

## ETUDE DES EFFORTS ET DE LA TEMPERATURE DE COUPE LORS DE TOURNAGE DUR DE L'ACIER AISI 52100 PAR UN OUTIL CBN

Mohamed Athmane Yallese<sup>1</sup>, Lakhdar Boulanouar<sup>2</sup>,  
Nacer Zeghib<sup>2</sup>, Salim Belhadi<sup>1</sup>, Jean-François Rigal<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> LMS,

Université de Guelma, BP 401, Guelma 24000, Algérie.

<sup>2)</sup> LR3MI, Département Génie Mécanique,

Université Badji Mokhtar, Annaba 23000, Algérie.

<sup>3)</sup> LaMCoS, INSA de Lyon, 20 Avenue A. Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex, France.

Reçu le 28/01/2007 et accepté le 13/06/2007

### ملخص

في هذا البحث تم عرض النتائج الخاصة بدراسة قوى القطع والحرارة الناتجة خلال عملية تشغيل الصلب AISI 52100 بواسطة قلم من التبريد البوري المكعب، تأثير سرعة القطع، التغذية و عمق التمريرة وكذلك تأثير تآكل القلم على مختلف قوى القطع والحرارة الناتجة عن عملية التشغيل قد تمت دراستها. من خلال النتائج المحصل عليها تم اقتراح أولا نماذج رياضية لحساب قوى القطع بدلالة سرعة القطع، التغذية و عمق التمريرة وثانيا نماذج رياضية لحساب قوى القطع بدلالة تآكل قلم التبريد البوري المكعب.

**الكلمات المفتاحية:** قوى القطع؛ CBN؛ تآكل؛ التشغيل الصلب.

### Résumé

Dans ce travail nous présentons les résultats théoriques et expérimentaux d'une étude dynamique de la coupe des métaux concernant la mesure des efforts et la température de coupe lors de l'usinage de l'acier à roulement AISI 52100 (60HRC) avec un outil en nitrure de bore cubique CBN 7020. Cette étude, basé sur des essais unifactoriel et multifactorielle (vitesse de coupe, avance et la profondeur de passe) permis la mise en évidence de l'influence des conditions de coupe sur les composantes de l'effort 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. Nous nous sommes également intéressés à l'étude de l'influence de l'usure en dépouille de la partie active de l'outil sur l'évolution des efforts de coupe permettant la proposition d'une relation puissance entre l'effort de coupe et l'usure puisque ces deux paramètres s'influencent mutuellement. Enfin, une analyse des différents résultats obtenus été effectuée.

**Mots clés :** Efforts de coupe; pression spécifique de coupe; usinage dur; CBN; conditions de coupe.

### Abstract

In the present work, theoretical and experimental results of dynamics study of metal cutting are presented. This investigation is concerned with the cutting force and temperature measurement during machining of hardened bearing steel AISI 52100 using a Cubic Boron Nitride tool CBN7020. The experimental tests based on both unifactorial and multifactorial methods whose parameters are cutting speed, feed rate and depth of cut led to the determination of the cutting conditions effects on cutting force components. The treatment of the results obtained allowed us the deduction of various models, which express the relation between the studied parameters of machining and the cutting force components. A study of the influence of the flank wear on the evolution of cutting force has also been carried out in order to develop a power relation between the cutting force and the flank wear. Finally, an analysis of the different obtained results has been made.

**Key words:** Cutting force; Cutting specific pressure; hard machining; CBN; cutting conditions.

### 1. INTRODUCTION

L'usinage des aciers durcis a connu son développement essentiellement avec l'apparition de nouveaux matériaux de

coupe tels que les cermets, les céramiques et le nitrure de bore cubique. Ce dernier se distingue par une dureté élevée [1, 2, 3, 4] et une grande résistance à chaud. Il est à

Auteur correspondant: yalese@yahoo.fr (Mohamed Athmane Yallese)

souligner que le tournage dur peut se substituer ou être complémentaire à la rectification [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. L'étude des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance de coupe nécessaire pour réaliser l'usinage et permet aussi de dimensionner les organes de la machine et prévoir les déformations de la pièce pendant l'usinage. Plusieurs chercheurs [13, 14] considèrent également les efforts de coupe comme critère d'évaluation de l'usinabilité des matériaux.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail où sont présentés les résultats expérimentaux d'une étude des efforts et de la température de coupe générés, lors de l'usinage d'un acier à roulement AISI 52100 à l'état trempé (60 HRC) avec un outil en Nitrure de bore cubique CBN7020. Cette étude a permis la mise en évidence de l'influence des conditions de coupe sur les composantes de l'effort de coupe. Pour ce faire nous avons réalisé des essais basés sur la méthode de planification des expériences, où les paramètres variables sont : La vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe. Dans un autre temps nous avons jugé intéressant le suivi de l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps, en d'autres termes voir l'influence de l'usure de la partie active de l'outil sur l'évolution des efforts de coupe.

## 2. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Les opérations d'usinage, relatives aux essais sur les efforts de coupe ont été effectuées sur des éprouvettes rondes en acier traité de nuance AISI 52100, de 80mm de diamètre et de 250mm de longueur. À cause de sa résistance élevée à l'usure, l'acier AISI 52100 est préconisé surtout pour la fabrication de billes, de rouleaux, de bagues et de cages de roulements. Il est également employé dans la mise en forme à froid comme matrices de formage, cylindres de laminoirs et revêtements d'usure [15]. Sa composition chimique est donnée comme suit :

1,05%C ; 0,38%Mn ; 0,21%Si ; 0,03%P ; 0,009%S ; 0,028%Cu ; 1,41%Cr ; 0,21%Ni. À l'acquisition, la dureté de l'acier avant traitement thermique était de 285 HB. En observant les recommandations du fournisseur, une trempe à 850°C suivie d'un revenu à 220°C ont conduit à une dureté recherchée de 60HRC. Un tour de marque TOS TRENCIN, modèle SN40, d'une puissance de 6,6 kW sur broche a été utilisé pour les opérations d'usinage. Les plaquettes de coupe utilisées sont amovibles et de forme carrée avec inserts CBN en coin ayant la désignation SNGA 12 04 08 et la composition chimique (57%CBN+ 35%TiCN+ 8% autres). Le porte outil est de désignation PSBNR2525K12 avec une géométrie de la partie active matérialisée par les angles suivants:  $\chi_r = 75^\circ$ ;  $\alpha = 6^\circ$ ;  $\gamma = -6^\circ$ ;  $\lambda = -6^\circ$ .

Pour la mesure des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre qui se compose d'un outil équipé de capteurs piézoélectriques, d'un transmetteur qui permet l'enregistrement sélectif des efforts de coupe et d'un amplificateur de mesure à 4 canaux. L'acquisition des données sur PC se fait par une interface analogique Black Star I/O 2308 via un câble RS232 (Fig. 1). Un pyromètre à IR, modèle Rayner 3I, a servi pour l'acquisition à distance des mesures des températures dans la zone de coupe. L'étendue de mesure de la température de cet équipement est de  $-30^\circ\text{C}$  jusqu'à  $1200^\circ\text{C}$  et couvre les émissivités de 0,10 à 1,00. Le suivi de l'usure a été effectué à l'aide d'un microscope optique du type HUND (W-AD), équipé d'une camera CCD.

Les essais de coupe ont été réalisés sans lubrification et dans les conditions de coupe suivantes :

$$0,08 \leq f \leq 0,24 \text{ mm/tr;}$$

$$0,1 \leq a_p \leq 1 \text{ mm;}$$

et

$$60 \leq V_c \leq 350 \text{ m/min.}$$

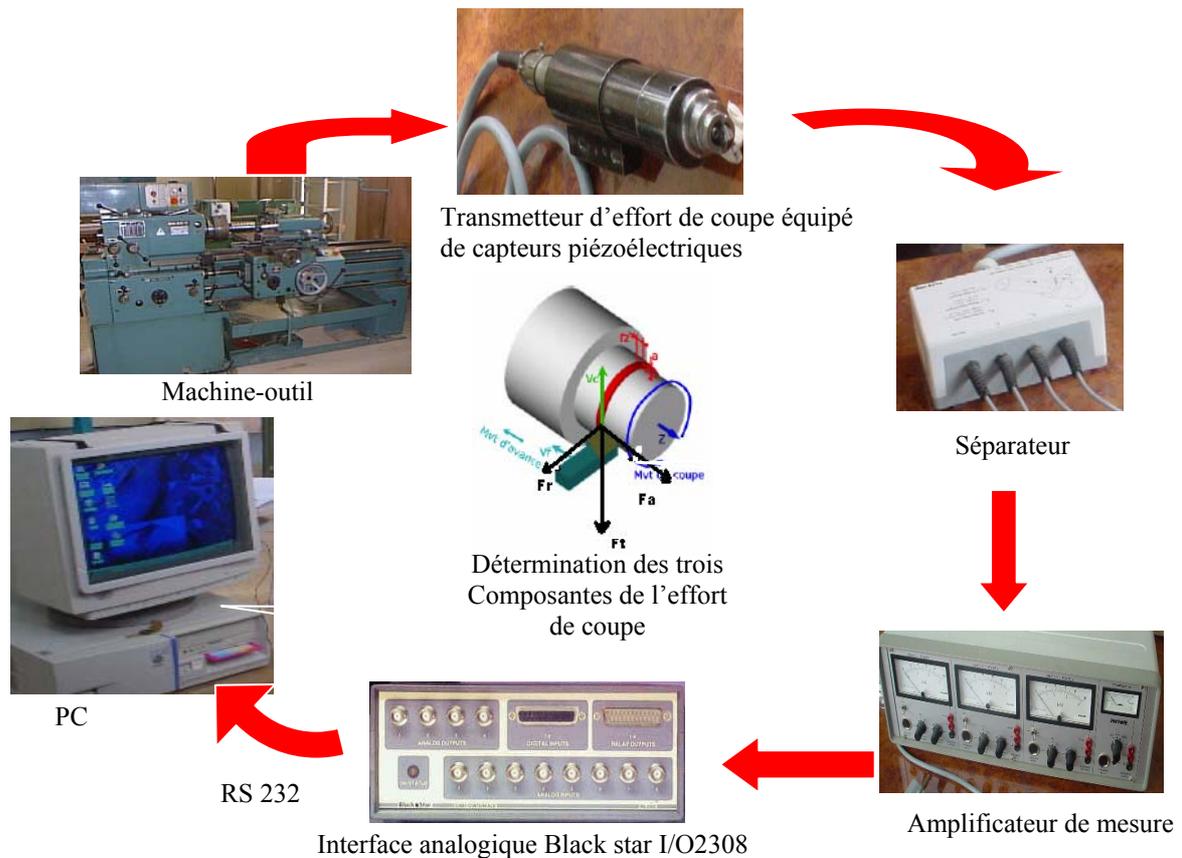


Figure 1: Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.

### 3. RÉSULTATS

#### 3.1 Evolution des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe

##### a) Influence de la vitesse de coupe

Les résultats présentés sur la figure 2 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ). La figure 2a montre qu'une augmentation de la vitesse conduit à une diminution des composantes de l'effort de coupe, ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui rend le métal travaillé plus plastique et par conséquent l'effort nécessaire pour la coupe diminue. Il est à noter aussi que les vitesses employées ne favorisent pas l'apparition de l'arête rapportée. En examinant l'allure des courbes, on

remarque que les efforts diminuent jusqu'à 180 m/min, au-delà de cette limite, ils se stabilisent légèrement. Cette diminution des efforts est d'autant plus marqué par les faibles vitesses de coupe. En effet, une élévation de la vitesse de 60 à 180 m/min, conduit à une diminution des trois composantes de l'effort ( $F_r$ ,  $f_a$ ,  $F_v$ ) respectivement de (18,4%, 22,3%, 23,7%).

Alors qu'une augmentation de la vitesse de 180 à 280 m/min, conduit à une diminution de (11,6% ; 9,47% ; 7,18%).

Les résultats montrent aussi que l'effort radial ( $F_r$ ) est prépondérant par rapport aux deux autres efforts ( $F_v$  et  $F_a$ ). Avec une profondeur de passe de 0,2 mm l'effort principal en tournage dur est bien l'effort radial. Ceci peut être expliqué par le travail de l'outil exclusivement avec son rayon du bec ( $r > a_p$ ).

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

Les résultats de l'influence de l'avance sur les efforts de coupe (Fig. 2b), montrent une augmentation des efforts avec l'augmentation de l'avance, puisque cette dernière accroît la section du copeau cisailée, d'où le métal résiste plus à la rupture et nécessite un effort plus grand pour l'enlèvement du copeau. On remarque que l'effort radial est prépondérant suivi par l'effort tangentiel et en dernier lieu par l'effort axial et cela pour toutes les avances testées. Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de l'avance sur les efforts de coupe sont comme suit: L'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.16 mm/tr, accroît les composantes de l'effort ( $F_r$ ,  $F_a$ ,  $F_v$ ) successivement de (33%, 51%, 58%). L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 mm/tr, conduit à une élévation de ( $F_r$ ,  $F_a$ ,  $F_v$ ) successivement de (50%, 65%, 77%).

### **c) Influence de la profondeur de passe**

La figure 2c 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 et cela à cause de l'augmentation de l'épaisseur (section) du copeau et par conséquent l'augmentation du volume du métal déformé, cette augmentation est presque linéaire. Aux petites valeurs de la profondeur de passe, l'effort radial est prépondérant. Au-delà de la valeur de  $a_p=0,4\text{mm}$  pour ( $F_v$ ) et  $0,6\text{mm}$  pour ( $F_a$ ), L'effort tangentiel et axial dépassent l'effort radial. Cela peut être expliqué par le travail de l'outil en tournage par son rayon du bec aux petites profondeurs de passe. Avec l'augmentation de  $a_p$ , la coupe se fait en dehors de la limite du rayon du bec de l'outil et la pièce présente une résistance à la pénétration de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et en particulier axial. Car la longueur de l'arête tranchante en contact avec la pièce

augmente, autrement dit l'outil ne travail plus par son rayon seulement.

Si on compare les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe et l'avance, on remarque que la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance. Avec un doublement de la profondeur de passe de (0,5 à 1) mm, on obtient presque à une multiplication par deux de l'effort de coupe, avec une augmentation de ( $F_r$ ,  $F_a$ ,  $F_v$ ) d'une valeur de (68%, 22%, 88%). La valeur de l'effort axial est très sensible à l'augmentation de la profondeur de passe.

## **3.2 Evolution des efforts spécifiques en fonction des conditions de coupe**

### **a) Influence de la vitesse de coupe**

La pression de coupe, aussi appelée effort spécifique, est une grandeur définie comme étant l'effort de coupe par unité de surface de coupe,  $K_c=F_v/(f.a_p)$ . La figure 3a illustre les courbes de l'évolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse ( $V_c$ ). Il ressort que l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution des pressions de coupe et cela en deux périodes d'évolution différentes.

- La première période décroissante qui correspond à un chargement important de l'arête de coupe. Les pressions enregistrées sont élevées dans cette zone, à titre d'exemple, à la vitesse de coupe  $V_c=60$  m/min on enregistre des pressions ( $K_{cr}$ ,  $K_{ca}$ ,  $K_{cv}$ ) de l'ordre de (8015,7 ; 4418,7 ; 6771,2) N/mm<sup>2</sup>. La fin de cette période conduit à la détermination de la vitesse minimale du domaine d'utilisation du couple outil-matière.

- La deuxième période est caractérisée par une plage où, les pressions de coupe se stabilisent, le décrochage se fait à partir de  $V_c=120$  m/min. En pratique cette zone constitue la plage optimale d'utilisation de l'arête de coupe, elle se termine par la détermination de la vitesse de coupe maximale. A la vitesse de coupe

$V_c=350\text{m/min}$  les pressions spécifiques sont à leurs bas niveaux, ce qui est préférable à l'outil, on enregistre des pressions ( $K_{cr}$ ,  $K_{ca}$ ,  $K_{cv}$ ) de l'ordre de (5781,25 ; 3000 ; 5025)  $\text{N/mm}^2$ .

Cela a pour effet de minimiser les contraintes qui provoquent les sollicitations et la rupture brusque de l'arête de coupe.

**b) Influence de l'avance**

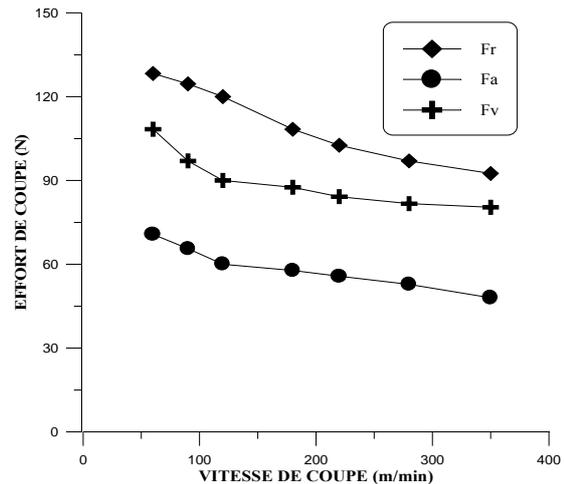
La figure 3b présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance ( $f$ ). On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance les pressions de coupe diminuent (Fig. 3b) et on obtient un comportement décroissant similaire à celui de la vitesse de coupe. Pour les faibles avances, on enregistre des pressions extrêmement élevées.

Avec une avance de 0,08 mm/tr, les pressions de coupe ( $K_{cr}$ ,  $K_{ca}$ ,  $K_{cv}$ ) sont de l'ordre de (7500 ; 3750 ; 5625)  $\text{N/mm}^2$ . Avec l'augmentation de l'avance jusqu'à 0,24 mm/tr les pressions chutent successivement de (50%; 44,8% ; 40,5%). Ici, un compromis reste à faire entre la diminution des pressions de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance.

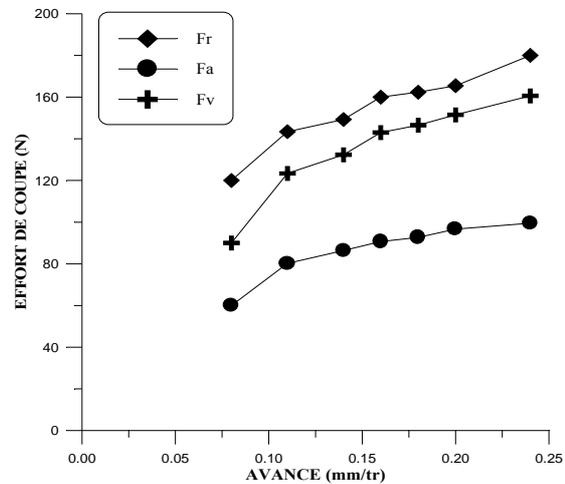
**c) Influence de la profondeur de passe**

La figure 3c illustre l'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe ( $a_p$ ). Avec l'augmentation de cette dernière, on remarque une diminution des pressions jusqu'à 0,3mm, au delà de cette valeur, on remarque une stabilité avec une légère évolution des pressions ( $K_{cv}$  et  $K_{ca}$ ). L'analyse des résultats montre qu'aux faibles valeurs de la profondeur de passe on enregistre des pressions élevées ( $a_p=0,1\text{mm}$  ;  $K_{cr}=9000\text{N/mm}^2$ ).

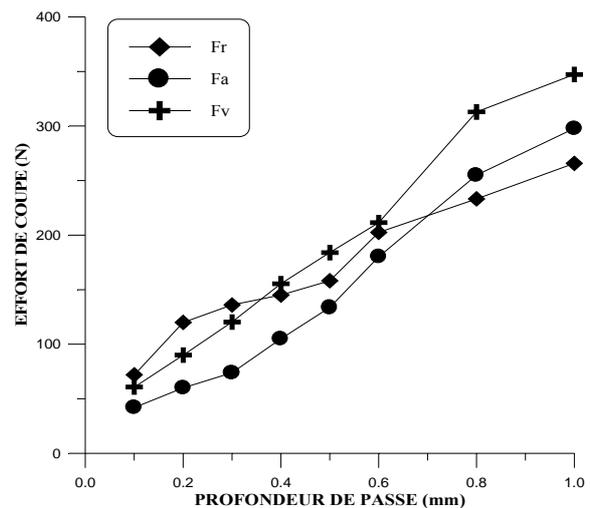
A cet effet, il est déconseillé de travailler aux faibles valeurs de  $a_p$ , parce que l'arête de coupe subit des pressions énormes qui peuvent l'endommager.



**a) Influence de la vitesse de coupe,  $a_p=0.2\text{mm}$ ;  $f=0.08\text{mm/tr}$**

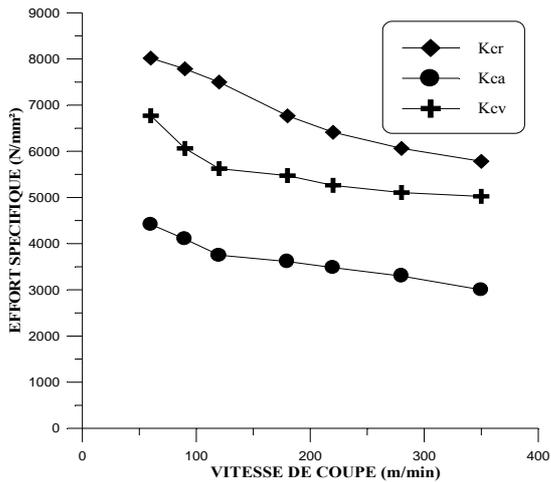


**b) Influence de l'avance,  $V_c=120\text{m/min}$ ;  $f=0.08\text{mm/t}$**

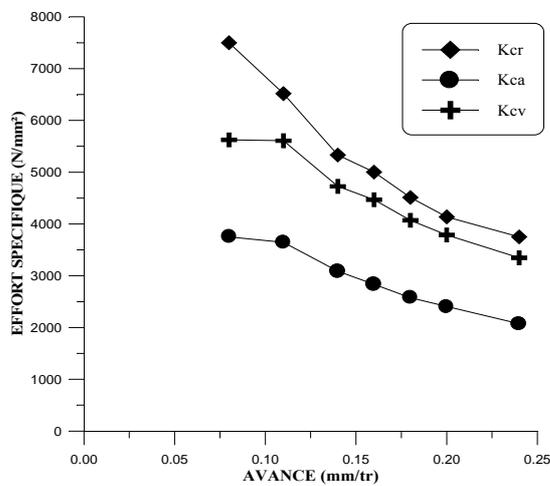


**c) Influence de la profondeur de passe,  $V_c=120\text{m/min}$  ;  $a_p=0.2\text{mm}$ .**

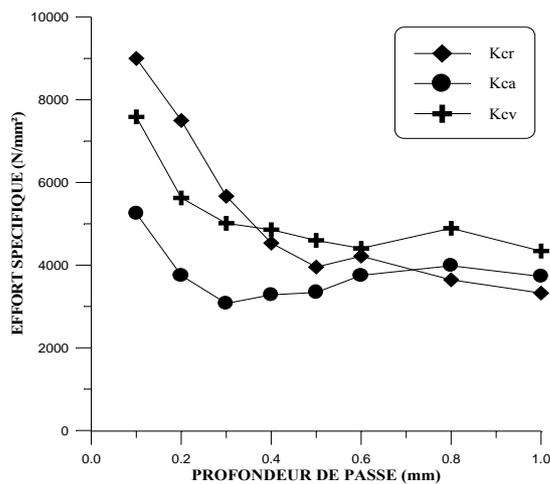
**Figure 2 (a, b, c): Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ).**



a) Influence de la vitesse de coupe,  $a_p=0.2\text{mm}$  ;  $f=0.08\text{mm/tr}$



b) Influence de l'avance,  $V_c=120\text{m/min}$  ;  $f=0.08\text{mm/tr}$



c) Influence de la profondeur de passe,  $V_c=120\text{m/min}$  ;  $a_p=0.2\text{mm}$ .

Figure 3 (a, b, c): Evolution des efforts spécifiques en fonction de paramètres d'usinage ( $V_c, f, a_p$ ).

### 3.3 Influence des éléments du régime de coupe (méthode multifactorielle)

Les résultats de la variation des composantes des efforts de coupe et de la pression spécifique de coupe pour les différentes combinaisons des éléments du régime de coupe ( $V_c, f, a_p$ ) sont représentés sur le tableau 1. Ce plan d'expérience est nécessaire pour la détermination des modèles mathématiques des efforts de coupe en fonction des éléments du régime de coupe ensembles.

L'analyse des résultats du tableau 1 montre que les valeurs maximales des efforts de coupe sont enregistrées durant le travail avec le régime 4. Les valeurs minimales des efforts de coupe correspondent au régime 5. Par contre, les pressions de coupe minimales sont enregistrées avec le régime 8. Sur le plan pratique, l'influence des éléments du régime de coupe sur les efforts est la suivante :

- La variation de la vitesse de coupe dans l'intervalle [90-180] m/min, conduit à une diminution des efforts de coupe ( $F_r, F_a, F_v$ ) successivement de (15,7% ; 7% ; 14,8%) pour le régime 1 et 5.

- La variation de la profondeur de passe dans l'intervalle [0,2-0,6] mm, conduit à une augmentation des efforts de coupe ( $F_r, F_a, F_v$ ) successivement de (63,5% ; 213% ; 116%) pour le régime 1 et 3. On remarque clairement que l'effort axial prédomine, suivi par l'effort axial et en dernier lieu par l'effort radial.

- La variation de l'avance dans l'intervalle [0,08-0,2] mm/tr, conduit aussi à un accroissement des efforts de coupe ( $F_r, F_a, F_v$ ) successivement de (25,9% ; 22,4% ; 47,7%) pour le régime 1 et 2.

- La variation de la vitesse de coupe dans l'intervalle [90-180] m/min, conduit à une diminution des efforts de coupe ( $F_r, F_a, F_v$ ) successivement de (15,7% ; 7% ; 14,8%) pour le régime 1 et 5.

**Tableau 1:** Efforts et pressions de coupe en fonction des combinaisons des du régime de coupe.

Essais	Paramètres de coupe			Efforts de coupe			Pressions de coupe		
	F (mm/tr)	a <sub>p</sub> (mm)	Vc (m/min)	Fr (N)	Fa (N)	Fv (N)	Kr (N/mm <sup>2</sup> )	Ka (N/mm <sup>2</sup> )	Kv (N/mm <sup>2</sup> )
1	0.08	0.2	90	132.24	71.08	106.25	8265	4442.5	6640.62
2	0.2	0.2	90	166.5	87	157	4162.5	2175	3925
3	0.08	0.6	90	216.24	222.5	230.44	4505	4635.41	4800.83
4	0.2	0.6	90	302.1	274	385	2517.5	2283.33	3208.33
5	0.08	0.2	180	111.5	66.1	90.5	6968.75	4131.25	5656.25
6	0.2	0.2	180	144.5	83.1	126.4	3612.5	2077.5	3160
7	0.08	0.6	180	206.4	202.2	215.4	4300	4212.5	4487.5
8	0.2	0.6	180	280.6	247.7	356.4	2338.33	2064.16	2970

- La variation de la profondeur de passe dans l'intervalle [0,2-0,6] mm, conduit à une augmentation des efforts de coupe (Fr, Fa, Fv) successivement de (63,5% ; 213% ; 116%) pour le régime 1 et 3. On remarque clairement que l'effort axial prédomine, suivi par l'effort axial et en dernier lieu par l'effort radial.

- La variation de l'avance dans l'intervalle [0,08-0,2] mm/tr, conduit aussi à un accroissement des efforts de coupe (Fr, Fa, Fv) successivement de (25,9% ; 22,4% ; 47,7%) pour le régime 1 et 2.

### 3.4 Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure

Les figures 4 à 7 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de l'usure lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 avec le CBN7020 et cela pour deux vitesses de coupe testées. Il ressort que les composantes de l'effort de coupe augmentent en fonction du temps d'usinage. Ceci est une conséquence de l'évolution de l'usure sur les surfaces en dépouille et d'attaque de l'outil, puisque dans ce cas la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente ce qui augmente les forces de frottements qui s'ajoutent aux efforts de coupe. L'analyse

des courbes à la vitesse de 180 m/min, montre que l'évolution des efforts en fonction du temps et de l'usure, passe par trois périodes. La première période est d'une durée de coupe de 10 minutes ce qui correspond à une usure VB de 0,175mm. Les efforts de coupe (Fr, Fa, Fv) augmentent successivement d'une valeur de (33,33% ; 25% ; 9,5%). La deuxième période varie de 10 à 22 minutes d'usinage, ce qui correspond à une augmentation de l'usure VB de 0,175 à 0,3 mm. Cela a pour effet d'augmenter Les efforts de coupe (Fr, Fa, Fv) successivement d'une valeur de (11,11% ; 16,2% ; 16%). On remarque clairement que durant cette période l'évolution des efforts de coupe est moins accentuée que la première période, sauf pour la composante tangentielle. La troisième période est caractérisée par une évolution rapide de l'usure VB, qui passe d'une valeur de 0,3 à 0,41 mm et cela dans une période qui varie de 22 à 32 minutes. Alors les efforts de coupe se trouvent dans leur haut niveau avec une augmentation de (50% ; 26,3% ; 10,3%). Si on compare les valeurs des composantes de l'effort de coupe au début et à la fin de l'usinage et cela durant une période d'usinage de 32

minutes. On remarque que les efforts (Fr, Fa, Fv) ont augmenté successivement de (150% ; 135% ; 52%).

A la vitesse de coupe maxi de 350 m/min, L'outil CBN s'use rapidement à cause des frottements intenses et des températures élevées, ce qui a pour effet d'augmenter les efforts de coupe. Après 1 min de travail, l'usure VB atteint la valeur de 0,19 mm, on enregistre des efforts de (373; 358; 234). Au-delà de l'usure admissible [VB]=0,3 mm et après 2 min de travail les efforts augmentent de (44,8% ; 26,5% ; 12,4%). En comparant les valeurs des composantes de l'effort de coupe au début et à la fin de l'usinage, on enregistre une augmentation de (Fr, Fa, Fv) d'une valeur de (107,1% ; 210,7% ; 45,16%). A partir des résultats du suivi de l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps et de l'usure, on peut tirer les remarques suivantes:

- L'augmentation de l'usure du matériau de coupe induit une augmentation des efforts de coupe et cela pour les deux vitesses testées.
- Avec les conditions de coupe utilisées, l'effort principal est l'effort de coupe radial suivi par l'effort axial, par contre l'effort tangentiel est moins sensible à l'augmentation de l'usure.
- Le changement des allures des courbes des évolutions des efforts se produit a peu près simultanément avec celui de régime de l'usure (surtout pour  $V_c=180\text{m/min}$ ). Ce qui indique, que ces deux phénomènes sont corrélés entre eux.

### 3.5 Evolution de la température de coupe

Le but de suivre l'évolution de la température de coupe, n'étant pas d'étudier systématiquement les variations de cette dernière en fonction de tous les paramètres de base de la coupe. Nous avons choisi d'observer essentiellement la variation de la température en fonction de la vitesse de coupe. Cette dernière semble être l'un des paramètres les plus

déterminants sur la température de coupe et sur l'usure des outils [16, 17, 18]. Lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 par le CBN, la coupe est caractérisée par un écoulement de copeau très chaud de couleur rouge (Fig. 8). Cette quantité de chaleur dégagée est le résultat des frottements, des déformations plastiques intenses et des cisaillements. La majeure partie de la quantité de chaleur est évacuée à travers le copeau.

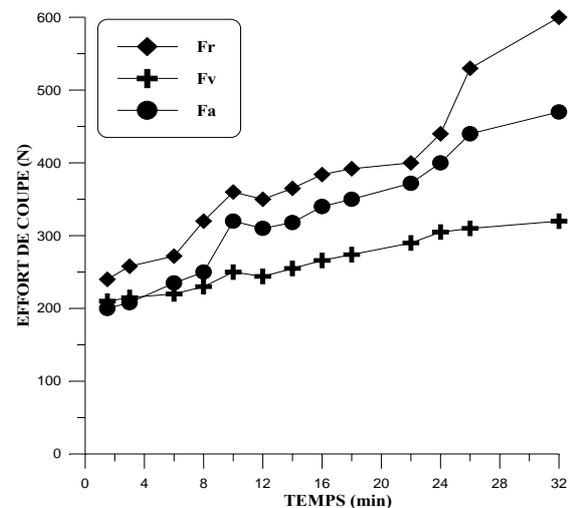


Figure 4: Evolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage  $V_c = 180\text{ m/min}$  ;  $a_p = 0,5\text{ mm}$  ;  $f = 0,08\text{ mm/tr}$ .

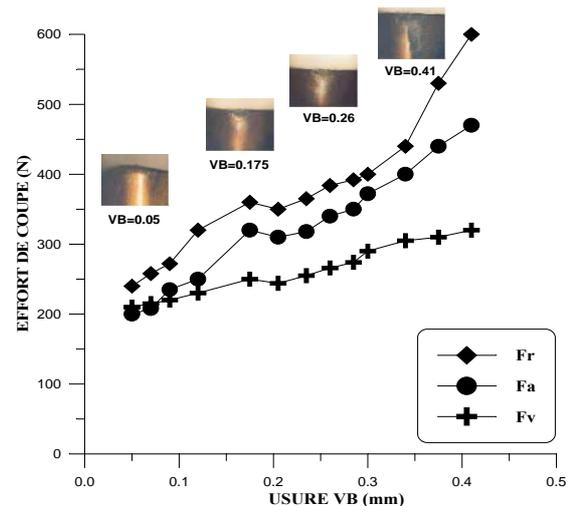
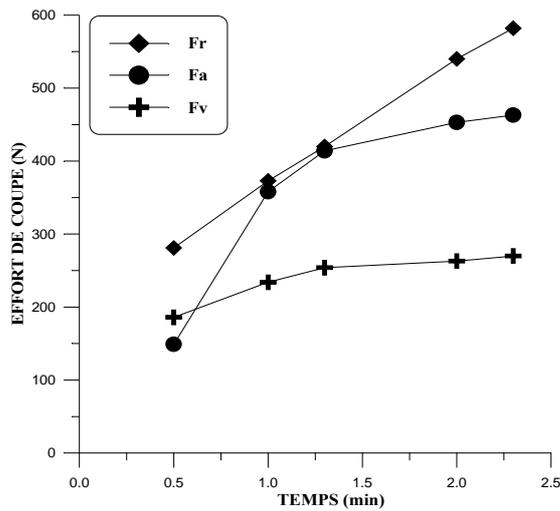
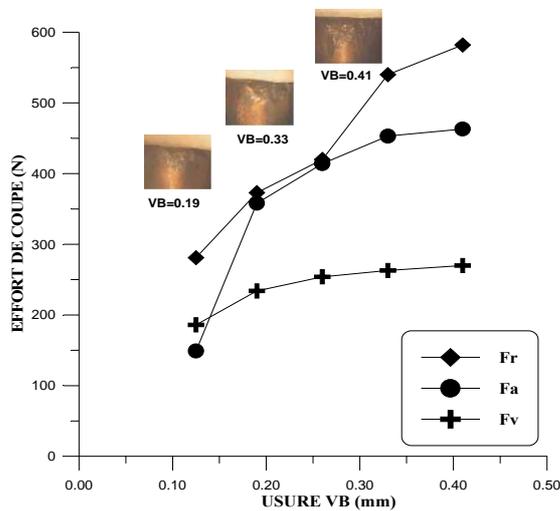


Figure 5: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure  $V_c = 180\text{ m/min}$  ;  $a_p = 0,5\text{ mm}$  ;  $f = 0,08\text{ mm/tr}$ .



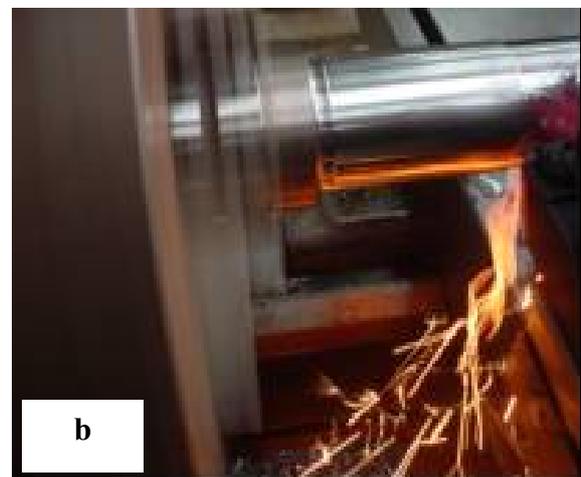
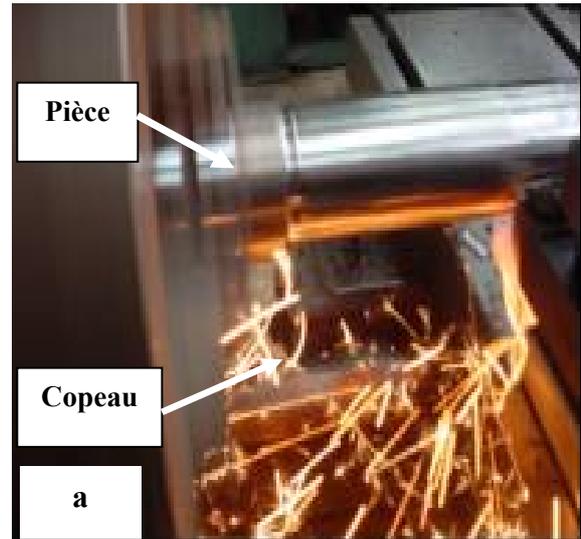
**Figure 6:** Evolution de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage  $V_c = 350$  m/min;  $a_p = 0,5$  mm;  $f = 0,08$  mm/t.



**Figure 7:** Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure  $V_c = 350$  m/min;  $a_p = 0,5$  mm;  $f = 0,08$  mm/tr.

Ceci s'explique par le fait que le copeau en plus du frottement, il subit des déformations plastiques très intenses pour un volume relativement plus faible par rapport à celui de la pièce et de l'outil. A cet égard, les mesures des températures par pyromètre infrarouge indiquent qu'à la vitesse de 220 m/min, la  $t^\circ$  du copeau est de  $890^\circ\text{C}$ , sur la surface d'attaque de l'outil est de  $150^\circ$  et pour la pièce elle ne dépasse pas les  $60^\circ$ . Le rapport  $t^\circ\text{copeau}/t^\circ\text{pièce}$  est d'environ 15 ce qui montre clairement que la quantité de chaleur produite est dégagée par le copeau, les échanges thermiques avec la pièce sont minimes. Cette observation est

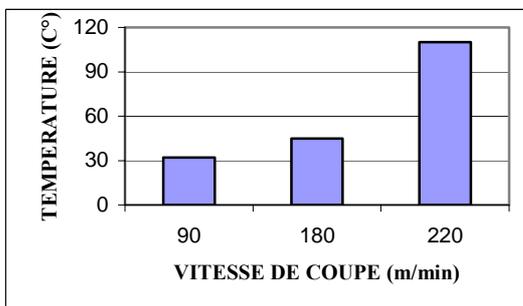
confirmée dans la littérature par plusieurs auteurs [10, 19, 20].



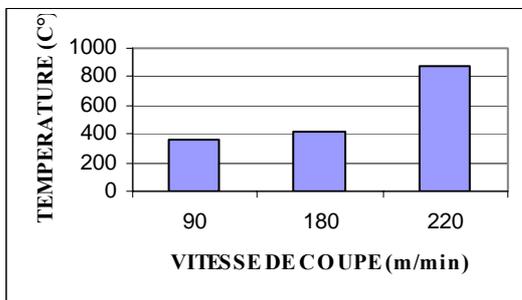
**Figure 8:** Évacuation de la chaleur par le copeau à différentes phases (220 m/min).

La figure 9 présente les valeurs des températures (outil, copeau, pièce) enregistrées durant l'usinage de l'acier AISI 52100 pour un temps de coupe de

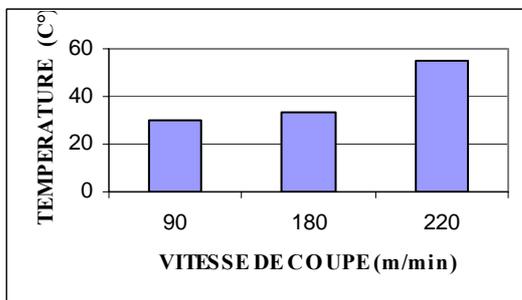
2min. Il ressort que l'augmentation de la vitesse de coupe engendre une augmentation des frottements et des déformations ce qui élève la température dans la zone de coupe. La majorité de la chaleur dégagée du processus de coupe est évacuée par le copeau, les échanges thermiques avec la pièce sont minimes. Cela a pour effet d'éviter la dilatation thermique de la pièce, c'est à dire qu'elle ne sera pas affectée thermiquement. En pratique, les conséquences de l'influence de la vitesse de coupe sur la température sont comme suit :



a) Température de coupe sur la face d'attaque de l'outil



b) Température de coupe sur le copeau



c) Température de coupe sur la pièce usinée

**Figure 9 (a, b, c):** Température de coupe en fonction de la vitesse de coupe pendant 2min d'usinage;  $a_p=0,5mm$  et  $f=0,08mm/tr$

➤ Une élévation de la vitesse de coupe de 90 à 180 m/min, conduit à une élévation de la température (outil, copeau, pièce) respectivement de (40,6% ; 14,4% ; 10%).

➤ Une élévation de la vitesse de coupe de 180 à 220 m/min, conduit à une élévation de la température (outil, copeau, pièce) respectivement de (144% ; 107,1% ; 66,6%).

#### 4. DISCUSSION

##### 4.1 Modèles de l'effort de coupe en fonction des éléments du régime de coupe

Le traitement des résultats expérimentaux obtenus au tableau 1 a permis la détermination des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre les différentes composantes de l'effort de coupe et les éléments du régime de coupe ( $V_c, f, a_p$ )(Tab. 2).

**Tableau 2 :** Modèles de l'effort en fonction des éléments du régime de coupe.

Matériau de coupe	variables	Modèles	R <sup>2</sup>
CBN 7020	f, a <sub>p</sub> , V <sub>c</sub>	$Fr = e^{7.18306} f^{0.30861} a_p^{0.5386} V_c^{-0.1561}$	0.992
		$Fa = e^{7.0083} f^{0.22988} a_p^{1.02379} V_c^{-0.1135}$	0.980
		$Fv = e^{7.97064} f^{0.47511} a_p^{0.81351} V_c^{-0.13824}$	0.990

L'analyse des modèles mathématiques (Tableau 2), permet de définir avec plus de précision les tendances ainsi que les degrés d'influence des différents facteurs du régime de coupe ( $V_c, f, a_p$ ), sur les trois composantes de l'effort de coupe. A cet effet, l'analyse des exposants des différents modèles trouvés fait sortir que l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à la diminution des efforts de coupe, alors que l'augmentation de la section du copeau ( $f \times a_p$ ) contribue à l'accroissement des efforts. D'autre part,

le classement des exposants des différents modèles trouvés en valeur absolue exprime le degré d'influence de chaque facteur des éléments du régime de coupe sur les efforts. Par conséquent la plus grande influence est réservée à la profondeur de passe suivie par l'avance, par contre la vitesse de coupe a une influence relativement faible. Les coefficients de détermination des différents modèles sont élevés et convergent vers l'unité ce qui indique qu'ils sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux. L'intérêt industriel des modèles mathématiques trouvés est de taille car ils permettent la détermination des conditions de coupe optimales et donnent des renseignements précieux sur le processus de coupe.

#### 4.2 Modèles de l'effort de coupe en fonction de l'usure

Le traitement des résultats expérimentaux obtenus des figures 5 et 7 a permis la détermination des modèles mathématiques sous forme d'équation puissance qui expriment la relation entre les différentes composantes de l'effort de coupe et l'usure VB (Tab. 3).

**Tableau 3:** Modèles de l'effort de coupe en fonction de l'usure

Variable	Modèles	R <sup>2</sup>
180m/min	$F_r = 676.8VB^{0.3686}$	0.8856
	$F_a = 361.37VB^{0.2011}$	0.9038
	$F_v = 606.66VB^{0.3952}$	0.9581
350m/min	$F_r = 1026.4VB^{0.6223}$	0.9828
	$F_a = 1245.6VB^{0.9133}$	0.8105
	$F_v = 370.22VB^{0.3078}$	0.9098

L'intérêt industriel de ces modèles est de taille car ils permettent, pour des conditions de coupe déterminées de suivre l'usure de l'outil à partir de l'évolution des efforts de coupe.

## 5. CONCLUSION

L'étude des efforts de coupe réalisée dans ce travail permet de mieux comprendre ce phénomène en tournage dur et cela dans le but d'avoir une meilleure stabilité du système usinant. Les résultats des efforts et de la pression de coupe en fonction des conditions de coupe permettent de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant face à l'acier étudié. Cette démarche appelée couple outil-matière, permet de définir un domaine de fonctionnement correct de l'outil. Aussi l'étude de la variation des efforts de coupe en fonction de l'usure permet de donner des informations sur l'état de l'arête de coupe en terme d'usure, ce qui est très important sur le plan pratique pour les applications de surveillance automatisée de la coupe. La majeure partie de la chaleur générée lors de la coupe est principalement dissipée avec le copeau réduisant substantiellement le chauffage de la pièce et de l'outil, à la vitesse de 220 m/min, le rapport  $T^{\circ}_{\text{copeau}}/T^{\circ}_{\text{pièce}}$  est de 15.

On dernier lieu on peut dire que l'introduction des outils CBN a révolutionné les méthodes d'usinage en fournissant une alternative efficace et économique à la rectification des aciers durs. Toutefois, en raison du coût de ce matériau d'outil, un bilan économique précis des avantages induit par son utilisation est nécessaire avant de décider de son application industrielle. Ce travail intéresse toutes les entreprises d'usinage, du fait qu'actuellement le CBN est en pleine évolution, suite à son apport technico-économiques remarquable. Par conséquent les résultats obtenus, peuvent être exploités par les entreprises de fabrication mécanique.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein des laboratoires LMS et LR3MI dans le cadre d'un projet de recherche autorisé par le Ministère Algérien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique sous le code J2401/03/80/06 (Université de Guelma). Les auteurs remercient le MESRS pour l'aide financière à l'acquisition du dynamomètre, du pyromètre infrarouge et du matériel de microscopie.

## REFERENCES

- [1] G. Poulachon, A. Moisan, *Performance evaluation on hardened steel-PCBN tool pair in high speed turning*, Matériaux et Techniques, 1-2 (2003) p.23-34.
- [2] www.trametal.com, *Usinage dur et à grande vitesse: PCD et CBN deviennent tenaces*, La Revue Technique du Travail des Métaux, 2003, p.7-12.
- [3] S.Y. Luo, Y.S. Lias, Y.Y. Tsai, *Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools*, Journal of Materials Processing Technology 88 (1999) p.114-121.
- [4] Y. Kevin, J.C. Evans, *Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting*, Wear 225-229 (1999) p.234-245.
- [5] Bedrin C. et Roumesy B., *Usinage par outil coupant*, fascicule 1-2, INSA Lyon 1989.
- [6] J.L. Hug, *Tournage des métaux durs*, machine de production, 1995, p.17-19.
- [7] K. König, *Machining of hard materials*, Annals of the CIRP, 1984, p.417-427.
- [8] A.T. Nottre et P.J. Heat, *Usinage des métaux ferreux de grande dureté à l'aide de l'amborite*, machine-outil, N°386, 1981, p.166-167.
- [9] Kaufeld M. et S.torbaty S., *Rationalisation de l'usinage très grande vitesse*, Sofetec 1999.
- [10] F. GEISKOPF et col, *Usinage à grande vitesse*, ENS Cachan, LURPA, Déc 1999.
- [11] M.A. Yallese, L. Boulanouar et Belhadi S., *Etude de l'endommagement des outils de coupe en céramique noire et en CBN lors du tournage d'un acier durci*, Revue de Mécanique appliquée et théorique, Vol 1 N°5 déc 2003.
- [12] K.S. Neo, M. Rahman, X.P. Li, H.H. Khoo, M. Sawa and Maeda Y., *Performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel*, Journal of Materials Processing Technology, V140, Issues 1-3, 22 Sep 2003, p.326-331.
- [13] B. Amri, *Contribution à l'étude du comportement des matériaux modernes pour outils coupants*, Thèse, INSA Lyon, p.43-44, 1987.
- [14] F. Nabahani., *Wear mechanisms of ultra-hard cutting tools materials*, J. Mater. Process. Technol, V(115), (2001), p.1388-1394.
- [15] M.A. Yallese, L. Boulanouar, S. Belhadi, N. Kribes, J.F. Rigal, *Etude du comportement du CBN lors du tournage dur de l'acier AISI 52100*, CIFMA01, 02-04 mai 2006 syrie.
- [16] Poulachon.G, *Usinabilité des matériaux difficiles : application aux aciers durcis*. Techniques de l'ingénieur, BM7048, 2004.
- [17] M.A. Yallese, J.F. Rigal, K. Chaoui et L. Boulanouar, *The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 Steel (60HRC)*, Journal of engineering Manufacture, Proceedings of the IMechE part B, Vol. 219, (2005), p.35-55.
- [18] M. Zimmerman, M. Lahres, D.V. Viens, B.L. Loube, *investigation of the wear of cubic boron nitride Cutting tools using Auger electron spectroscopy and X-ray analysis by EPMA*, wear, vol. (207), 1997, p.241-249.
- [19] D. O'Sullivan, M. Cotterell, *Temperature measurement in single point turning*, J. Mater. Process. Tech., N° 118, (2001), p.301-308.
- [20] J. Wang., C.Z. Huang, W.G. SONG, *The effect of tool flank wear on the orthogonal cutting process and its practical implications*, Journal of Materials Processing Technology 142 (2003) p.338-346.

**NOMENCLATURE**

$V_c$	: Vitesse de coupe [m/min]	$\chi_r^\circ$	: Angle de direction principal [degré]
$f$	: Avance par tour [mm/tr]	$\alpha$	: Angle de dépouille [degré]
$a_p$	: Profondeur de passe [mm]	$\gamma$	: Angle d'attaque [degré]
$F_v$	: Effort de coupe tangentiel [N]	$\lambda$	: Angle d'obliquité d'arête [degré]
$F_a$	: Effort de coupe axial [N]	$r$	: Rayon de bec de l'outil [mm]
$F_r$	: Effort de coupe radial [N]	HB	: Dureté Brinell
KT	: Usure en cratère [ $\mu\text{m}$ ]	HRC	: Dureté Rockwell
$K_{cv}$	: Pression tangentielle de coupe [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	$R^2$	: Coefficient de détermination
$K_{ca}$	: Pression axiale de coupe [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	VB	: Usure en dépouille [mm]
$K_{cr}$	: Pression radiale de coupe [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	$T^\circ$	: Température de coupe [ $^\circ\text{C}$ ]