

INVESTIGATION EXPERIMENTALE SUR LES EFFORTS ET LA TEMPERATURE DE COUPE EN TOURNAGE DUR

M.A.yallesc¹, H.Bouchelaghem¹, S.Belhadi¹, K.Bouacha¹, N.Kribes¹

¹ Laboratoire mécanique et structures, Université de Guelma, BP 401, 2400 Guelma Algérie

Reçu le : 28/09/2006

Reçu sous forme révisée : 10/02/2006

Accepté le : 29/09/2007

RESUME

Le tournage dur, est une technique d'usinage récente dans son utilisation. Il se présente comme une alternative à la rectification, souvent longue et coûteuse. Afin de maîtriser le tournage dur et de rentabiliser son utilisation industrielle il est nécessaire d'étudier les phénomènes physiques qui accompagne cette technique d'usinage et de connaître les lois qui la régit. Pour cela nous présentons dans ce travail les résultats expérimentaux qui concerne l'influence des éléments du régime de coupe ainsi que l'usure en dépouille de l'outil sur les efforts et la température de coupe, générés lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D3 à l'état traité (60HRC) avec un outil en nitrure de bore cubique. La mesure des efforts de coupe a été réalisée par un dynamomètre à quartz type (KISTLER 9257B) qui permet d'enregistrer les trois composantes de l'effort de coupe dans les trois directions X, Y, Z en temps réel. La mesure de la température de coupe a été effectuée par un pyromètre à IR. Ce dernier permet l'acquisition à distance des mesures des températures dans la zone de coupe en temps réel.

Mots clés : Efforts de coupe, Température de coupe, Usinage dur, CBN, Acier dur.

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, nous usinons couramment des matériaux traités jusqu'à 70HRC en intérieur comme en extérieur, avec une précision dimensionnelle de 5 microns et un état de surface Ra inférieur à 0.2 microns [1]. L'usinage des aciers durcis a connu son développement essentiellement avec l'apparition de nouveaux matériaux de coupe tels que les céramiques et le nitrure de bore cubique. Ce dernier se distingue par une dureté élevée [2, 3, 4] et une grande résistance à chaud. Il est à souligner que le tournage dur avec l'outil CBN peut substituer ou être complémentaire à la rectification [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], il permet en outre d'avoir une meilleure précision, une meilleure finition et une meilleure intégrité de surface. Il résulte de ce procédé d'usinage moderne une qualité certaine avec des délais d'exécution plus courts et des coûts compétitifs [1]. 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 [12, 13] considèrent également les efforts de coupe comme un critère d'évaluation de l'usinabilité des matériaux.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail où sont présentés les résultats expérimentaux des efforts de coupe et de la température générée lors de l'usinage d'un acier fortement allié «AISI D3» à l'état traité (60 HRC) avec un outil en Nitrure de bore cubique.

2. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Les opérations d'usinage, relatives aux essais sur les efforts de coupe et de la température ont été effectuées sur des éprouvettes rondes en acier traité de nuance AISI D3, de 80 mm de diamètre et de 250 mm de longueur. A cause de sa résistance élevée à l'usure, l'acier AISI D3 connu aussi sous la dénomination X200Cr12 est préconisé surtout pour la fabrication des matrices et poinçon de découpage et d'emboutissage, filières d'étirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois, peigne à rouler les filets, etc. [14]. Sa composition chimique est donnée comme suit : 2%C ; 0,29%Mn ; 0,31%Si ; 0,011%P ; 0,009%S ; 1,41%Cr ; 0,259%Ni. A l'acquisition, la dureté de l'acier avant traitement thermique était de 250 HB. Après une trempe à 940° et un revenu à 280° la dureté de l'acier AISI D3 passe à 60HRC. Un tour de marque TOS TRENCIN, modèle SN40, d'une puissance de 6,6 KW sur la broche a été

utilisé pour les opérations de chariotage. Les plaquettes de coupe utilisées sont amovibles et de forme carrée avec inserts CBN en coin ayant la désignation SNGA 12.04.08, la composition chimique est de (57%CBN+ 35%TiCN + 8% autres). Le porte outil est de désignation CSBNR2525K12 avec une géométrie de la partie active matérialisée par la géométrie suivante:

$\chi_r = 75^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\gamma = -6^\circ$; $\lambda = -6^\circ$; $r = 0.8$ mm.

Pour la mesure des efforts de coupe on a utilisé un dynamomètre à quartz type (KISTLER 9257B) avec une gamme de mesure qui varie de -5 à 5 KN. Il permet d'enregistrer les trois composantes de l'effort de coupe dans les directions X, Y, Z en temps

réel (Figure1). Pour la mesure de la température nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge (Raynger 31). Le suivi de l'usure a été effectué à l'aide d'un microscope optique du type HUND (W-AD) équipée d'une caméra CCD, avec une précision de $1\mu\text{m}$. Les essais de tournage ont été réalisés sans lubrification et dans les conditions de coupe suivantes :

❖ V_c (variable): 30, 40, 55, 80, 110, 160, 220, 300, 420 m/min. $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm (Const).

❖ f (variable): 0.08, 0.14, 0.18, 0.2, 0.28 mm/tr. $V_c = 116$ m/min et $a_p = 0.1$ mm (Const).

❖ a_p (variable): 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.80, 1 mm. $V_c = 116$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr (Const).

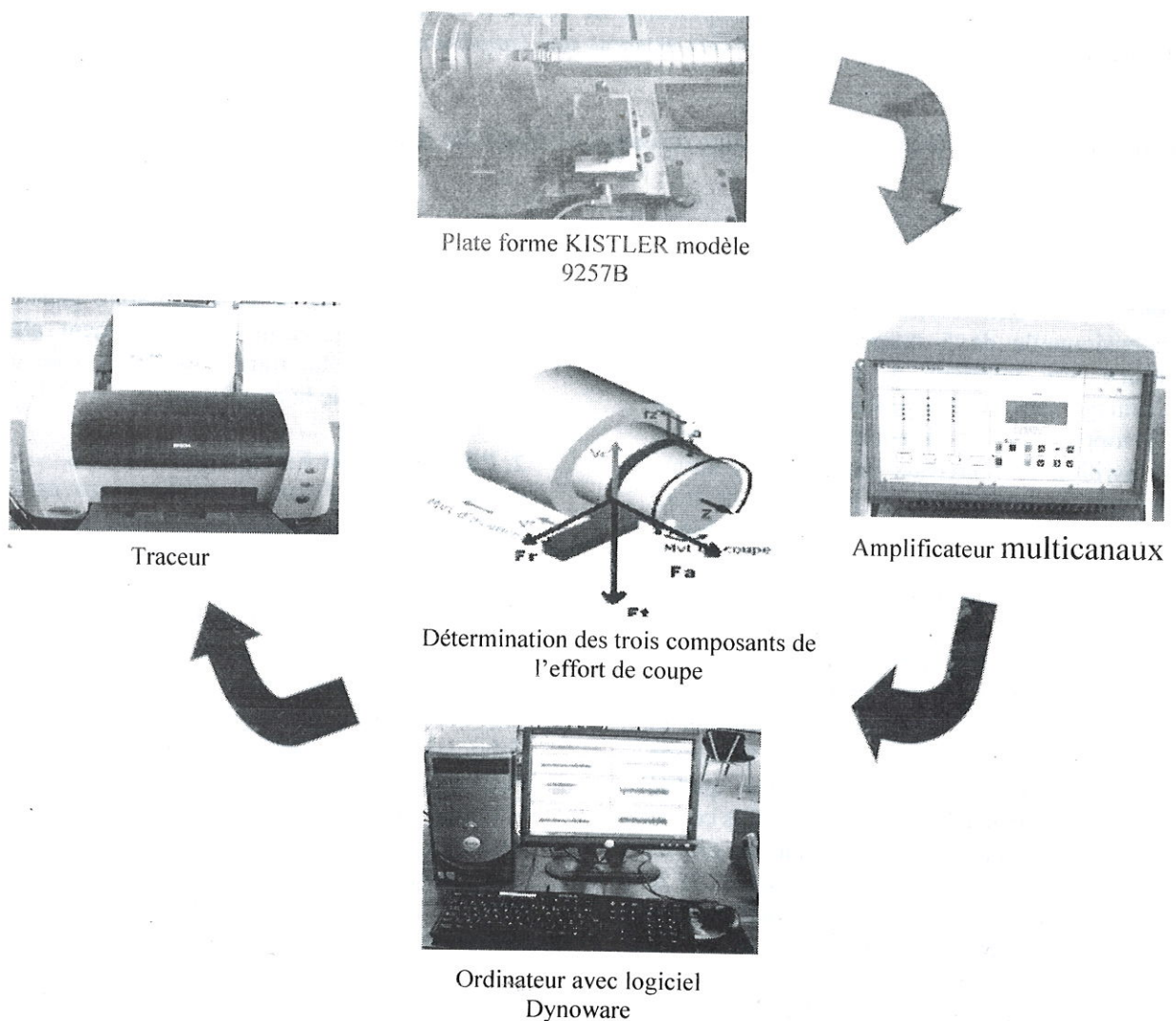


Figure 1: Chaîne de mesure des efforts de coupe.

3. RESULTATS DES EXPERIENCES

3.1 Évolution des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe

3.1.1 Influence de la vitesse de coupe

Les résultats présentés sur la figure 2 montrent que les efforts de coupe diminuent avec l'augmentation de V_c . Cela peut être expliqué par l'amélioration de la capacité de déformation du métal usiné et des conditions de frottement aux interfaces outil-pièce et copeau-outil. Avec l'accroissement de V_c , la température augmente dans la zone de coupe et rend le métal plus plastique, ce qui contribue à la diminution des efforts nécessaires à sa déformation. En examinant l'allure des courbes, on remarque que les efforts diminuent jusqu'à 80 m/min, au delà de cette limite, ils se stabilisent légèrement. Cette diminution des efforts est d'autant plus marquée par les faibles vitesses de coupe. En effet, une élévation de la vitesse de 30 à 80 m/min, contribue à une diminution des trois composantes de l'effort (F_r , F_a , F_v) respectivement de (46.9% ; 35.1% ; 37.5%). Alors qu'une augmentation de la vitesse de coupe de 80 à 420 m/min conduit à une diminution de (21.9% ; 33.1% ; 62.4%). Les résultats montrent aussi que l'effort radial (F_r) est prépondérant par rapport à (F_a et F_v). Avec $a_p = 0.1$ mm, l'effort principal 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 $\gamma = -6^\circ$.

3.1.2 Influence de l'avance

Les résultats présentés sur la figure 3 montrent que les efforts de coupe augmentent avec l'augmentation de l'avance, cela est dû à l'augmentation de la section droite du copeau cisailé, de même que le volume du métal déformé. Il en résulte que 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 0.18mm/tr, accroît les composantes de l'effort (F_r , F_a , F_v) successivement de (106.48% ; 54.43% ; 89.78%) l'augmentation de l'avance de 0.18 à 0.28 mm/tr, conduit à

une élévation de (F_r , F_a , F_v) successivement de (27.10% ; 11.94% ; 23.44%). A travers ces résultats on remarque que l'effort axial est moins sensible à l'augmentation de l'avance

3.1.3 Influence de la profondeur de passe

La figure 4 présente les résultats de l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe. L'analyse des résultats montre que l'augmentation de a_p conduit à une augmentation des efforts de coupe, cela à cause de l'accroissement de la section du copeau enlevé et par conséquent l'augmentation du volume du métal déformé. D'après la tendance de la courbe on remarque que l'effort radial est prépondérant par rapport aux deux autres efforts (F_a et F_v). Les conséquences sur le plan pratique de l'augmentation de la profondeur de passe sont comme suit : l'augmentation de la profondeur de passe de 0,05 à 1 mm, conduit à une augmentation des trois composantes de l'effort (F_r , F_a , F_v) respectivement de (418.62% ; 2617.65 % ; 854.53 %). On remarque que pour $a_p = 1$ mm 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 axial, car la longueur de l'arête tranchante en contact avec la pièce augmente. Autrement dit, l'outil ne travaille plus avec son rayon seulement. C'est pour cela que l'effort axial prédomine l'effort tangentiel.

La figure 5 présente un exemple de profils des trois composantes de l'effort de coupe obtenu par le logiciel (Dynoware) de pilotage de la plate forme Kistler.

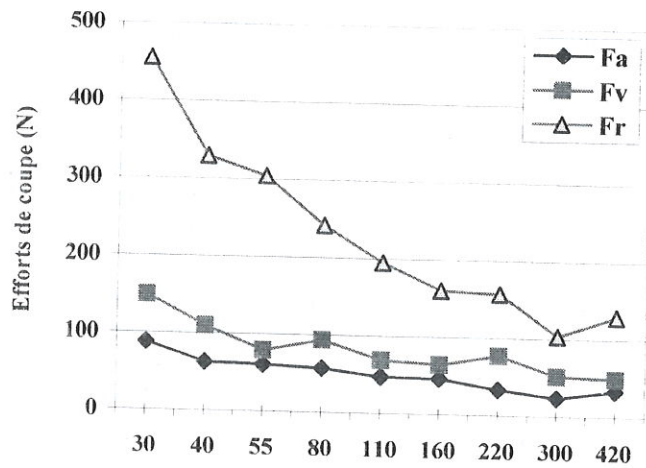


Figure 2: Évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse, $a_p = 0.1$ mm, $f = 0.08$ mm/tr.

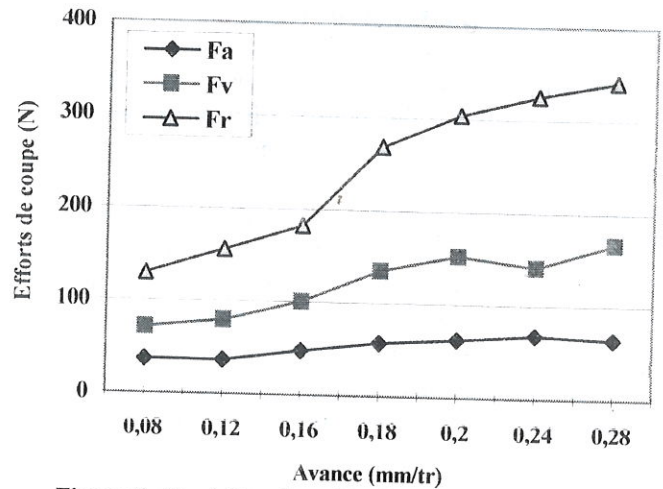


Figure 3: Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance, $V_c = 110$ m/min, $a_p = 0.1$ mm.

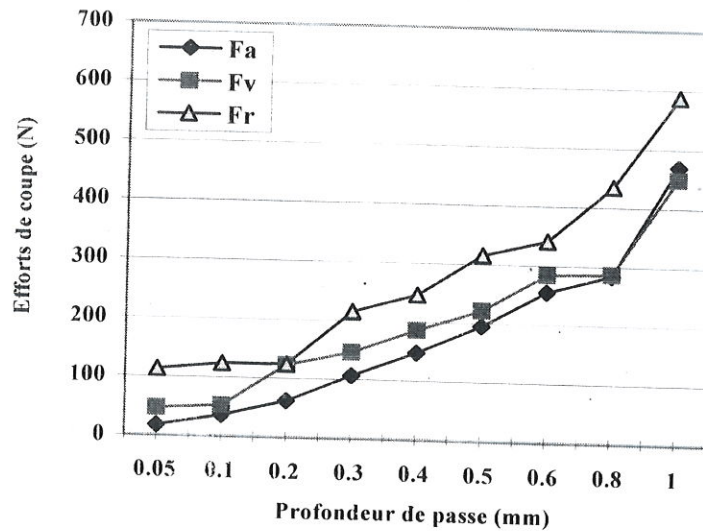
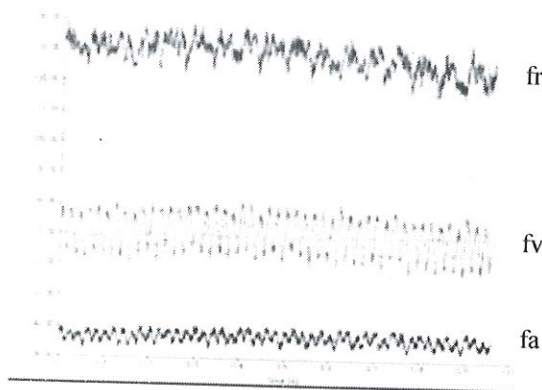
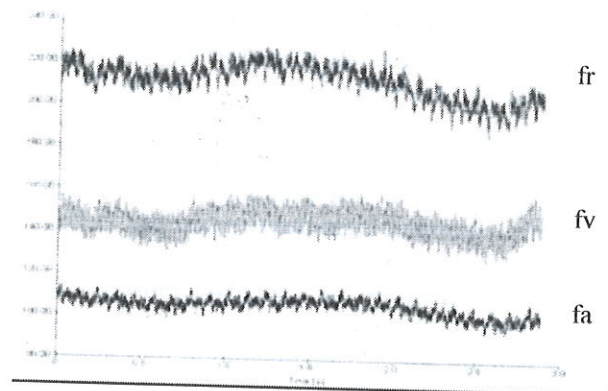


Figure 4: Évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe $V_c = 110$ m/min, $f = 0.08$



a) $f = 0.08$ mm/tr, $V_c = 110$ m/min, $a_p = 0.1$ mm



b) $f = 0.08$ mm/tr, $V_c = 110$ m/min, $a_p = 0.2$ mm

Figure 5: Exemple de profils des 3 composants de l'effort de coupe obtenu.

3.1.4 Influence de l'usure

Les figures (6 et 7) montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction du temps d'usinage et de l'usure. On remarque une augmentation des composantes de l'effort de coupe en fonction du temps d'usinage. Ceci est en raison de l'évolution de l'usure sur les deux surfaces d'attaque et de dépouille de l'outil. Cette usure augmente la surface de contact pièce-outil, ce qui provoque l'augmentation des forces de frottement et par conséquent les efforts de coupe.

L'analyse des résultats montre que la 1^{ère} étape est d'une durée de coupe de 6.5min qui correspond à une usure VB de 0.15mm. Les efforts de coupe (Fr, Fa et Fv) enregistrés sont respectivement de (137.82 ; 61.5 ; 85.22) N. La deuxième étape est de 6.5 à 26min d'usinage, l'usure VB augmente de 0.15 à 0.31 mm, ceci augmente les efforts de coupe (Fr, Fa et Fv) successivement de (87.96 % ; 39.77% ; 76.07%). On remarque que durant cette étape l'évolution des efforts de coupe est plus accentuée par rapport à la première étape. La troisième étape est caractérisée par une évolution rapide de l'usure VB, qui passe d'une valeur de 0.31 à 0.42 mm et cela dans un intervalle de 26 à 32.5 minutes d'usinage. A ce stade les efforts de coupe atteignent une valeur maximale avec une augmentation de (20.47 % ; 19.11 % ; 4.84 %). Si l'on compare les efforts de coupe au début et à la fin de l'usinage, on constate que (Fr, Fa et Fv) ont augmenté successivement (126.44 % ; 66.48 % ; 84.60 %). Sur la figure 5 sont représentées les micrographies de l'usure VB de l'outil CBN prises à différentes étapes d'usure.

3.2 Evolution de la température de coupe

L'intérêt de cette étude est de suivre la variation de la température dans la zone de coupe 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 de coupe. En tournage dur, l'usinage est caractérisé par un écoulement de copeau très chaud, de couleur rouge surtout pour les grandes vitesses. La quantité de chaleur dégagée est le résultat des frottements, des déformations plastiques intenses et des cisaillements. La figure (8) met en évidence l'effet de la vitesse de coupe sur le dégagement de chaleur dans la zone de coupe. La majeure partie de la quantité de chaleur est évacuée à travers le copeau. 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 450m/min, la température du copeau est 904°C, sur la surface d'attaque de l'outil la température est 98°C bien que pour la pièce, elle ne dépasse pas 53°C pendant 1.5 min d'usinage. Comparée à celle du copeau enlevé, il est conclu que la majeure partie de la quantité de chaleur générée est évacuée par le copeau.

La Figure (9) présente les valeurs des températures (outil, copeau, pièce) enregistrées après un temps de coupe de 1.5 min à différentes vitesses de coupe. Il en résulte que l'augmentation de la vitesse de coupe donne naissance à 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 minimales. 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:

❖ Une élévation de la vitesse de coupe de 120 à 240m/min conduit à une élévation de la température (outil, copeau, pièce) respectivement de (25%, 31.91%, 26.26%).

❖ Une élévation de la vitesse de coupe de 120 à 320 m/min, conduit à une élévation de température (outil, copeau, pièce) respectivement de (75%, 77.91%, 33.33%).

❖ Une élévation de la vitesse de coupe de 120 à 450 m/min, conduit à une élévation de température (outil, copeau, pièce) respectivement de (145%, 177.30%, 76.67%).

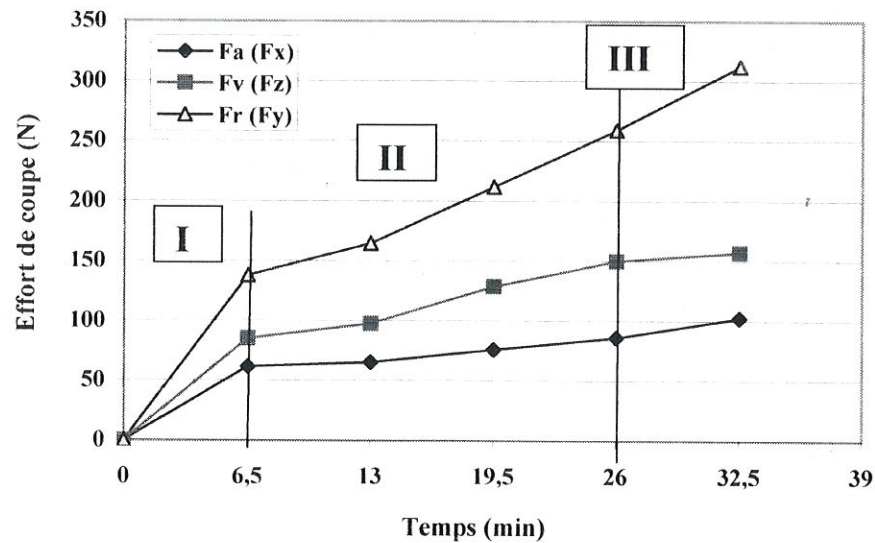


Figure 6: Évolution de l'effort de coupe en fonction du temps de coupe à $V_c = 115 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $a_p = 0.2 \text{ mm}$.

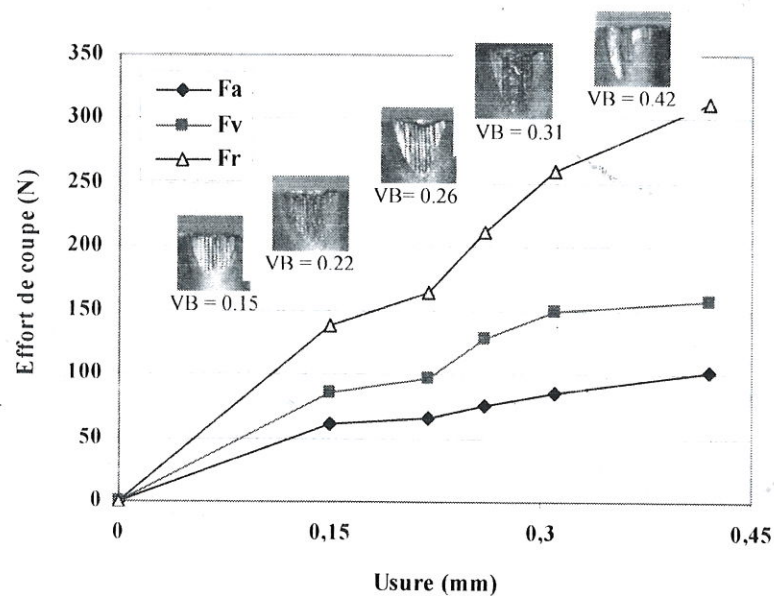
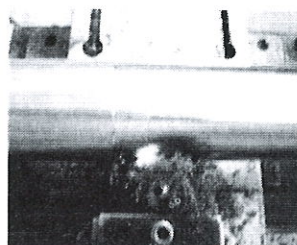
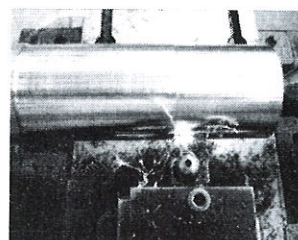


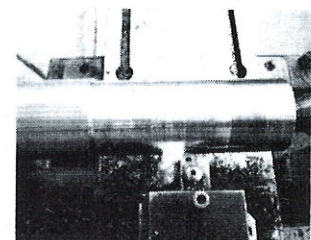
Figure 7 : Évolution de l'effort de coupe en fonction de l'usure à $V_c = 115 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $a_p = 0.2 \text{ mm}$.



a) $V_c = 120 \text{ m/min}$



b) $V_c = 320 \text{ m/min}$



c) $V_c = 450 \text{ m/min}$

Figure 8: Évacuation de la température par le copeau pour différentes vitesses de coupe

Matériau de coupe	Paramètres variables	Modèles mathématiques	Coefficient de détermination R^2
CBN	f (mm/tr)	$Fr = e^{8,52467} \cdot f^{0,17071} \cdot a_p^{0,95430} \cdot Vc^{-0,20815}$	$R^2=0,985$
	a_p (mm)	$Fa = e^{9,91647} \cdot f^{0,12514} \cdot a_p^{2,09493} \cdot Vc^{-0,19331}$	$R^2=0,996$
	Vc (m/min)	$Fv = e^{8,96158} \cdot f^{0,27105} \cdot a_p^{1,30951} \cdot Vc^{-0,16530}$	$R^2=0,905$

Tableau 2 : Modèles mathématiques de l'effort de coupe obtenus.

Le but est de mettre au point une corrélation entre les composantes de l'effort de coupe et les paramètres d'usinage sous la forme de l'équation suivante :

$$F_i = C_i \cdot f^{K_1} \cdot a_p^{K_2} \cdot Vc^{K_3}$$

(1)

Où :

C_i : une constante tenant compte de l'influence de tous les autres facteurs qui ne figurent pas dans la formule (1).

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

L'analyse détaillée des modèles mathématiques trouvés tableau (2), montre que l'accroissement de la vitesse de coupe conduit à la diminution des efforts de coupe et que l'augmentation de la section de la matière à enlever ($f \times a_p$) contribue à l'augmentation des efforts de coupe.

Le classement des exposants des différents modèles trouvés en valeur absolue exprime le degré d'influence de chaque facteur des éléments du régime de coupe sur les efforts de coupe. Par conséquent la profondeur de passe est le facteur le plus influent. Les coefficients de détermination des différents modèles sont élevés et convergent vers l'unité ce qui indique la bonne concordance avec les résultats expérimentaux et théoriques.

5. CONCLUSIONS

A partir des résultats du suivi de l'évolution des efforts de coupe et de la température en fonction des conditions de coupe, on peut tirer les conclusions suivantes :

1. L'étude des efforts de coupe réalisée, nous a permis de mieux comprendre ce phénomène en tournage dur et cela dans le but d'avoir une meilleure stabilité du système usinant. L'effort de coupe le plus important est l'effort radial en raison de la géométrie négative de la

plaquette et du travail à la limite du bec de l'outil. Ceci diffère complètement des connaissances du tournage classique où l'effort principal est l'effort tangentiel $Fr = (0,3 \text{ à } 0,5) Fv$. Par conséquent, l'effort radial ne peut être négligé dans les calculs du comportement statique et dynamique du système usinant.

2. L'augmentation de l'usure du CBN induit une élévation des efforts de coupe, l'effort principal reste l'effort radial suivi par l'effort axial, alors que l'effort tangentiel s'est montré moins sensible à l'usure. En effet, l'usinage pendant une période de 32,5 min a conduit à une usure $VB = 0,42$ mm ce qui a augmenté les trois composantes de l'effort de coupe (Fr , Fa et Fv) successivement de (126.44 % ; 66.48 % ; 84.60 %).

3. L'augmentation de l'avance et la profondeur de passe contribuent clairement à l'augmentation des efforts de coupe, et par conséquent la puissance nécessaire à la coupe. Par contre, les efforts de coupe diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Les résultats de l'étude de la variation des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe permettent de déterminer le domaine de validité de l'outil (CBN) coupant face à l'acier étudié (AISI D3). Cette démarche appelée couple outil-matière, permet de définir un domaine de fonctionnement correct de l'outil.

4. La chaleur produite lors de l'usinage dur est en fait évacuée par les copeaux, les échanges thermiques avec la pièce n'ont plus lieu car le temps de contact entre les copeaux et la pièce est faible, par exemple à $Vc=450$ m/min et après un temps d'usinage de 1.5 min le ratio $t^\circ\text{copeau}/t^\circ\text{pièce}$ est de 17.05, ce qui montre que la grande quantité de chaleur produite est évacuée par le copeau.

5. Les coefficients de détermination des différents modèles trouvés sont élevées et convergent vers l'unité ce qui indique la bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Ces modèles ont un intérêt industriel important, car ils permettent de faire des prédictions sur les efforts de coupe tout en changeant la valeur des paramètres du régime de coupe

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire LMS 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

REERENCES

- [1] Dawson.T.G; machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools *Georgia institute of technology* **2002**.
- [2] Poulachon G., Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis. *Thèse de doctorat de l'ENSAM de Cluny, déc. 1999*.
- [3] Luo S.Y, Lias Y.S et Tsai Y.Y, Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools, *Journal of Materials Processing Technology* **88 (1999) 114-121**.
- [4] Kevin Y., Chris J.Evans, Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting, *Wear* **(1999) 234-245**.
- [5] Hug J.L, Tournage des métaux durs, *machine de production*, **1995, pp.17-19**.
- [6] König K., Machining of hard materials, *Annals of the CIRP*, **1984, pp.417-427**.
- [7] NOTTRE A.T et HEAT P.J, Usinage des métaux ferreux de grande dureté à l'aide de l'amborite, *machine-outil*, **N°386, 1981, pp. 166-167**.
- [8] Kaufeld M. et S.Torbaty., Rationalisation de l'usinage très grande vitesse, *SOFETEC* **1999**.
- [9] GEISKOPF F. et col, Usinage à grand vitesse, rapport ENS Cachan, LURPA, **1999**.
- [10] M Remadna, J-F Rigal, Evolution during time of tool wear and cutting forces

in the case of hard turning with CBN inserts, *Journal of processing Technology* **178(2006) 67-75**.

- [11] Liu K., Li X.P., Rahman M., Liu X.D., CBN tool wear in ductile cutting of tungsten carbide, *Wear* **255 (2003) 1344-1351**.
- [12] Kevin Y. Chou C., Evans J. and Barash M.M, Experimental investigation on cubic boron nitride turning of hardened AISI 52100 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **V134, Issue 1, 1 March 2003, pp 1-9**.
- [13] Yallese M.A., Boulanouar L., Ouelaa N., Rezagia A., Kribes N, « Influence des conditions d'usinage sue les efforts de coupe lors du tournage du 100Cr6 (60 HRC) avec le CBN » *Premier Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques* du **23 au 25 mars 2005** Hammamet, Tunis.
- [14] Yallese M.A., Rigal J.F, Chaoui K., Boulanouar L., Cutting conditions effect on Mixed ceramic and CBN tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60HRC), *Journal of Engineering Manufacture (I MECH E)*, **volume 219, N°1 Janvier 2005**.

NOMENCLATURE

a_p	profondeur de passe [mm]
f	avance [mm/tr]
F_a	effort axial [N]
F_r	effort radial [N]
F_v	effort tangentiel [N]
HB	dureté brinell
HRC	dureté rockwell
KT	usure en cratère [mm]
R^2	coefficient de détermination
R_a	écart arithmétique moyen [μ m]
R_t	écart total de la rugosité [μ m]
R_z	profondeur moyenne de la rugosité [μ m]
t°	température de coupe [$^\circ$ C]
T	tenue de l'outil [min]
[VB]	usure en dépouille admissible [mm]
VB	usure en dépouille [mm]
V_c	vitesse de coupe [m/min]
α	angle de dépouille [$^\circ$]
χ_r	angle de direction principale [$^\circ$]
γ	angle de coupe [$^\circ$]
λ	angle d'inclinaison d'arête [$^\circ$]