérants par rapport aux efforts obtenus pour les deux autres conditions. Pour  $V_c=120$ m/min et  $f=0,08$ mm/tr, les efforts ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ) sont respectivement (35 ; 127 et 46) N. Ces valeurs ont été enregistrées pour  $t=1200$ secondes. Pour  $V_c=240$ m/min et  $f=0,16$ mm/tr, les efforts ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ) sont respectivement (105 ; 440 et 170) N. On enregistre une augmentation des composantes de l'effort de coupe de (200% ; 246% et 269%). Cette augmentation s'explique par le frottement entre l'outil et la pièce ce qui accélère le mécanisme d'usure et par conséquent les efforts augmentent.



**Figure IV-9.** Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à trois avances pour  $V_c=120$  m/min



**Figure IV-10.** Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à trois avances pour  $V_c=180$  m/min



**Figure IV-11.** Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage à trois avances pour  $V_c=240\text{m/min}$

#### IV.4.2. Analyse des efforts de coupe en fonction de VB

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

➤ Pour  $V_c=120\text{m/min}$  :

L'analyse de la figure IV-12 montre que l'augmentation de l'usure en dépouille conduit à une augmentation des efforts de coupe et cela en trois zones d'évolutions distinctes. La première zone croissante correspond à  $VB \leq 0,075\text{mm}$ , cette zone représente la zone de rodage de l'arête de coupe. La deuxième zone se caractérise par un intervalle où les efforts de coupe se stabilisent, cette zone correspond à la zone normale de l'usure VB. La troisième zone ( $VB \geq 0,28\text{mm}$ ) où les courbes de l'effort de coupe prennent une allure ascendante à cause de l'augmentation de l'usure VB.

Pour une usure  $VB=0,0252\text{mm}$ , les efforts de coupe ( $F_{a,0,08}$  ;  $F_{a,0,12}$  et  $F_{a,0,16}$ ) enregistrés sont (12,02 ; 12,40 et 43,02) N. Pour  $VB=0,310\text{mm}$ , les efforts de coupe ( $F_{a,0,08}$  ;  $F_{a,0,12}$  et  $F_{a,0,16}$ ) sont (54,93 ; 56,67 et 63,80) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (356,98% ; 357,01% et 46,49%).

Pour une usure  $VB=0,0252\text{mm}$ , les efforts de coupe ( $F_{r,0,08}$  ;  $F_{r,0,12}$  et  $F_{r,0,16}$ ) enregistrés sont (40,91 ; 43,07 et 138,89) N. Pour  $VB=0,310\text{mm}$ , les efforts de coupe ( $F_{r,0,08}$  ;  $F_{r,0,12}$  et

$Fr_{0,16}$ ) sont (182,49 ; 225,08 et 262,50) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (346,07% ; 422,59% et 88,99%).

Pour une usure  $VB=0,0252$ mm, les efforts de coupe ( $Fv_{0,08}$  ;  $Fv_{0,12}$  et  $Fv_{0,16}$ ) enregistrés sont (13,90 ; 30,20 et 49,16) N. Pour  $VB=0,310$ mm, les efforts de coupe ( $Fv_{0,08}$  ;  $Fv_{0,12}$  et  $Fv_{0,16}$ ) sont (87,83 ; 131,02 et 131,00) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (531,87% ; 333,84% et 166,47%).

➤ Pour  $Vc=180$ m/min :

Pour une usure  $VB=0,0601$ mm, les efforts de coupe ( $Fa_{0,08}$  ;  $Fa_{0,12}$  et  $Fa_{0,16}$ ) enregistrés sont (17,33 ; 24,99 et 40,77) N. Pour  $VB=0,323$ mm, les efforts de coupe ( $Fa_{0,08}$  ;  $Fa_{0,12}$  et  $Fa_{0,16}$ ) sont (58,32 ; 60,17 et 90,38) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (236,52% ; 140,77% et 121,68%).

Pour une usure  $VB=0,0601$ mm, les efforts de coupe ( $Fr_{0,08}$  ;  $Fr_{0,12}$  et  $Fr_{0,16}$ ) enregistrés sont (38,25 ; 121,03 et 120,71) N. Pour  $VB=0,323$ mm, les efforts de coupe ( $Fr_{0,08}$  ;  $Fr_{0,12}$  et  $Fr_{0,16}$ ) sont (371,04 ; 353,39 et 413,94) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (870,03% ; 191,98% et 242,92%).

Pour une usure  $VB=0,0601$ mm, les efforts de coupe ( $Fv_{0,08}$  ;  $Fv_{0,12}$  et  $Fv_{0,16}$ ) enregistrés sont (17,02 ; 63,70 et 75,08) N. Pour  $VB=0,323$ mm, les efforts de coupe ( $Fv_{0,08}$  ;  $Fv_{0,12}$  et  $Fv_{0,16}$ ) sont (151,88 ; 115,66 et 103,67) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (792,36% ; 81,57% et 38,08%).

➤ Pour  $Vc=240$ m/min :

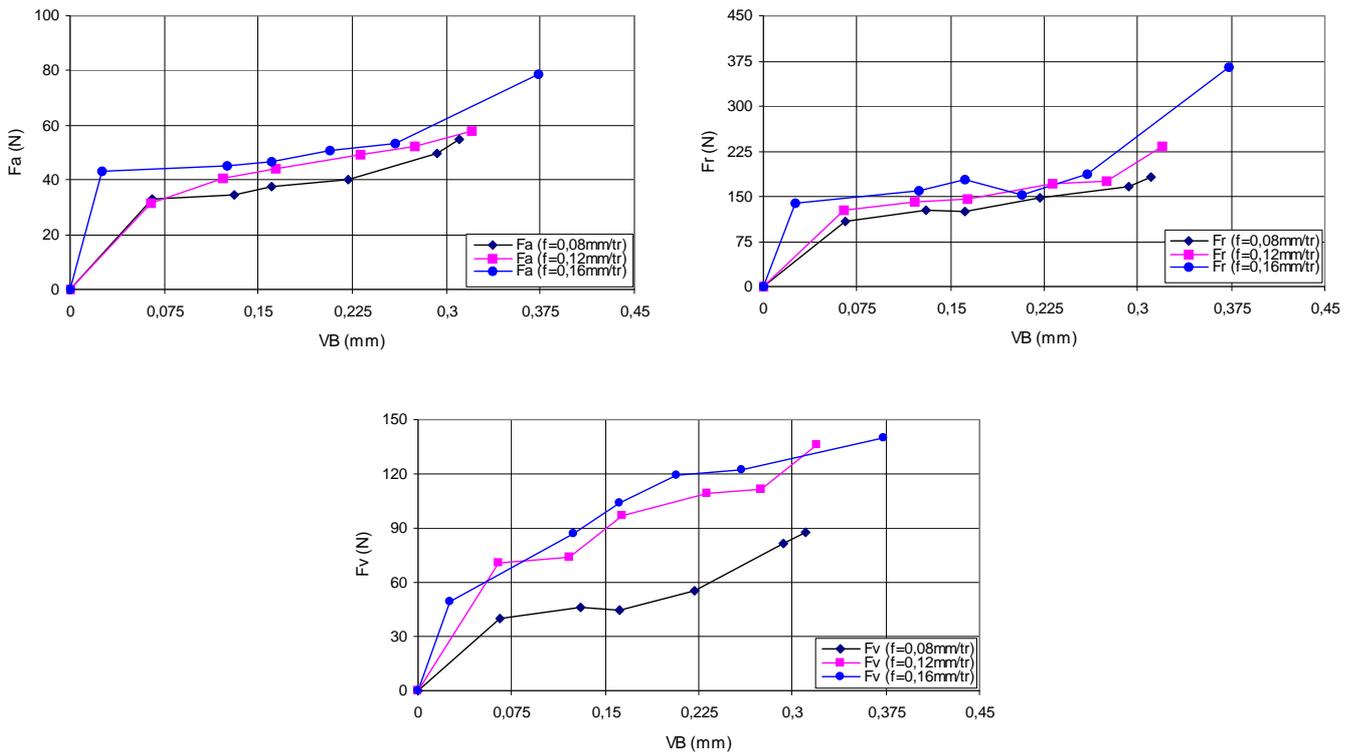
Pour une usure  $VB=0,034$ mm, les efforts de coupe ( $Fa_{0,08}$  ;  $Fa_{0,12}$  et  $Fa_{0,16}$ ) enregistrés sont (8,31 ; 10,22 et 33,35) N. Pour  $VB=0,366$ mm, les efforts de coupe ( $Fa_{0,08}$  ;  $Fa_{0,12}$  et  $Fa_{0,16}$ ) sont (85,44 ; 62,55 et 102,33) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (928,15% ; 512,03% et 206,83%).

Pour une usure  $VB=0,034$ mm, les efforts de coupe ( $Fr_{0,08}$  ;  $Fr_{0,12}$  et  $Fr_{0,16}$ ) enregistrés sont (34,02 ; 131,07 et 34,08) N. Pour  $VB=0,366$ mm, les efforts de coupe ( $Fr_{0,08}$  ;  $Fr_{0,12}$  et  $Fr_{0,16}$ ) sont (425,82 ; 360,33 et 460,80) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (1151,67% ; 174,91% et 1252,11%).

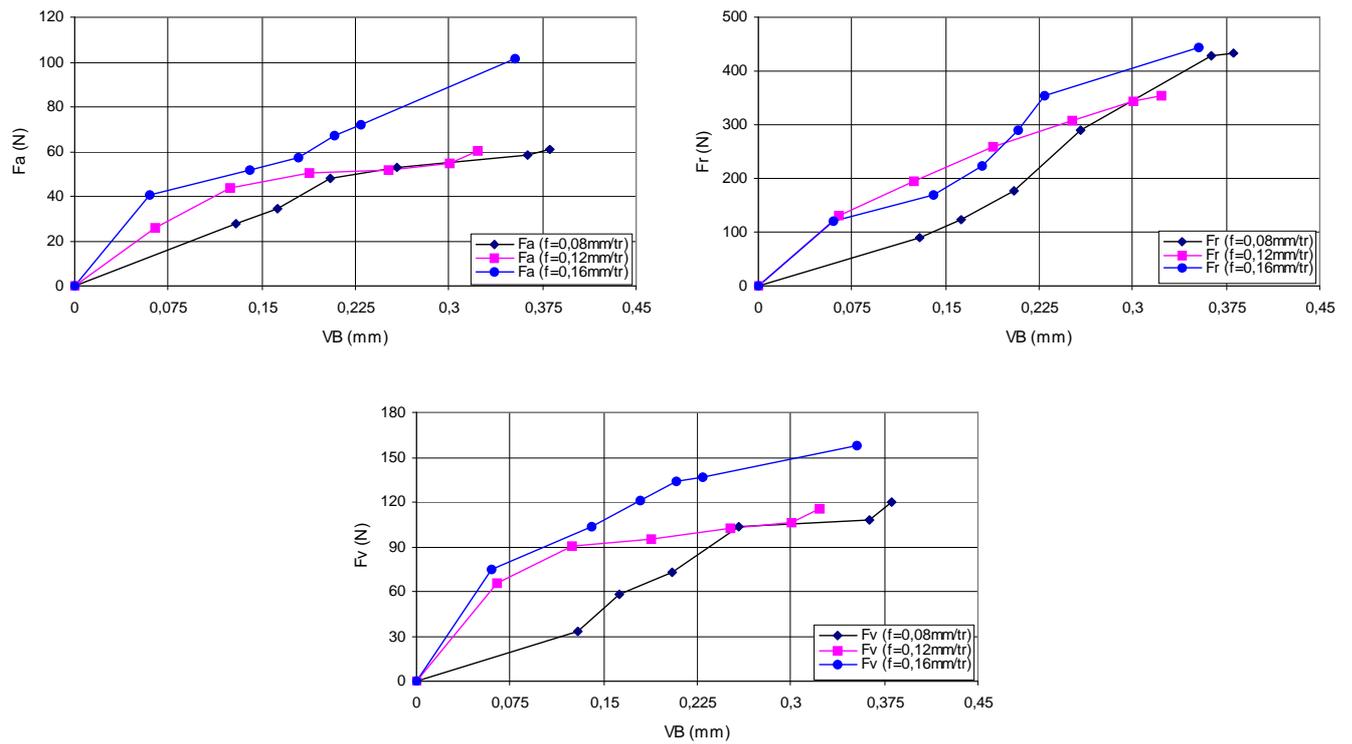
Pour une usure  $VB=0,034$ mm, les efforts de coupe ( $Fv_{0,08}$  ;  $Fv_{0,12}$  et  $Fv_{0,16}$ ) enregistrés sont (17,80 ; 36,33 et 64,35) N. Pour  $VB=0,366$ mm, les efforts de coupe ( $Fv_{0,08}$  ;  $Fv_{0,12}$  et  $Fv_{0,16}$ ) sont (98,57 ; 115,68 et 162,80) N, ce qui représente une augmentation d'environ de (453,76% ; 218,41% et 152,99%).

Les allures des courbes des efforts de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ) représentées dans les figures IV-13 et IV-14 relatives aux vitesses de coupe 180 et 240m/min se caractérisent par trois parties différentes.

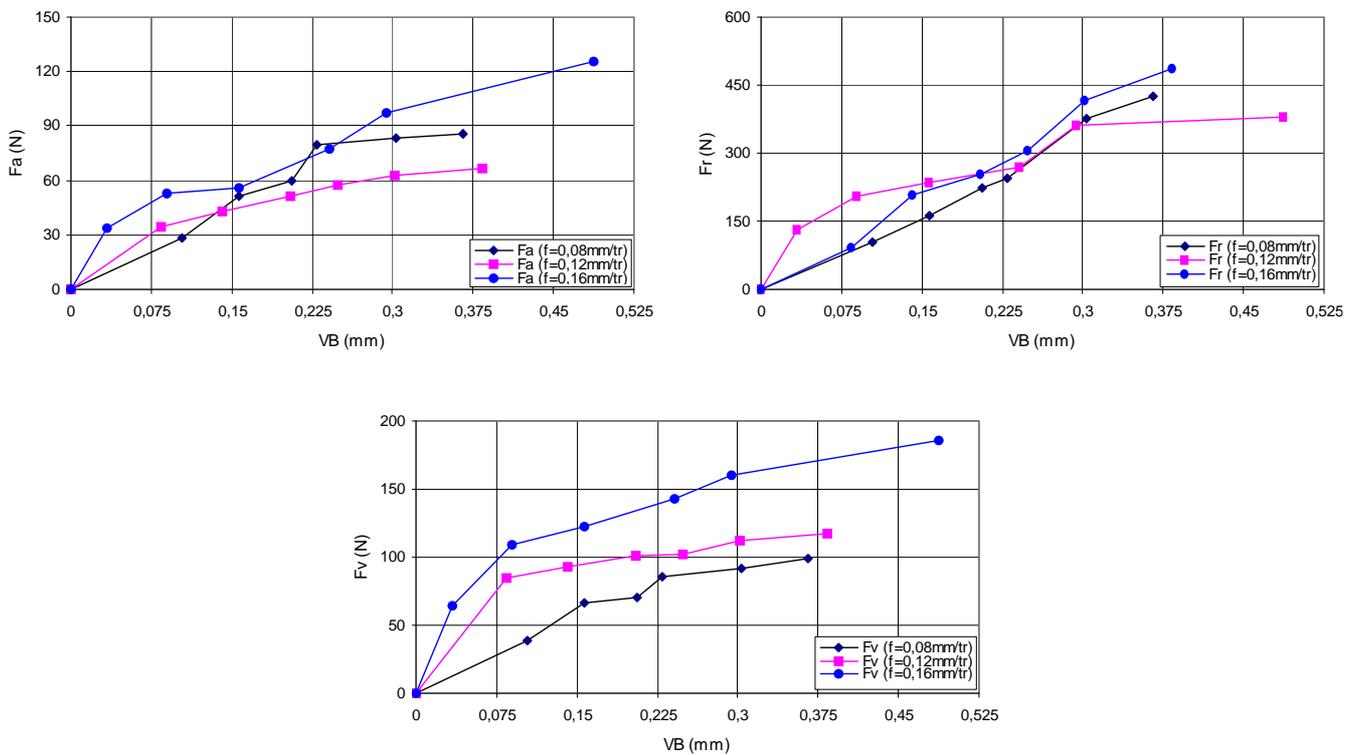
La première partie où l'usure  $VB$  ne dépasse pas 0,10mm, les efforts de coupe augmentent rapidement. La deuxième partie où l'usure  $VB$  se situe entre 0,10 et 0,30mm, les efforts de coupe se stabilisent légèrement suite à la stabilité de  $VB$ . Cette zone est très courte comparée à celle de 120m/min. La dernière partie où  $VB$  est supérieure à 0,30mm, les efforts de coupe augmentent considérablement à cause de l'augmentation de  $VB$ .



**Figure IV-12.** Evolution des efforts de coupe en fonction de  $VB$  à trois avances pour  $V_c=120m/min$



**Figure IV-13.** Evolution des efforts de coupe en fonction de VB à trois avances pour  $V_c=180m/min$



**Figure IV-14.** Evolution des efforts de coupe en fonction de VB à trois avances pour  $V_c=240m/min$

## IV.5. Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage et de l'usure VB

### IV.5.1. Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage

Les figures IV-15, IV-16 et IV-17 présentent l'évolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à trois avances pour trois vitesses différentes. Aux vitesses de coupe de 120 et 180m/min, les rugosités  $R_t$  trouvées pour  $f = 0,16\text{mm/tr}$  sont plus grandes que celles obtenues à  $f = 0,08\text{mm/tr}$ . A  $V_c=240\text{m/min}$  et pour un temps d'usinage supérieur à 1000secondes, les rugosités  $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$  relatives à  $f=0,12\text{mm/tr}$  deviennent plus importantes que celles trouvées à  $f = 0,16\text{mm/tr}$ . Pour les trois vitesses de coupe à un temps d'usinage de 900secondes, les rugosités  $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$  trouvées pour  $f = 0,16\text{mm/tr}$  sont plus grandes que celles obtenus à  $f = 0,08\text{mm/tr}$  et  $f = 0,12\text{mm/tr}$ . A la vitesse de coupe de 240m/min et pour un temps d'usinage supérieur à 900secondes, les courbes des rugosités prennent des allures ascendantes à cause de l'augmentation de l'usure.

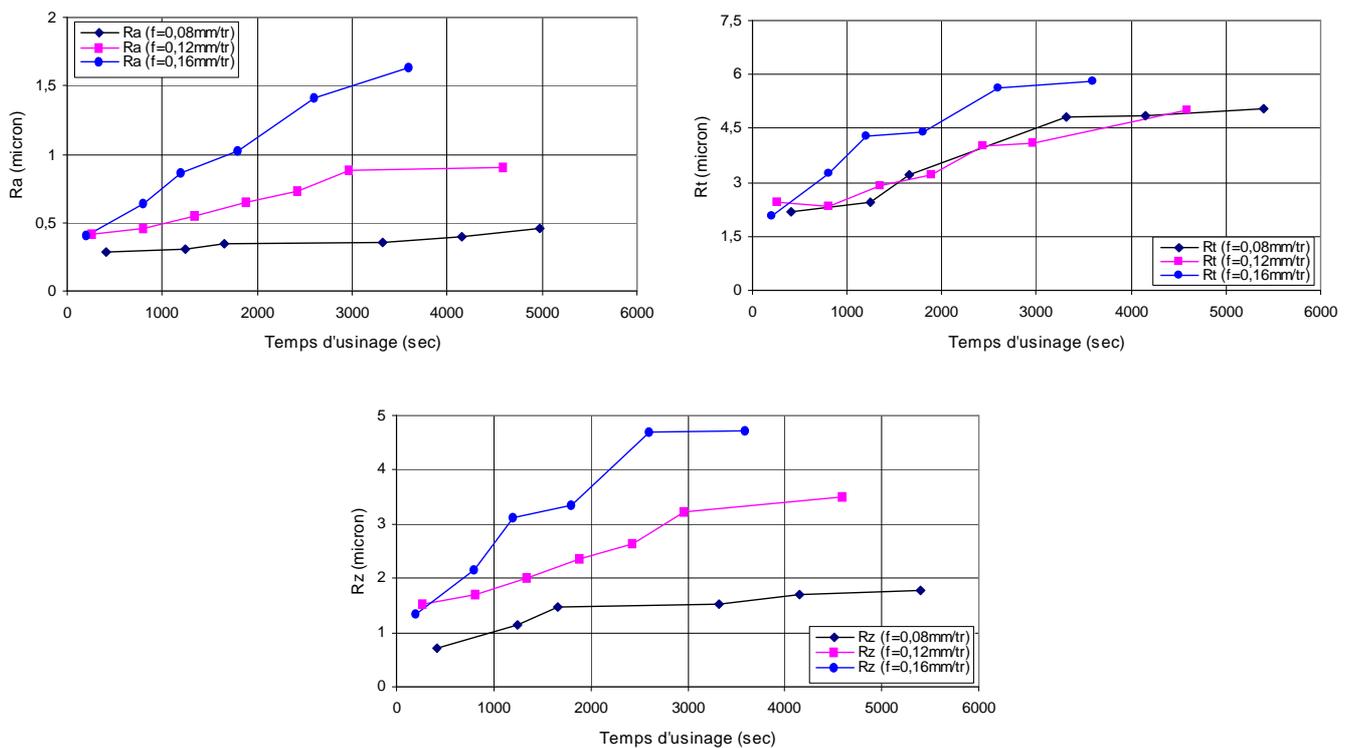
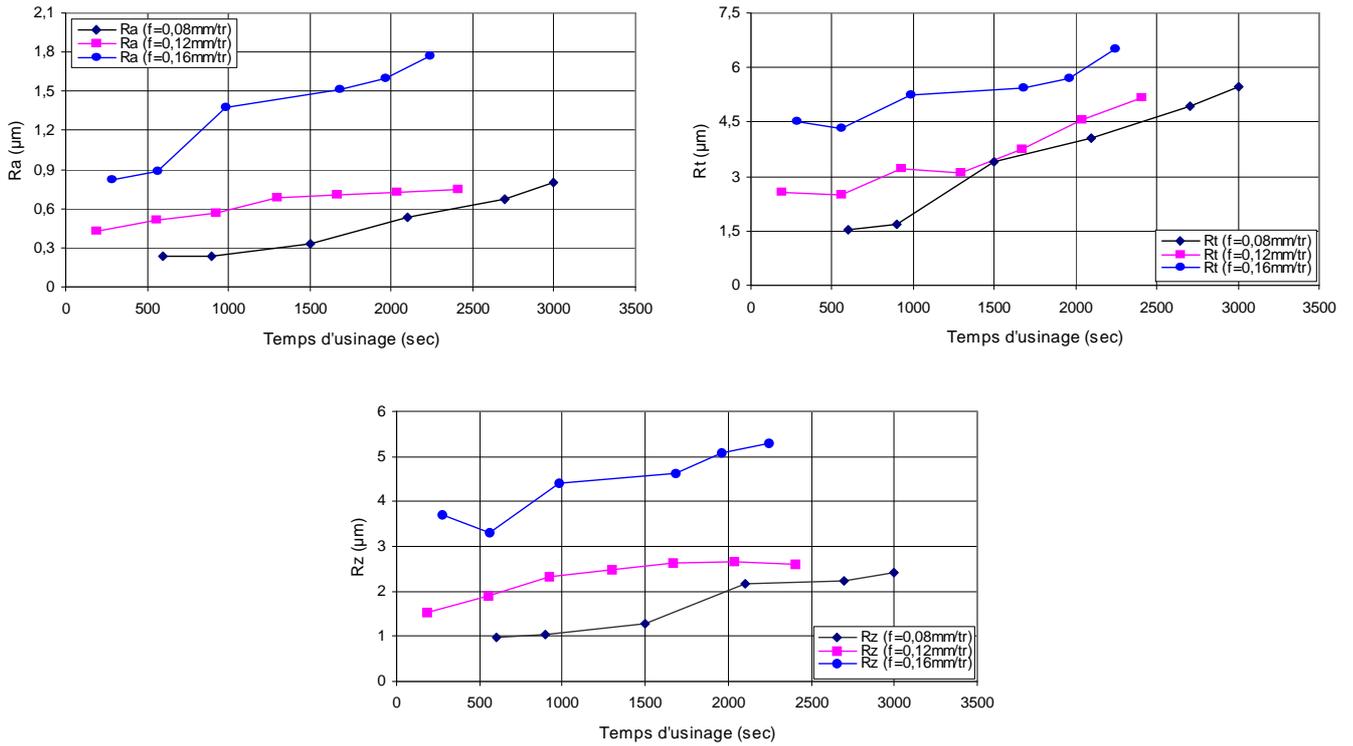
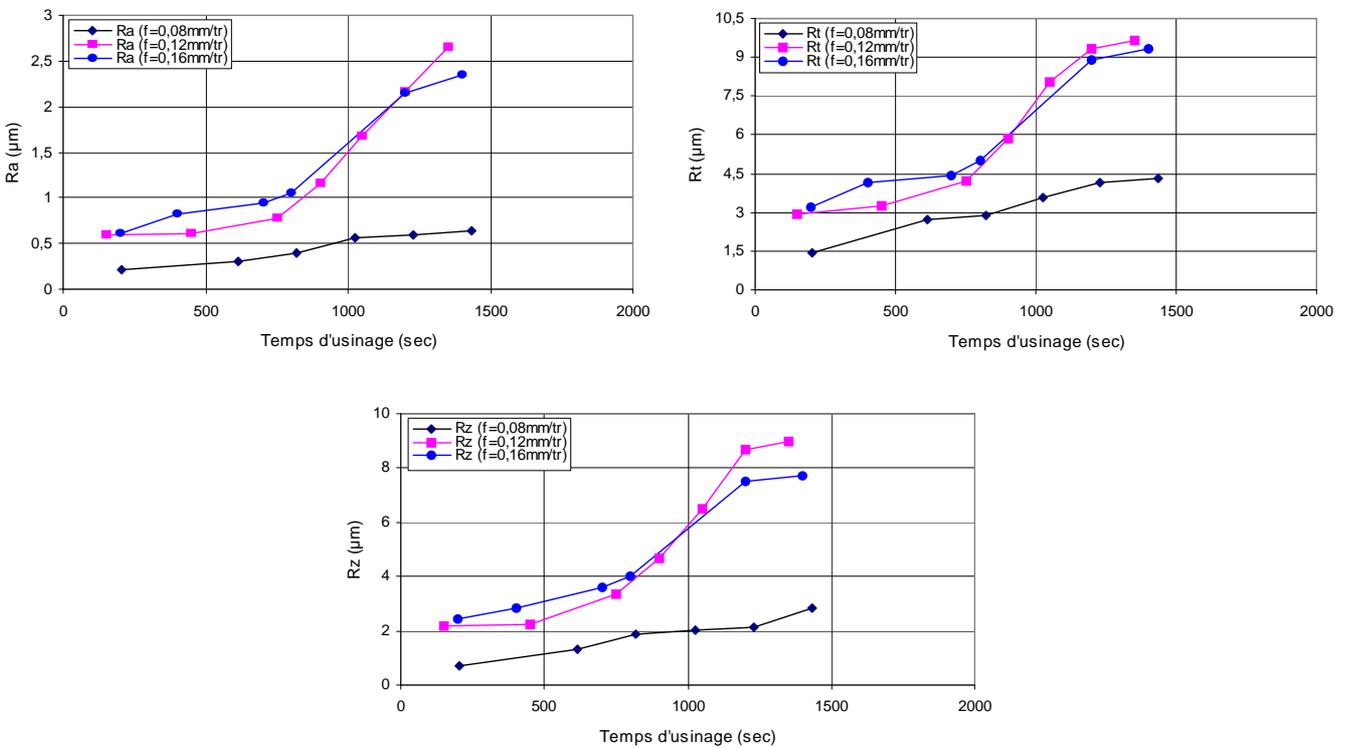


Figure IV-15. Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à trois avances pour  $V_c=120\text{m/min}$



**Figure IV-16.** Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à trois avances pour  $V_c=180m/min$



**Figure IV-17.** Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage à trois avances pour  $V_c=240m/min$

#### IV.5.2. Analyse de la rugosité en fonction l'usure VB

Les figures IV-18, IV-19 et IV-20 montrent l'évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille pour trois vitesses et à trois avances différentes. Les rugosités Ra, Rt et Rz réalisées à partir de  $f=0,16\text{mm/tr}$  pour ( $V_c=120$  et  $V_c=180$ ) m/min, sont plus grandes que celles obtenues à ( $f=0,12$  et  $f=0,08$ ) mm/tr pour les mêmes vitesses de coupe. Tant que l'usure en dépouille est uniforme, il n'y a pas de dégradation de l'état de surface et les valeurs expérimentales de (Ra, Rt et Rz) sont proches des valeurs obtenues dans le Chp. III. Avec la l'accroissement de l'usure, l'arête de coupe produit des profils d'état de surface différents. A  $V_c=240\text{m/min}$ , les courbes des rugosités prennent des allures ascendantes à cause de l'augmentation de l'usure VB.

➤ Pour  $V_c=120\text{m/min}$  :

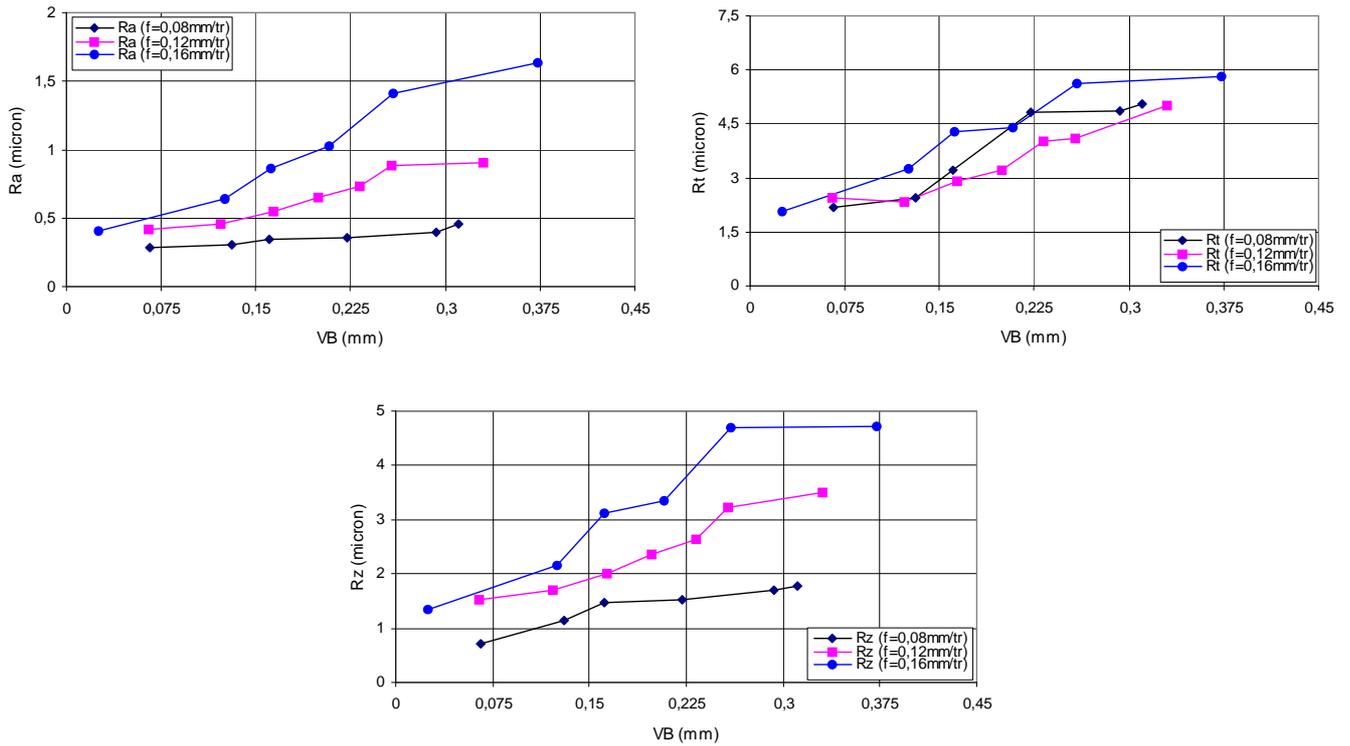
Sur le plan expérimental, pour  $V_c=120\text{m/min}$  et lorsque l'usure VB à est égale  $0,0252\text{mm}$ , les rugosité ( $Ra_{0,08}$  ;  $Ra_{0,12}$  et  $Ra_{0,16}$ ) enregistrés sont (0,28 ; 0,42 et 0,50)  $\mu\text{m}$ . Pour  $VB=0,310\text{mm}$ , les rugosités ( $Ra_{0,08}$  ;  $Ra_{0,12}$  et  $Ra_{0,16}$ ) sont (0,45 ; 0,88 et 1,50)  $\mu\text{m}$ , ce qui représente une augmentation d'environ de (60,71% ; 109,52% et 200%).

➤ Pour  $V_c=180\text{m/min}$  :

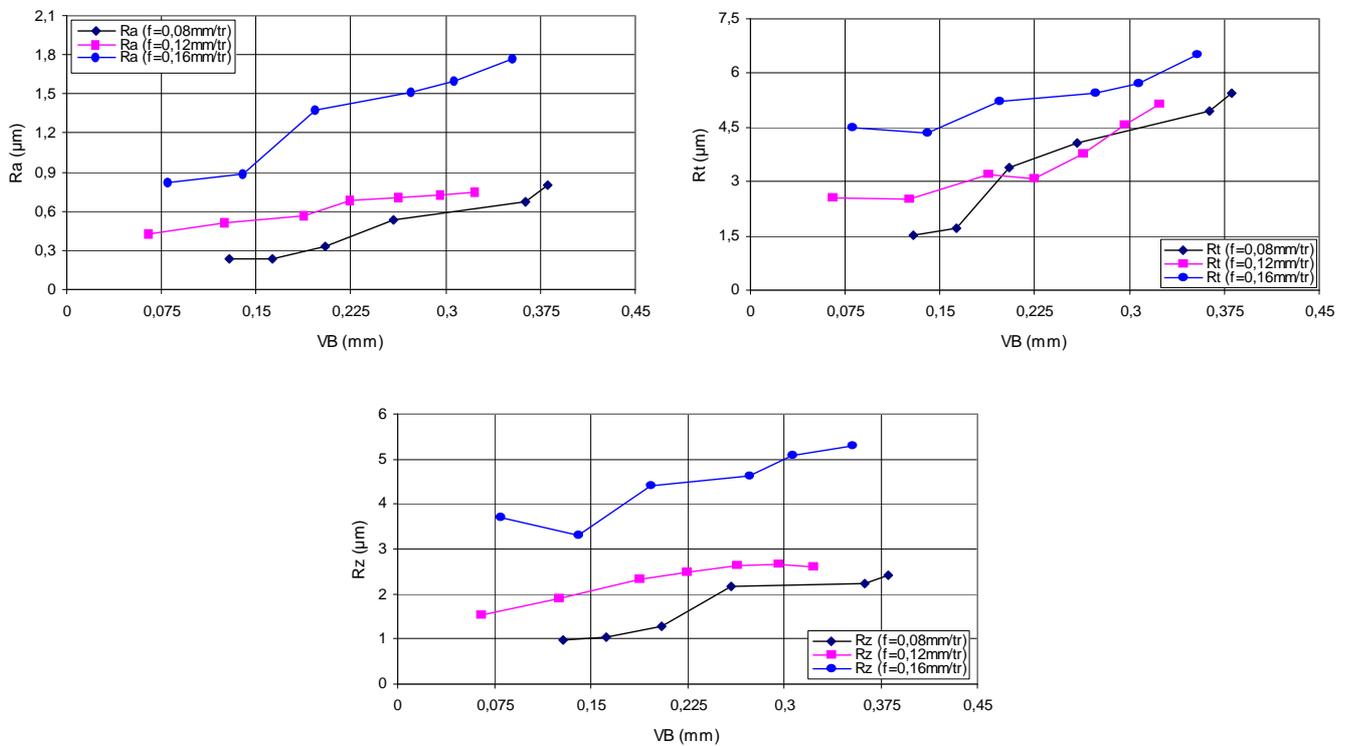
Sur le plan expérimental, pour  $V_c=180\text{m/min}$  et lorsque l'usure VB à est égale  $0,0252\text{mm}$ , les rugosité ( $Ra_{0,08}$  ;  $Ra_{0,12}$  et  $Ra_{0,16}$ ) enregistrés sont (0,23 ; 0,51 et 0,84)  $\mu\text{m}$ . Pour  $VB=0,310\text{mm}$ , les rugosités ( $Ra_{0,08}$  ;  $Ra_{0,12}$  et  $Ra_{0,16}$ ) sont (0,61 ; 0,75 et 1,62)  $\mu\text{m}$ , ce qui représente une augmentation d'environ de (165,21% ; 47,05% et 92,85%).

➤ Pour  $V_c=240\text{m/min}$  :

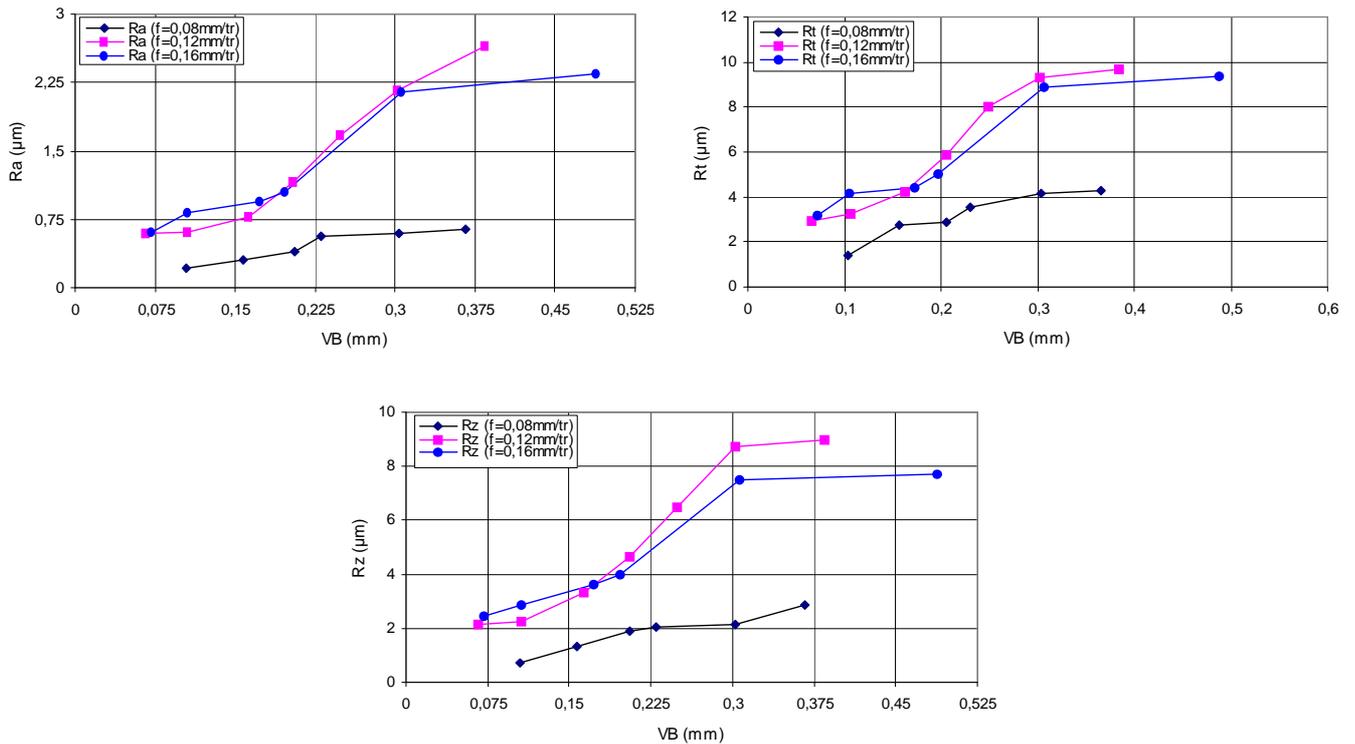
Sur le plan expérimental, pour  $V_c=240\text{m/min}$  et lorsque l'usure VB à est égale  $0,0252\text{mm}$ , les rugosité ( $Ra_{0,08}$  ;  $Ra_{0,12}$  et  $Ra_{0,16}$ ) enregistrés sont (0,22 ; 0,60 et 0,82)  $\mu\text{m}$ . Pour  $VB=0,310\text{mm}$ , les rugosités ( $Ra_{0,08}$  ;  $Ra_{0,12}$  et  $Ra_{0,16}$ ) sont (0,64 ; 2,62 et 2,17)  $\mu\text{m}$ , ce qui représente une augmentation d'environ de (190,90% ; 336,67% et 164,63%).



**Figure IV-18.** Evolution de la rugosité en fonction de VB à trois avances pour  $V_c=120\text{m/min}$



**Figure IV-19.** Evolution de la rugosité en fonction de VB à trois avances pour  $V_c=180\text{m/min}$



**Figure IV-20.** Evolution de la rugosité en fonction de VB à trois avances pour  $V_c=240m/min$

## IV.6. Conclusions

Les essais d'usinage effectués sur l'acier X38CrMoV5-1 traité à 50HRC nous ont permis d'une part d'étudier l'influence du temps d'usinage sur l'usure, sur les efforts de coupe et sur la rugosité des surfaces usinées pour trois avances et à trois vitesses différentes. D'autre part, l'évolution des efforts de coupe et de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille a été mise en évidence.

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

- 1) Le temps d'usinage a une grande influence sur l'usure ;
- 2) L'effet de la vitesse de coupe sur l'usure est plus important que celui de l'avance ;
- 3) L'usure est régulière pour toutes 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'avance et par l'usure ;
- 7) L'usure et le temps d'usinage ont un grand impact sur les efforts de coupe.

# Introduction

Étude bibliographique sur la coupe des métaux

Procédures expérimentales

Résultats des essais d'usinage

Résultats de l'évolution de L'usure du Nitrure de Bore Cubique

## **Traitement et analyse 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. Modèle de la durée de vie en fonction des paramètres de coupe
- V.6. Conclusions

## V.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe ( $V_c, f, t$  et  $a_p$ ) et les paramètres technologiques étudiés (effort de coupe, rugosité, usure en dépouille VB et durée de vie T). Ils permettent d'optimiser le processus de coupe [39 et 40]

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

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe sur l'effort de coupe, nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, chaque facteur a trois niveaux.

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>v</sub> (N)
1	-1	-1	-1	120	0,08	0,15	30,73	119,79	67,78
2	-1	-1	0	120	0,08	0,30	69,73	188,47	118,85
3	-1	-1	+1	120	0,08	0,45	202,71	380,73	195,32
4	-1	0	-1	120	0,12	0,15	39,61	140,86	112,05
5	-1	0	0	120	0,12	0,30	80,59	211,21	164,01
6	-1	0	+1	120	0,12	0,45	131,90	368,96	248,92
7	-1	+1	-1	120	0,16	0,15	48,63	164,41	109,43
8	-1	+1	0	120	0,16	0,30	72,89	218,45	185,35
9	-1	+1	+1	120	0,16	0,45	131,72	369,00	284,10
10	0	-1	-1	180	0,08	0,15	33,01	115,66	62,42
11	0	-1	0	180	0,08	0,30	69,04	157,81	110,97
12	0	-1	+1	180	0,08	0,45	120,18	285,22	170,09
13	0	0	-1	180	0,12	0,15	36,03	127,38	85,81
14	0	0	0	180	0,12	0,30	82,23	182,05	154,00
15	0	0	+1	180	0,12	0,45	116,33	290,03	236,70
16	0	+1	-1	180	0,16	0,15	39,13	141,32	122,22
17	0	+1	0	180	0,16	0,30	92,60	198,13	183,28
18	0	+1	+1	180	0,16	0,45	122,11	291,11	286,33
19	+1	-1	-1	240	0,08	0,15	28,59	105,26	55,37
20	+1	-1	0	240	0,08	0,30	63,93	147,08	105,32
21	+1	-1	+1	240	0,08	0,45	98,21	221,10	174,82
22	+1	0	-1	240	0,12	0,15	35,32	123,72	72,46
23	+1	0	0	240	0,12	0,30	76,66	203,83	142,48
24	+1	0	+1	240	0,12	0,45	115,47	279,14	233,92
25	+1	+1	-1	240	0,16	0,15	39,54	143,90	100,54
26	+1	+1	0	240	0,16	0,30	76,54	251,71	174,74
27	+1	+1	+1	240	0,16	0,45	109,69	314,32	271,54

**Tableau V-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>v</sub>), des critères de rugosité (R<sub>a</sub>, R<sub>t</sub> et R<sub>z</sub>), de l'usure en dépouille VB et de la durée de vie

de l'outil T, a été faite avec l'objectif d'analyser l'influence de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe et du temps d'usinage sur ces paramètres technologiques.

Les résultats des différentes composantes de l'effort de coupe ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_v$ ), des critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ), de l'usure en dépouille VB et de la durée de vie de l'outil T, en utilisant le mode de chariotage, sont montrés respectivement dans les tableaux ((V-2 à 3), (V-6 à 8), V-10 et V-12). Cette analyse a été effectuée pour un niveau de signification de 5%, pour un niveau de confiance de 95%.

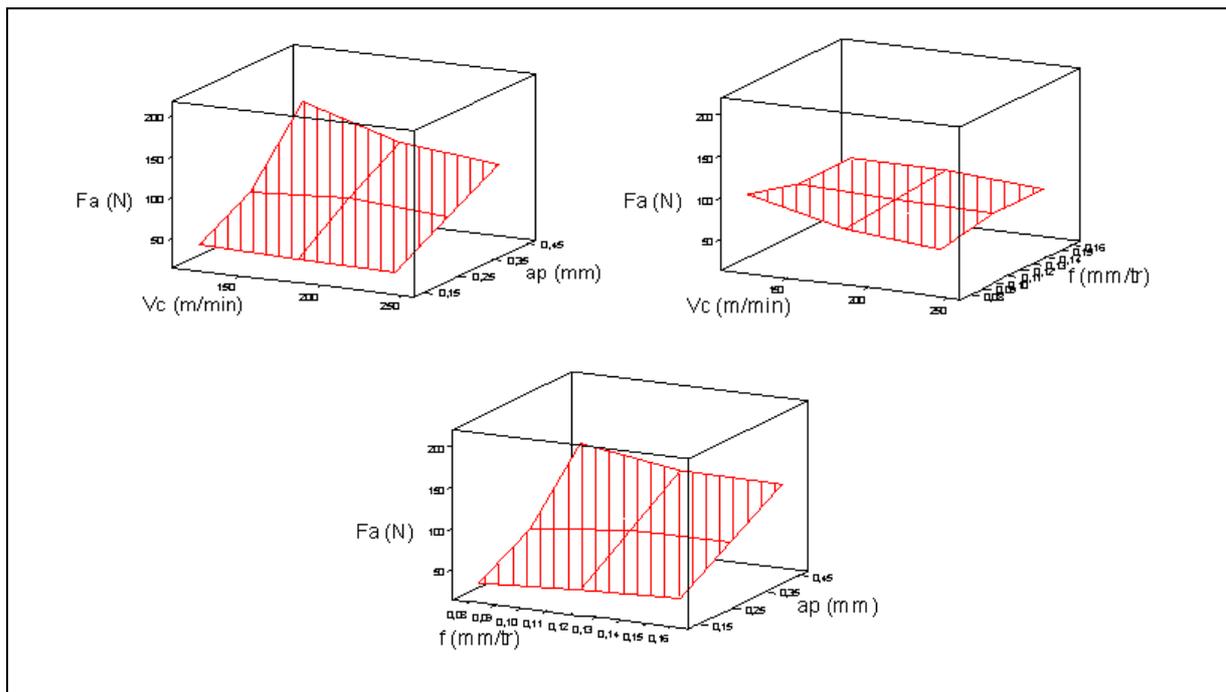
### Analyse de régression : $F_a$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $a_p$

L'équation de régression est :

$$F_a = 13,90 - 0,152 V_c + 23 f + 303 a_p$$

$$R^2 = 85,1\%$$

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 V-1) montre que l'effort axial est très affecté par la variation de la profondeur de passe, suivie par la variation de la vitesse de coupe et en dernier lieu par l'avance.



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

Source	dL	SC seq.	CM ajust	F-value	P-value
A ( $V_c$ , m/min)	2	1522,4	761,2	3,12	0,099
B ( $f$ , mm/tr)	2	23,5	11,7	0,05	0,953
C ( $a_p$ , mm)	2	37375,1	18687,5	76,65	0,000
AB	4	999,2	249,8	1,02	0,450
AC	4	2348,7	587,2	2,41	0,135
BC	4	1238,0	309,5	1,27	0,358
Erreur	8	1950,5	243,8		
Total	26	45457,4			

**Tableau V-2.** Analyse de la variance (ANOVA) pour  $F_a$

Le tableau V-2 montre que la profondeur de passe a un impact significatif sur l'effort axial puisque la valeur de la probabilité P-value est inférieure à 0,05. La vitesse de coupe, la vitesse d'avance 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).

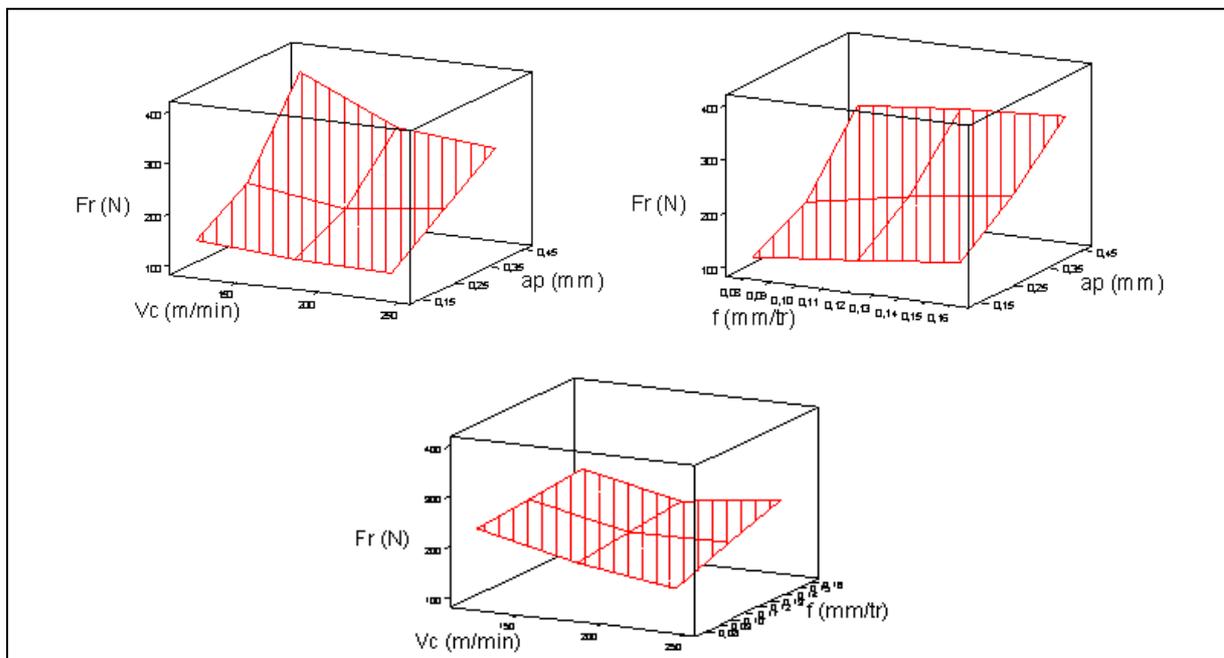
### Analyse de régression : $F_r$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $a_p$

L'équation de régression est :

$$F_r = 33,0 - 0,344 V_c + 516 f + 599 a_p$$

$$R^2 = 88,2\%$$

L'analyse détaillée de surface de réponse de l'effort radial trouvé (figure V-2), confirme que l'augmentation de la vitesse de coupe conduit à la diminution de l'effort radial. La variation de la profondeur de passe et de l'avance induit une croissance de l'effort radial.



**Figure V-2.**  $F_r$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$

L'ordre de classement des opérateurs du modèle déterminé en valeur absolue, met en évidence le degré d'influence de chaque facteur des éléments du régime de coupe sur l'effort radial. En effet, la profondeur de passe est le facteur le plus influent (F-value =334,51), suivi par la vitesse de coupe (F-value =23,03) et en dernier par l'avance (F-value =17,22).

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A ( $V_c$ , m/min)	2	10278	5139	23,03	0,000
B ( $f$ , mm/tr)	2	7687	3844	17,22	0,001
C ( $a_p$ , mm)	2	149311	74655	334,51	0,000
AB	4	3209	802	3,59	0,058
AC	4	9077	2269	10,17	0,003
BC	4	736	184	0,82	0,545
Erreur	8	1785	223		
Total	26	182084			

**Tableau V-3.** Analyse de la variance (ANOVA) pour  $F_r$

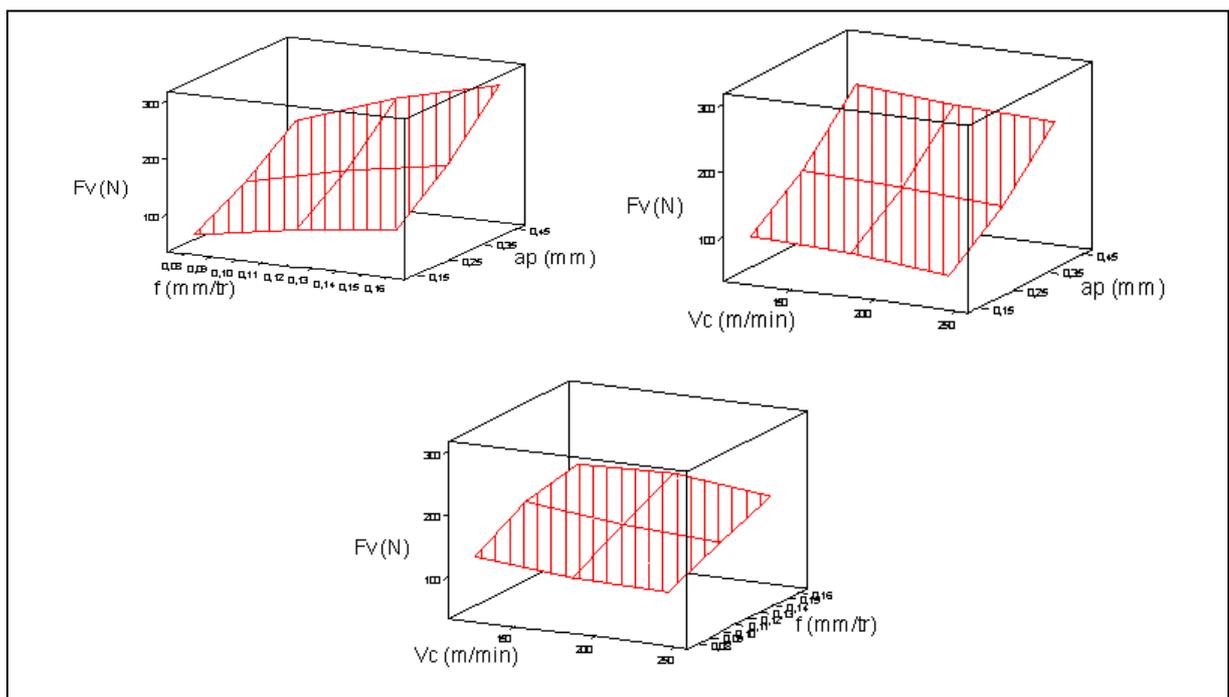
Le tableau V-3 prouve que les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe et l'interaction entre la vitesse et la profondeur de passe, sont significatifs en ce qui concerne le effort radial. L'effort radial n'est pas influencé par les interactions  $V_c$ - $f$  et  $a_p$ - $f$ .

### Analyse de régression : $F_v$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $a_p$

L'équation de régression est :

$$F_v = - 73,0 - 0,143 V_c + 912 f + 487 a_p$$

$$R^2 = 96,8\%$$



**Figure V-3.**  $F_v$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A ( $V_c$ , m/min)	2	1329,0	664,5	18,44	0,001
B ( $f$ , mm/tr)	2	24227,2	12113,6	336,15	0,000
C ( $a_p$ , mm)	2	96703,2	48351,6	1341,74	0,000
AB	4	429,9	107,5	2,98	0,088
AC	4	81,3	20,3	0,56	0,696
BC	4	2065,8	516,5	14,33	0,001
Erreur	8	288,3	36,0		
Total	26	125124,7			

**Tableau V-4.** Analyse de la variance (ANOVA) pour  $F_v$

L'analyse du tableau V-4, montre que le facteur de l'avance (P-value =0,000) et celui de la profondeur de passe (P-value =0,000) ont une influence significative sur l'effort tangentiel ( $F_v$ ). Tandis que la vitesse de coupe a un effet moins important. L'interaction  $f$ - $a_p$  influe énormément sur  $F_v$ . Par contre toutes les autres ont un impact peu significatif.

### V.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 a trois niveaux.

Facteurs							Paramètres		
N° Essais	Valeurs codifiées			Valeurs réelles			Critères de rugosité		
	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)	Ra (μm)	Rt (μm)	Rz (μm)
1	-1	-1	-1	120	0,08	0,15	0,350	2,00	1,40
2	-1	-1	0	120	0,08	0,30	0,390	2,30	1,10
3	-1	-1	+1	120	0,08	0,45	0,300	1,80	1,10
4	-1	0	-1	120	0,12	0,15	0,460	3,00	1,80
5	-1	0	0	120	0,12	0,30	0,495	2,85	1,65
6	-1	0	+1	120	0,12	0,45	0,565	3,05	2,00
7	-1	+1	-1	120	0,16	0,15	0,560	3,70	2,15
8	-1	+1	0	120	0,16	0,30	0,545	4,15	1,50
9	-1	+1	+1	120	0,16	0,45	0,565	3,05	2,00
10	0	-1	-1	180	0,08	0,15	0,230	1,60	0,70
11	0	-1	0	180	0,08	0,30	0,210	1,50	0,60
12	0	-1	+1	180	0,08	0,45	0,180	1,20	0,70
13	0	0	-1	180	0,12	0,15	0,360	2,20	1,30
14	0	0	0	180	0,12	0,30	0,270	1,70	0,70
15	0	0	+1	180	0,12	0,45	0,340	2,20	1,10
16	0	+1	-1	180	0,16	0,15	0,500	3,20	2,10
17	0	+1	0	180	0,16	0,30	0,475	2,35	1,65
18	0	+1	+1	180	0,16	0,45	0,505	2,85	2,05
19	+1	-1	-1	240	0,08	0,15	0,210	1,20	0,90
20	+1	-1	0	240	0,08	0,30	0,240	1,40	0,85
21	+1	-1	+1	240	0,08	0,45	0,240	2,00	1,00
22	+1	0	-1	240	0,12	0,15	0,450	2,30	1,40
23	+1	0	0	240	0,12	0,30	0,490	2,00	1,35
24	+1	0	+1	240	0,12	0,45	0,520	2,20	1,40
25	+1	+1	-1	240	0,16	0,15	0,585	3,50	2,20
26	+1	+1	0	240	0,16	0,30	0,520	2,80	2,00
27	+1	+1	+1	240	0,16	0,45	0,640	3,50	2,40

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

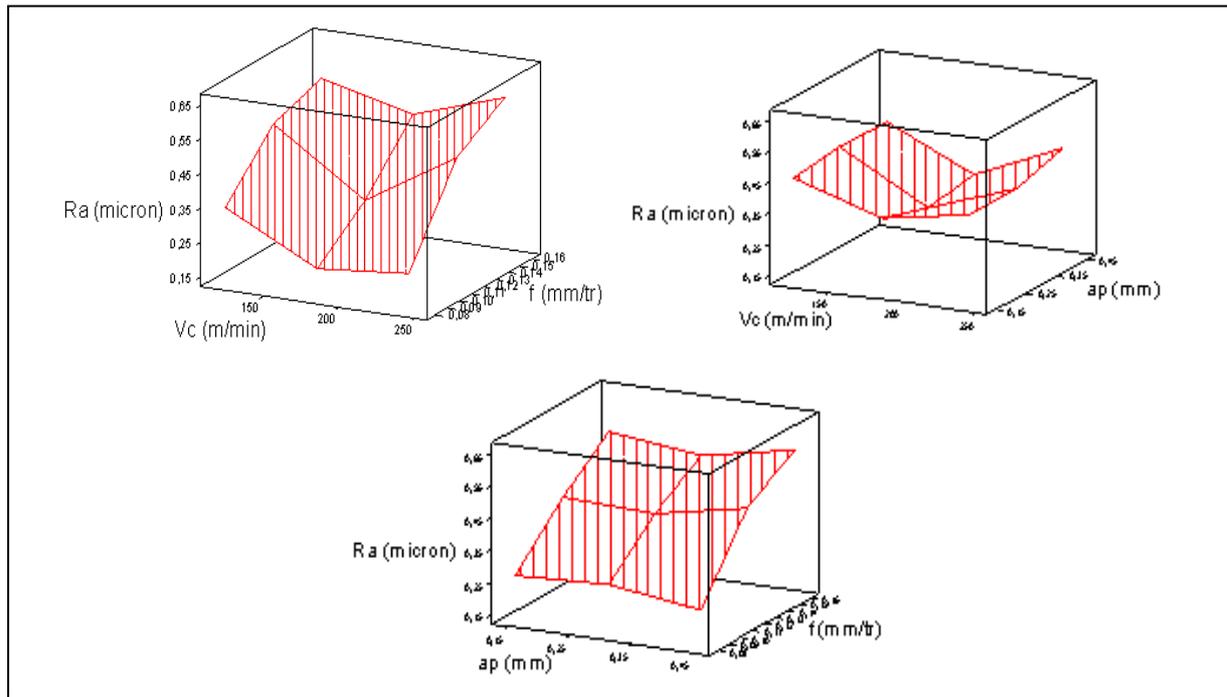
#### Analyse de régression : Ra en fonction de V<sub>c</sub>, f et a<sub>p</sub>

L'équation de régression est :

$$Ra = 0,0296 - 0,000310 V_c + 3,53 f + 0,056 a_p$$

$$R^2 = 73,3\%$$

La surface de la réponse de la rugosité en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les graphes (figures V-4 à V-6), ces figures montrent les effets de la variation des facteurs sur (Ra, Rt et Rz).



**Figure V-4.**  $R_a$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A ( $V_c$ , m/min)	2	0,079202	0,039601	44,64	0,000
B ( $f$ , mm/tr)	2	0,367780	0,183890	207,31	0,000
C ( $a_p$ , mm)	2	0,002807	0,001404	1,58	0,264
AB	4	0,027681	0,006920	7,58	0,007
AC	4	0,006204	0,001551	1,75	0,232
BC	4	0,010426	0,002606	2,94	0,091
Erreur	8	0,007096	0,000887		
Total	26	0,501196			

**Tableau V-6.** Analyse de la variance (ANOVA) pour  $R_a$

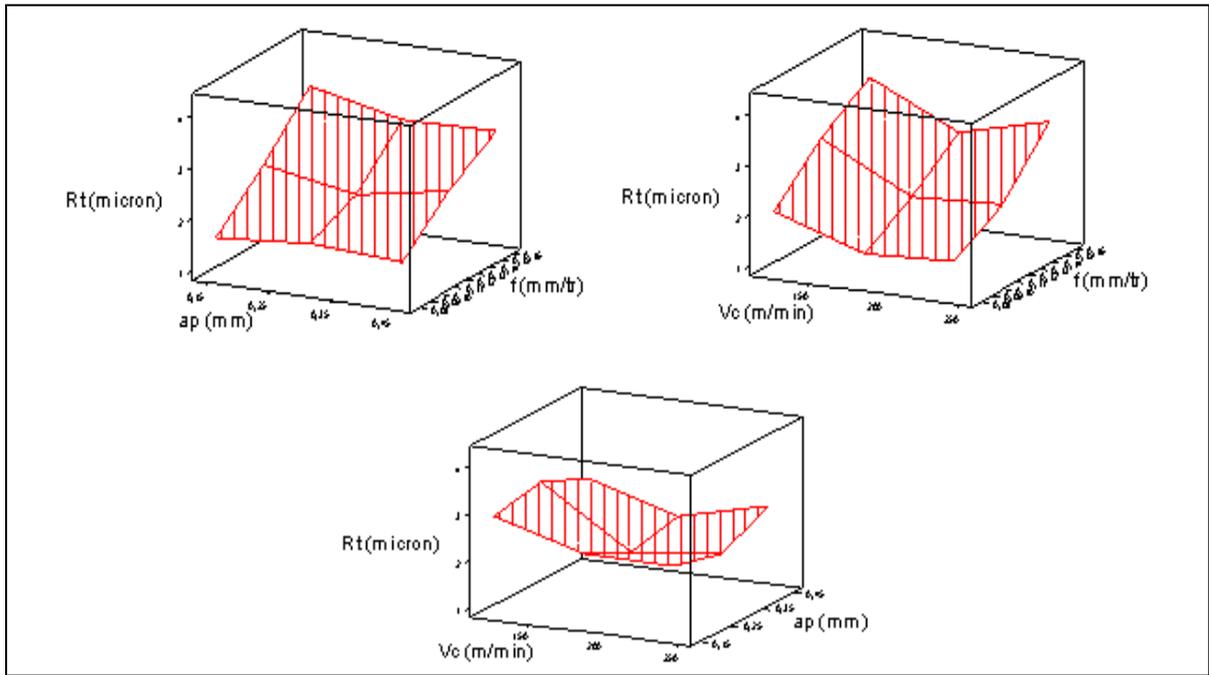
Du tableau V-6, on peut voir que les facteurs d'avance (P-value < 0,05) et de la vitesse de coupe (P-value < 0,05) ont la signification statistique sur la rugosité moyenne arithmétique ( $R_a$ ). La profondeur de passe et les interactions  $f$ - $a_p$  et  $V_c$ - $a_p$  ne présentent pas une signification statistique sur  $R_a$ .

#### **Analyse de régression : $R_t$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $a_p$**

L'équation de régression est

$$R_t = 1,01 - 0,00463 V_c + 19,6 f - 0,315 a_p$$

$$R^2 = 76,2\%$$



**Figure V-5.** *Rt en fonction de Vc, f et ap*

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A (Vc, m/min)	2	2,95630	1,47815	16,18	0,002
B (f, mm/tr)	2	11,06741	5,53370	60,58	0,000
C ( <b>ap, mm</b> )	2	0,15130	0,07565	0,83	0,471
AB	4	0,23926	0,05981	0,65	0,640
AC	4	0,90370	0,22593	2,47	0,128
BC	4	0,31259	0,07815	0,86	0,529
Erreur	8	0,73074	0,09124		
Total	26	16,36130			

**Tableau V-7.** Analyse de la variance (ANOVA) pour Rt

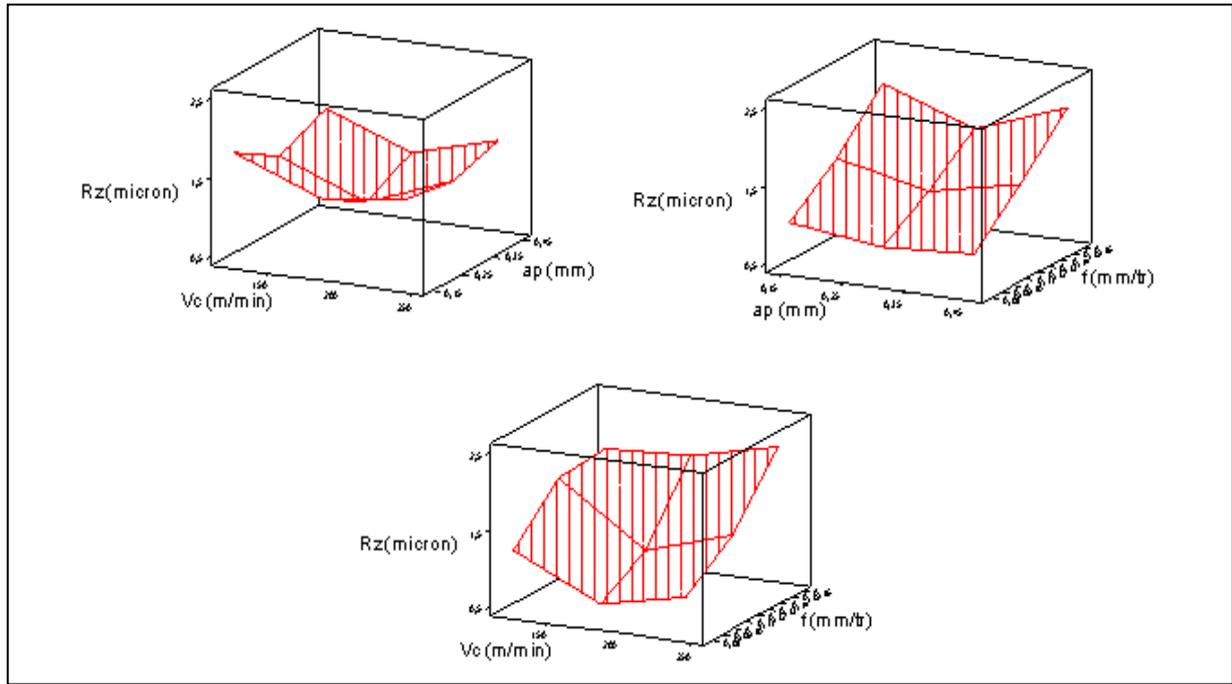
Le tableau V-7 montre que les effets de la vitesse de coupe et de l'avance sont significatifs sur l'évolution de la rugosité total Rt. La rugosité Rt n'est pas beaucoup affectée par le changement de la profondeur de passe et des interactions entre la profondeur de passe et la vitesse de coupe, l'avance.

**Analyse de régression : Rz en fonction de Vc, f et ap**

L'équation de régression est :

$$Rz = 0,054 - 0,00111 Vc + 13,5 f - 0,074 a_p$$

$$R^2 = 70,5\%$$



**Figure V-6.** *Rz en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$*

Source	dL	SC seq.	CM ajust	F-value	P-value
A ( $V_c$ , m/min)	2	0,83852	0,41926	25,55	0,000
B ( $f$ , mm/tr)	2	5,24574	2,62287	159,81	0,000
C ( $a_p$ , mm)	2	0,44685	0,22343	13,61	0,003
AB	4	0,68648	0,17162	10,46	0,003
AC	4	0,07870	0,01968	1,20	0,382
BC	4	0,10481	0,02620	1,60	0,265
Erreur	8	0,13130	0,01641		
Total	26	7,53241			

**Tableau V-8.** Analyse de la variance (ANOVA) pour Rz

Le tableau V-8 montre que les effets de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe et des interactions entre la vitesse de coupe et l'avance sont significatifs sur la rugosité Rz. La rugosité Rz n'est pas beaucoup affectée par les interactions  $V_c$ - $a_p$  et  $f$ - $a_p$ .

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

Facteurs							Paramètres
Valeurs codifiées			Valeurs réelles				Usure en dépouille
N° Essais	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Vc (m/min)	f (mm/tr)	t (min)	VB (mm)
1	-1	-1	-1	120	0,08	5	0,0535
2	-1	-1	0	120	0,08	10	0,0825
3	-1	-1	+1	120	0,08	15	0,1220
4	-1	0	-1	120	0,12	5	0,0672
5	-1	0	0	120	0,12	10	0,1003
6	-1	0	+1	120	0,12	15	0,1267
7	-1	+1	-1	120	0,16	5	0,0676
8	-1	+1	0	120	0,16	10	0,1044
9	-1	+1	+1	120	0,16	15	0,1346
10	0	-1	-1	180	0,08	5	0,1289
11	0	-1	0	180	0,08	10	0,1420
12	0	-1	+1	180	0,08	15	0,1626
13	0	0	-1	180	0,12	5	0,0983
14	0	0	0	180	0,12	10	0,1550
15	0	0	+1	180	0,12	15	0,1795
16	0	+1	-1	180	0,16	5	0,0936
17	0	+1	0	180	0,16	10	0,1427
18	0	+1	+1	180	0,16	15	0,1827
19	+1	-1	-1	240	0,08	5	0,1147
20	+1	-1	0	240	0,08	10	0,1549
21	+1	-1	+1	240	0,08	15	0,2100
22	+1	0	-1	240	0,12	5	0,0837
23	+1	0	0	240	0,12	10	0,1311
24	+1	0	+1	240	0,12	15	0,2051
25	+1	+1	-1	240	0,16	5	0,0894
26	+1	+1	0	240	0,16	10	0,1467
27	+1	+1	+1	240	0,16	15	0,2406

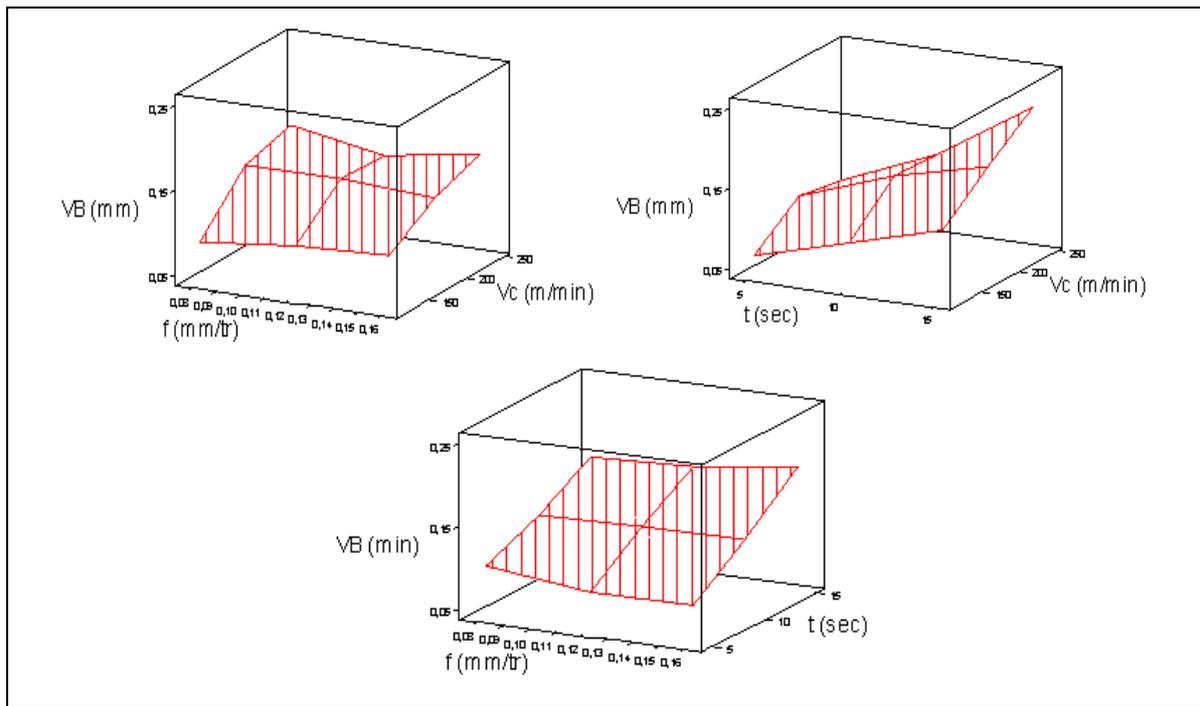
**Tableau V-9.** Résultats de l'usure en dépouille VB en fonction des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe

#### Analyse de régression : VB en fonction de Vc ; f et t

L'équation de régression est :

$$VB = - 0,0463 + 0,000479 Vc + 0,043 f + 0,00852 t$$

$$R^2 = 84,5\%$$



**Figure V-7.** *VB en fonction de Vc, f et t*

Source	dL	SC séq.	CM ajust	F-value	P-value
A (Vc, m/min)	2	0,0169581	0,0084790	81,52	0,000
B (f, mm/tr)	2	0,0001714	0,0000857	0,82	0,473
C (t, sec)	2	0,0327061	0,0163530	157,23	0,000
AB	4	0,0010537	0,0002634	2,53	0,123
AC	4	0,0035286	0,0008821	8,48	0,006
BC	4	0,0010760	0,0002690	2,59	0,118
Erreur	8	0,0008320	0,0001040		
Total	26	0,0563259			

**Tableau V-10.** Analyse de la variance (ANOVA) pour VB

Dans le tableau V-10, on peut voir que le facteur de temps d'usinage (F-value=157,23), le facteur de la vitesse de coupe (F-value=81,52) et l'interaction Vc-t ont une grande signification sur l'usure en dépouille VB. L'avance et les interactions Vc-f et f-t (P-value > 0,05) ne présentent pas une signification statistique sur l'usure en dépouille VB.

## V.5. Modèle de la durée de vie T en fonction des paramètres de coupe

Facteurs					Paramètres
Valeurs codifiées			Valeurs réelles		Durée de vie
N° Essais	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Vc (m/min)	f (mm/tr)	T (min)
1	-1	-1	120	0,08	76,00
2	-1	0	120	0,12	67,50
3	-1	+1	120	0,16	56,60
4	0	-1	180	0,08	40,00
5	0	0	180	0,12	37,00
6	0	+1	180	0,16	32,67
7	+1	-1	240	0,08	20,50
8	+1	0	240	0,12	20,00
9	+1	+1	240	0,16	18,34

**Tableau V-11.** Résultats des durées de vie pour VB=0,30mm et ap=0,15mm

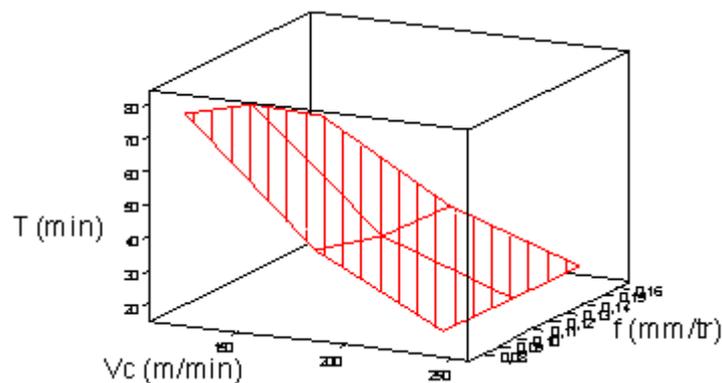
### Analyse de régression : T en fonction de Vc et f

L'équation de régression est :

$$T = 136 - 0,418 Vc - 167 f$$

$$R^2 = 94,1\%$$

La figure V-8 est construite pour illustrer les effets principaux de la vitesse de coupe et de l'avance sur la durée de vie T. Basé sur l'analyse précédente, les interactions de la vitesse de coupe et de l'avance sont statistiquement significatives sur la durée de vie. La figure V-8 montre que pour de faibles vitesses de coupe et de petites avances, la durée de vie de l'outil augmente.



**Figure V-8.** T en fonction de Vc et f

Source	dL	SC seq.	CM ajust	F-value	P-value
A (Vc, m/min)	2	3364,43	1682,22	57,41	0,001
B (f, mm/tr)	2	141,18	141,18	2,41	0,206
AB	4	117,21	117,21		
Erreur	0	0,00	0,00		
Total	8	3622,82			

**Tableau V-12.** Analyse de la variance (ANOVA) pour T

## V.6. Conclusions

De l'analyse des expressions des modèles mathématiques trouvés, les conclusions suivantes sont tirées :

- 1) L'augmentation de la vitesse de coupe mène à la diminution des efforts de coupe ;
- 2) L'accroissement de la section du copeau ( $f \times a_p$ ) conduit à une croissance des efforts de coupe ;
- 3) Il est à signaler que parmi ces facteurs ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ), la profondeur de passe est le facteur plus influent sur les efforts de coupe ;
- 4) L'usure en dépouille est très affectée par l'augmentation de la vitesse de coupe et du temps d'usinage ;
- 5) La durée de vie de l'outil est conditionnée par l'usure en dépouille admissible ;
- 6) Les modèles mathématiques relatifs aux efforts de coupe, aux rugosités, à l'usure et à la tenue de l'outil ont défini le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe sur les paramètres technologiques étudiés.

## **Conclusion générale**

L'étude du comportement du Nitrure de Bore Cubique (CBN) lors du tournage dur à sec de l'acier pour travail à chaud X38CrMoV5-1, traité à 50HRC, nous a permis d'une part, de mettre en évidence l'impact des paramètres de coupe (avance par tour, vitesse de coupe et profondeur de passe) sur les efforts et les pressions de coupe, sur la rugosité des surfaces usinées et sur la température dans la zone de coupe. Il est à signaler que la profondeur de passe affecte les efforts de coupe d'une manière considérable et que la rugosité est très sensible à la variation de l'avance. La vitesse de coupe a une énorme influence sur la température dans la zone de coupe.

D'autre part, ce travail a traité l'effet des conditions de coupe et du temps d'usinage sur l'usure de l'outil CBN. Cette dernière est étroitement liée à la vitesse de coupe. Ainsi les durées de vie de cet outil et les marges de conditions de coupe les mieux adaptées, ont été déterminées.

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

Cette étude a mis en valeur les procédures expérimentales retenues pour optimiser le processus de coupe relatif à cet acier.

Cette étude certifie qu'en tournage dur à sec de cet acier par un outil CBN 7020 et pour toutes les conditions de coupe utilisées, l'effort principal est l'effort radial, la pression dominante est la pression radiale et les rugosités réalisées sont très voisines de celles trouvées en rectification. C'est pour ces raisons que le CBN 7020 est un outil très performant en tournage dur des pièces traitées.

## Nomenclature

$a_p$	Profondeur de passe (mm) ;
$a_{cop}$	Epaisseur de copeau (mm) ;
$f$	Avance par tour (mm/tr) ;
$F_R$	Effort de coupe résultant (N) ;
$F_x (F_a)$	Effort de coupe axial (N) ;
$F_y (F_r)$	Effort de coupe radial (N) ;
$F_z (F_v)$	Effort de coupe tangentiel (N) ;
HB	Dureté Brinell ;
HRC	Dureté Rockwell ;
HV	Dureté Vickers ;
K	Effort spécifique de coupe (N/mm <sup>2</sup> ) ;
$K_a$	Effort spécifique de coupe axial (N/mm <sup>2</sup> ) ;
$K_r$	Effort spécifique de coupe radial (N/mm <sup>2</sup> ) ;
$K_B$	Largeur de cratère (mm) ;
$K_T$	Usure en cratère (mm) ;
$K_v$	Effort spécifique de coupe tangentiel (N/mm <sup>2</sup> ) ;
$P_b$	Puissance sur la broche (Watt) ;
$P_c$	Puissance de coupe (Watt) ;
$R^2$	Coefficient de détermination ;
$R_a$	Rugosité moyenne arithmétique ( $\mu\text{m}$ ) ;
$R_t$	Rugosité totale ( $\mu\text{m}$ ) ;
$R_{th}$	Rugosité totale théorique ( $\mu\text{m}$ ) ;
$R_z$	Profondeur moyenne de la rugosité ( $\mu\text{m}$ ) ;
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).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : M. Habak, Étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6, thèse de doctorat de Mécanique - Matériaux – Procédés. ENAM. N° d'ordre : 57 (2006).
- [2] : P. Dapsalmon, Machining of Hardened Ferrous Materials, G E superabrasifs France, (1994).
- [3] : D. Meyer, Plaquette PCBN haute performance pour les aciers durs, les fontes grises perlitiques et les fontes trempées, Secomax, (1994).
- [4] : G. Poulachon, aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. Application : usinabilité de l'acier 100Cr6, thèse de doctorat de Mécanique et Matériaux. ENSAM. N° d'ordre : 1999-14 (1999).
- [5] : G. Poulachon, B.P Bandyopadhyay, I.S. Jawahir, Sébastien Pheulpin, Emmanuel Seguin, the influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, international Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 43, pp. 139-144 (2003).
- [6] : S.Y. Luo, Y.S. Liao, Y.Y. Tsai, wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools, journal of Materials Processing Technology. Vol. 88 (1999), pp. 114-121.
- [7] : K.S. Neo, M. Rahman, X.P. Li, H.H. Khoo, M. Sawa, Y. Maeda, performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel, journal of Materials Processing Technology. Vol.140, pp. 326–331(2003).
- [8] : S. Benchiheb, L. Boulanouar, influence des Paramètres de Coupe sur la Tenue du CBN 7020 Lors du Tournage Dur, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007.
- [9] : G. C. Benga, A. M. Abrao, turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools, journal of Materials Processing Technology. Vol. 143–144, pp. 237–241(2003).
- [10] : M.A. Yallese, L. Boulanouar, N. Ouelaa, A/H. Rezaigia, N. Kribs, influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100Cr6 (60 HRC) avec le CBN, cmsm2005/ Tunisie N°:87.
- [11] : W. Chen, cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools, international Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 40, pp. 455-466 (2000).
- [12] : M.A. Davies, Y. Chou, C. J. Evans, on Chip Morphology, Tool Wear and Cutting Mechanics in Finish Hard Turning, national Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA on January 8,1996.
- [13] : G. Poulachon, A. L. Moisan, hard Turning : Chip Formation Mechanisms and Metallurgical Aspects, journal of Manufacturing Science and Engineering. Vol. 122, pp. 406-412(2000).

- [14] : R. Komanduri, T. Schroeder, B.F. Von Turkovich, J. Hazra, D.G. Flom, on the catastrophic shear instability in high speed machining of AISI 4340 steel, journal of Engineering for Industry. Vol. 104, pp. 121-131 (1982).
- [15] : B. Fnides, H. Aouici, M. A. Yallese, rugosité de surface et température en tournage dur de l'acier X38CrMoV5-1 usiné par une céramique mixte ( $Al_2O_3+TiC$ ), 2<sup>ème</sup> Congrès National de Mécanique – CNM2, 07-08. Nr (F37). Avril 2008.
- [16] : B. Fnides, H. Aouici, M. A. Yallese, cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic, ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. 2008. Nr.2 (70).
- [17] : A. Moisan, l'usinage. Les référentiels DUNOD, Conception en mécanique industrielle août 1998.
- [18] : M. Remadna, le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitrure de Bore Cubique), thèse de doctorat de Mécanique. ISAL. N° d'ordre : 00 22 (2001).
- [19] : J.M. Zhou, H. Walter, M. Andersson, J.E. Stahl, effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool, international Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol.43, pp. 301-305(2003).
- [20] : C. Pagès, comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition, thèse de doctorat de mécanique. N° D'ordre : 2003-37 (2003).
- [21] : CETIM, les états de surface- Description- Élaboration- Mesure, Note technique N°18, 1979.
- [22] : P. Martin, J. Richard, M. Veron, the influence of cutting speed variations on tool wear for optimal control of machining, annals of the CIRP. Vol. 28, N°1, pp. 7-11(1989).
- [23] : A. Ber, M. Goldblat, the influence of temperature gradient on cutting tool's life, annals of the CIRP. Vol. 381, N°1, pp. 69-73(1979).
- [24] : P. Depeyre, fabrication mécanique, licence et Technologie et Mécanique- Université de la Réunion, pp (20-23), 2004-2005.
- [25] : M.E. Merchant, mechanics of the metal cutting process I. Orthogonal cutting and a type 2 chip, journal of Applied Physics. Vol. 16, N° 5, pp. 267-275 (1945).
- [26] : J. Pomey, phénomènes de mécanique physique qui régissent la coupe des métaux, mécanique Matériau Électrique. Vol. 256, pp. 8 - 36 (1971).
- [27] : P. Gilormini, modélisation de la coupe des métaux, techniques de l'ingénieur, Traité Mécanique et Chaleur, B 7041, pp. 1 - 11 (1994).
- [28] : L. Puigsegur, caractérisation thermique d'un procédé d'usinage par tournage. Approche analytique et par identification de systèmes non entiers, thèse de doctorat de Mécanique, Université de Bordeaux I. N° d'ordre 2543 (2002).
- [29] : E.H. Lee, B.W. Shaffer, the theory of plasticity applied to the problem of machining, journal of Applied Physics. Vol.18, pp. 405-413 (1951).

- [30] : L. Gautier, étude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-CO par la caractérisation l'interface Outil- Copeau. A application a l'usinage a sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351, thèse de doctorat de Mécanique. N° d'ordre : 2004-41 (2004).
- [31] : E. M. Trent, métal cutting, 3ème édition, butterworth-Heinemann (1991).
- [32] : C. Le Calvez, etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone, thèse de doctorat de Mécanique et Matériaux. ENSAM. N° d'ordre : 1995-48 (1995).
- [33] : R. M'Saoubi, aspects thermiques et microstructuraux de la coupe. Application à la coupe orthogonale des aciers austénitiques, thèse de doctorat de Mécanique et Matériaux. ENSAM. N° d'ordre : 1998-09 (1998).
- [34] : G. Poulachon, A.L. Moisan, M. Dessoly, a contribution to the study of the cutting mechanisms in hard turning, *mécanique & Industries* 3, pp. 291–299 (2002).
- [35] : G. Poulachon, usinabilité des matériaux difficiles. Application aux aciers durcis, techniques de l'ingénieur. BM 7048, pp. 1 - 18 (2004).
- [36] : D.D. Reis, A.M. Abrão, the machining of aluminium alloy 6351, *journal Engineering Manufacture Vol.219 Part B* : (2005).
- [37] : I. Korkut, M. Boy, I. Kaaracan, U. Seker, investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters, *materials and Design*. Vol. 28, pp. 2329-2335 (2007).
- [38] : J.G. Lima, R.F. Ávila, A.M. Abrão, M. Faustino, J. Paulo Davim, hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel, *journal of Materials Processing Technology*. Vol.169, pp. 388–395(2005).
- [39] : E.Aslan, N. Camuşcu, B. Birgören, design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63HRC) with  $Al_2O_3 + TiCN$  mixed ceramic, *journal of Materials and Design*. Vol.28, pp. 1618-1622(2007).
- [40] : J. Paulo, L. Figueira, machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical technique, *journal of Materials and Design*. Vol.28, pp. 1186-1186(2007).