

ETUDE COMPARATIVE DU COMPORTEMENT A L'USURE DE CERTAINES NUANCES DE CERAMIQUE DE COUPE EN TOURNAGE

Reçu le 06/01/2001 – Accepté le 30/04/2002

Résumé

Des essais de coupe ont été effectués par quatre outils en céramique, face à l'acier AF37. Les résultats de ces essais nous ont permis d'étudier l'influence des paramètres de coupe sur le comportement à l'usure des différentes céramiques étudiées. Pour ces différentes céramiques la relation entre la tenue et les paramètres de coupe a été exprimée suivant le modèle mathématique de Taylor.

Mots clés: Céramiques, Usure, Matériaux, Tenue, Usinage, Comportement.

Abstract

Cutting tests have been realised with four ceramic tools, against the AF37 steel. The obtained results enabled us to study the cutting parameters influence on wear behaviour of the different studied ceramics. The relationship between tool-life and cutting parameters has been expressed according to Taylor mathematic model for various ceramics.

Keywords: Ceramics, Wear, Materials, Tool Life, Machining, behaviour.

M.A. YALLESE

Laboratoire mécanique
et structure (LMS)
Université de Guelma
BP 401, 24000 Guelma, Algérie

L. BOULANOUAR

Laboratoire mécanique
des matériaux et maintenance
industrielle (LR3MI)
Université de Annaba
B.P.12, 23000 Annaba, Algérie

ملخص

في هذا البحث قمنا بأجراء تجارب خاصة بتشغيل الصلب AF37 - بواسطة مواد من أدوات القطع الخزفية. نتائج البحث سمحت لنا بدراسة تأثير عناصر القطع على تآكل الأقسام الخزفية المدروسة. العلاقة بين مدة حياة الأقسام وعناصر القطع قد تمت وفق القانون الرياضي لتايلور. نتائج البحث أبرزت أن تآكل الأقسام الخزفية له علاقة مباشرة مع التركيبة الكيميائية وبنية المعدن القاطع وكذلك خصائصه الفيزيو-ميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: الخزف القاطع، التآكل، تشغيل، مدة الحياة، الصلب.

Le progrès technologique dans l'usinage des métaux est étroitement lié à l'amélioration des performances des outils de coupe [1]. Ainsi, performances des outils de coupe [1]. Ainsi, trouve t-on aujourd'hui, sur le marché de l'outil coupant, l'illustration de cette amélioration avec l'événement successif des aciers rapides, carbures, carbures revêtus, céramiques et le CBN. Les outils de coupe céramiques permettent une réduction importante des temps d'usinage, compte tenu des vitesses de coupe élevées qu'ils autorisent, entraînant une diminution des coûts d'usinage. Les progrès récents réalisés dans le domaine des céramiques et dans celui des machines-outils ont permis aux outils céramiques d'occuper une part de plus en plus importante dans le marché des outils [2-3]. Mais le choix d'une nuance de céramique adaptée au matériau usiné n'est pas facile en raison de la disponibilité de différents types de céramiques (oxyde, carboxyde, nitrure, composite), chaque type comprenant des nuances différentes, donc des propriétés différentes [4-5]. Ainsi, le choix rationnel d'une nuance de céramique ne peut se réaliser que par le biais d'expérimentations spécifiques à ce matériau. Notre étude s'inscrit dans ce cadre et a pour objectif de contribuer à définir l'influence des paramètres de coupe sur le comportement à l'usure de quatre nuances de céramique [6].

PROCEDURE EXPERIMENTALE

Des essais de longue durée ont été réalisés pour évaluer la durée de vie de quatre céramiques de coupe. Les équipements utilisés et les conditions de travail sont les suivants:

- Matière à usiner: Nous avons usiné des rondins d'acier de diamètre $D=90\text{mm}$ et de longueur $L=500\text{mm}$. La composition chimique de l'acier testé, de désignation (AF37), est présentée dans le tableau 1.

- Machine-outil: Tour universel SN40 de puissance sur la broche égale à 6,6 kW.

- Porte Outil: Le porte-plaquette utilisé est du type CSBNR 32 25 P12 ayant la géométrie suivante: $\chi_r = 75^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\gamma = -6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$.
- Plaquettes: Elles sont à fixation par bride, de désignation SNGN 120808 (d'après I.S.O.). La composition des quatre céramiques est donnée dans le tableau 2.
- Appareil de mesure: Pour la mesure de l'usure en dépouille VB et l'usure en cratère KT, nous avons utilisé un microscope optique type MMN2, de précision 5 μm .
- Conditions de coupe: Les essais effectués sur les différentes céramiques sont planifiés d'après la méthode unifactorielle. Les conditions de coupe figurent dans le tableau 3.

% C	%Mn	% Si	%P	%S	%Cr
0.185	0.550	0.270	0.053	0.0173	0.055

Tableau 1: Composition chimique de l'acier AF37.

Type de céramique	Composition chimique	Désignation (firme)
Céramique pure	Al ₂ O ₃ à 99%	HC1
Céramique blanche	Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	SN80
Céramique mixte	Al ₂ O ₃ + TiC	HC2
Céramique mixte	Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ +TiC	WXR

Tableau 2: Composition chimique et désignation des céramiques testées.

Paramètres	Grandeurs des paramètres
Vitesse de coupe (m/mn)	[230, 370, 500]
Avance (mm/tr)	0,16
Profondeur de passe (mm)	1,0
Lubrification	sans
Usure en dépouille admissible [VB](mm)	0,3
Usure en cratère admissible [KT] (mm)	0,15

Tableau 3: Conditions opératoires de coupe.

RESULTATS

Les essais effectués ont permis le suivi de l'usure en dépouille VB, en cratère KT et celui de l'usure en entaille VN, en fonction du temps à différentes vitesses de coupe. Les figures 1 à 4, 5 à 8 et 9 à 12 illustrent l'évolution de l'usure VB, KT et VN, des quatre nuances de céramique, face à l'acier AF37.

Le traitement graphique des résultats de l'usure en dépouille VB, en fonction du temps, a permis la détermination des tenues des quatre nuances de céramiques étudiées. Leurs valeurs sont mentionnées dans le tableau 4.

Détermination des coefficients du modèle de Taylor

La relation mathématique reliant la durée de vie (T) d'un outil à la vitesse de coupe a été proposée par le modèle de Taylor en 1907 [7-10]:

$$T = C_v \cdot V^n \quad (1)$$

Vitesse de coupe (Vc) m/min	Céramiques de coupe	Tenues (T) min
230	Al ₂ O ₃	64.80
230	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	67.20
230	Al ₂ O ₃ + TiC	75.00
230	Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂	82.70
370	Al ₂ O ₃	35.00
370	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	39.40
370	Al ₂ O ₃ + TiC	46.20
370	Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂	50.10
500	Al ₂ O ₃	15.16
500	Al ₂ O ₃ + ZrO ₂	18.50
500	Al ₂ O ₃ + TiC	22.50
500	Al ₂ O ₃ + TiC + ZrO ₂	27.40

Tableau 4: Tenues des céramiques en fonction des vitesses de coupe utilisées.

où: T : durée de vie de l'outil;

V : vitesse de coupe;

n : exposant de Taylor;

C_v : constante qui dépend des conditions de coupe.

Graphiquement, la détermination des coefficients C et n s'effectue rapidement et sans difficulté, mais cette méthode est peu précise. Une meilleure précision est assurée si on utilise la méthode des moindres carrés:

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - y_{it})^2 \rightarrow \varepsilon \quad (2)$$

où: S : La somme des carrés des écarts quadratiques;

N : Le nombre des essais;

y_i : Valeur expérimentale de la tenue;

y_{it} : Valeur de la tenue donnée d'après le modèle de régression;

ε : Valeur infiniment petite.

Cette méthode exige que la somme S soit minimale. En dérivant l'équation (2) par rapport aux coefficients C et n et en égalisant les résultats à zéro, on obtient:

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial C} = 0 \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - nx_i - C)^2 \quad (4)$$

Le développement des expressions (3 et 4) nous donne:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial n} &= -2 \sum_{i=1}^N (y_i - nx_i - C) x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial C} &= -2 \sum_{i=1}^N (y_i - nx_i - C) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

De (5), on peut déterminer les constantes C et n :

$$C = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N Y_i - n \sum_{i=1}^N x_i \right) \quad (6)$$

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N Y_i x_i - \sum_{i=1}^N Y_i \sum_{i=1}^N x_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad (7)$$

Désignations	Compositions	Modèles	Coefficient de détermination
Céramique HC1	Céramique pure à 99% Al_2O_3	$VT^{0,550} = 2367,640$	$R^2 = 0.99711$
Céramique SN80	Céramique à dispersion $Al_2O_3+ZrO_2$	$VT^{0,620} = 3253,933$	$R^2 = 0.99627$
Céramique HC2	Céramique mixte $Al_2O_3+ TiC$	$VT^{0,666} = 4248,054$	$R^2 = 0.99520$
Céramique WXR	Céramique mixte $Al_2O_3+ZrO_2+TiC$	$VT^{0,720} = 5698,399$	$R^2 = 0.99705$

Tableau 5: Modèles mathématiques déduits pour les céramiques testées.

Le traitement des résultats de la tenue [11] a permis la détermination des constantes du modèle de Taylor pour les quatre céramiques testées (Tab. 5).

ANALYSE DES RESULTATS

1/ L'allure des courbes de l'évolution de l'usure des différentes céramiques montre que la durée de coupe effective d'une arête est atteinte généralement après deux périodes d'évolution:

- La première période (période de l'usure initiale): elle est caractérisée par une usure en dépouille relativement intense de l'outil. Il semble que cette usure initiale soit indispensable à l'efficacité du processus d'enlèvement de matière.

- La deuxième période (période de l'usure normale): l'usure se stabilise et s'effectue à un rythme beaucoup moins rapide, jusqu'à atteindre l'intervalle 0,3 à 0,4 mm. Au-delà de cet intervalle, l'usure s'accroît, et la précision dimensionnelle et l'état de la surface de la pièce ne sont plus respectés. C'est la période de l'usure accélérée.

2/ En ce qui concerne les mécanismes d'usure des plaquettes céramiques, on a observé que la vitesse d'usure est d'autant plus faible que la céramique est plus dure, ce qui implique que l'abrasion est ici le principal mécanisme d'usure [12]. Cependant, des études plus poussées des régions usées montrent que le mécanisme d'usure apparaît encore, résultant essentiellement d'un processus d'écoulement superficiel, suite aux contraintes interfaciales et à la température qui sont plus élevées [13-16]. Aussi, sur la face de dépouille, le mécanisme d'écoulement est accompagné d'attrition au cours duquel des grains sont arrachés de la surface usée. Pour résister efficacement, l'utilisation d'une céramique à grains fins est nécessaire. Des phénomènes de diffusion peuvent aussi intervenir aux grandes vitesses et participer ainsi à l'usure de la face de coupe.

3/ Les résultats des essais à l'usure ont montré que chaque nuance de céramique présente des particularités de comportement qui sont principalement fonction de la composition chimique et de la structure, ainsi que des caractéristiques du matériau usiné. Une analyse des tenues des différentes nuances de céramique (Tab. 4) montre que le meilleur comportement à l'usure est observé avec la nuance $Al_2O_3 + TiC + ZrO_2$ ($T=82.70$ min), suivi de la nuance Al_2O_3+TiC ($T=75$ min). Par contre, les céramiques blanches s'usent plus rapidement; la nuance Al_2O_3 , renforcée par

ZrO_2 , présente une usure moins importante ($T=67.2$ min), comparativement à Al_2O_3 . Le comportement à l'usure des différentes nuances de céramique peut être expliqué comme suit: l'oxyde d'aluminium, qui confère au matériau de coupe son excellente dureté à chaud, permet des vitesses de coupe élevées. Les additions de ZrO_2 à une teneur de 10% renforcent l'alumine, ce qui conduit à une meilleure résistance à l'usure et à l'écaillage. Avec la céramique noire Al_2O_3+TiC , la haute

teneur en Al_2O_3 confère à ce matériau sa très forte dureté à chaud, tandis que l'addition de TiC a pour effet de rendre les arêtes de coupe particulièrement robustes, augmentant leur résistance à l'usure ainsi qu'aux chocs mécaniques et thermiques.

4/ Lors de l'observation du mode de dégradation de l'arête tranchante, nous avons constaté des arrachements de particules des surfaces de la plaquette, conduisant à des écaillages sur les surfaces d'attaque et de dépouille. Ces formes d'usure sont encore plus nettes dans le cas des céramiques blanches. On peut donc dire que ces plaquettes sont sensibles aux chocs.

5/ L'usure en cratère est caractérisée par une cuvette formée sur la face d'attaque de l'outil. Il s'agit d'une usure d'origine physico-chimique, très liée à l'existence des températures de coupe élevées, dues au frottement du copeau sur la surface d'attaque et provoquant une diffusion importante. Cette cratérisation influe sur l'écoulement du copeau et, lorsque le cratère est important, il se produit une détérioration de l'outil. Les résultats ont montré également que la progression de la profondeur du cratère KT avait lieu d'une manière particulièrement lente, malgré l'angle de coupe négatif et les vitesses élevées. La plus grande valeur de KT enregistrée est 20 μm . Cette analyse nous emmène à conclure que l'usure en cratère n'est pas un critère significatif de la durée de vie pour les nuances de céramique testées.

6/ Lorsque les plaquettes céramiques sont utilisées à grande vitesse face à l'acier AF37, on a observé la formation d'une entaille sur l'arête de coupe. Cette dernière se situe à une certaine distance du bec de l'outil correspondant à la valeur de la profondeur de passe. Elle est attribuée, d'une part, à la couche superficielle durcie de la pièce, et d'autre part, au refoulement de matière sur la périphérie de la pièce provoquant une accélération du phénomène de l'usure. Une analyse des résultats des figures 9 à 12 de l'entaille montre clairement l'influence de la vitesse de coupe. Avec l'augmentation de cette dernière, on assiste à un accroissement de la valeur de l'entaille. La plus grande valeur de l'entaille est enregistrée sur la figure 9: $VN = 1.35$ mm. l'augmentation de VN au-delà de cette valeur provoque une rupture de l'arête.

7/ La vitesse de coupe à une grande influence sur la formation et l'évolution de l'arête rapportée. De l'utilisation

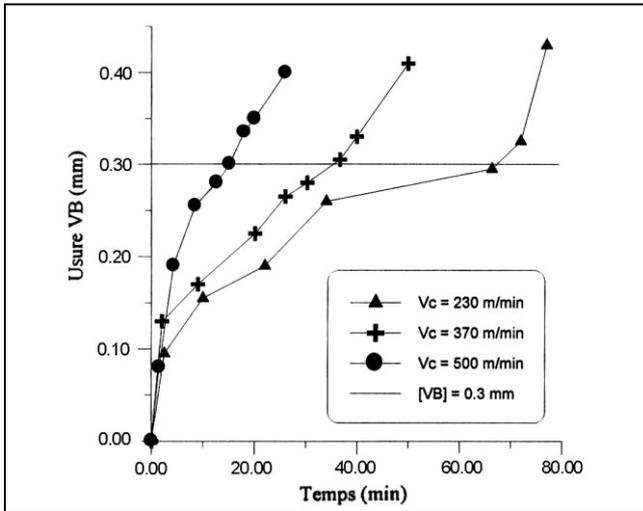


Figure 1: Usure en dépouille $VB = f(t)$.
Céramique HC1 (Al_2O_3).

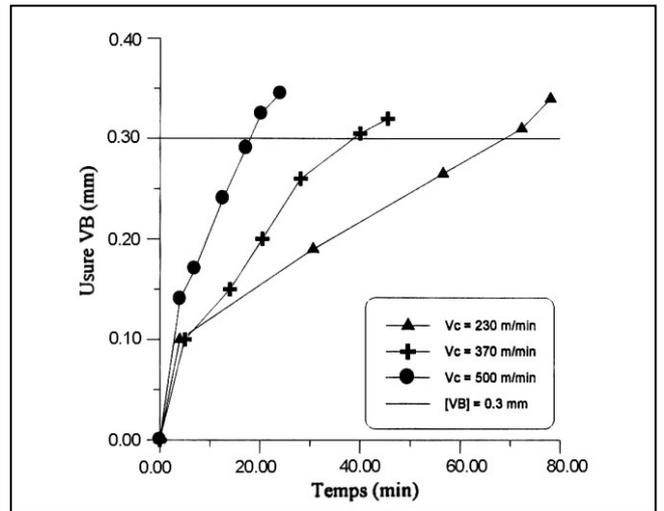


Figure 2: Usure en dépouille $VB = f(t)$.
Céramique SN80 ($Al_2O_3 + ZrO_2$).

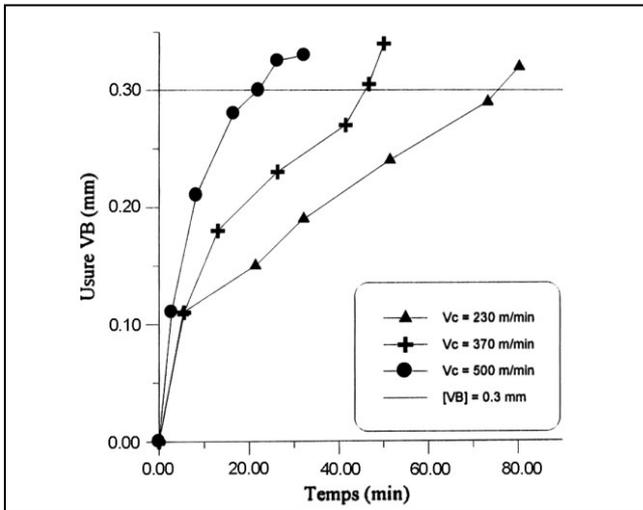


Figure 3: Usure en dépouille $VB = f(t)$.
Céramique HC2 ($Al_2O_3 + TiC$).

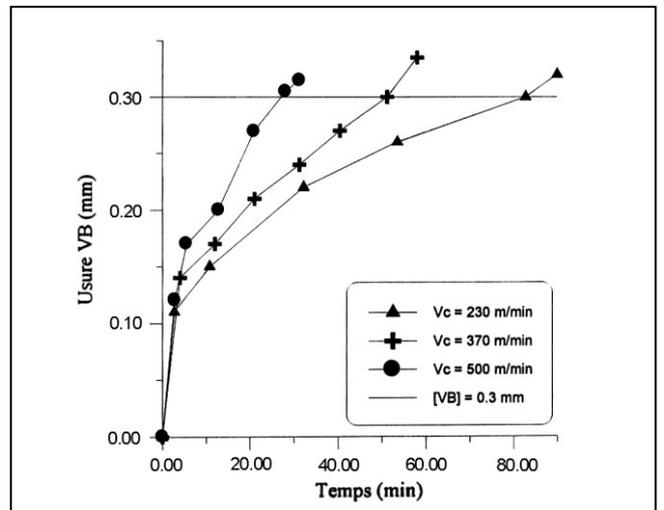


Figure 4: Usure en dépouille $VB = f(t)$.
Céramique WXR ($Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC$).

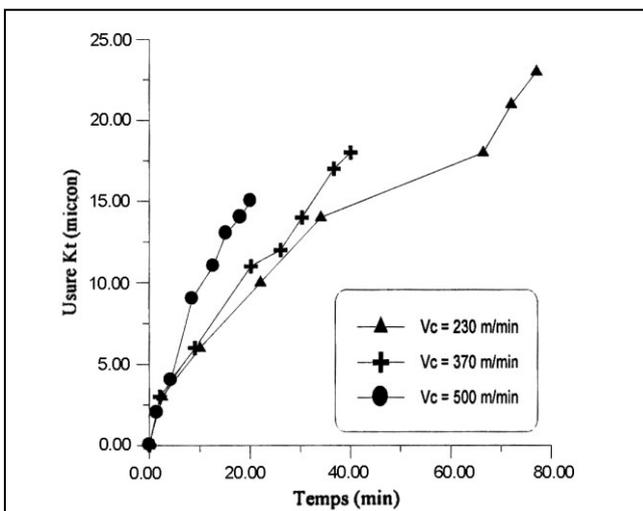


Figure 5: Usure en cratère $Kt = f(t)$.
Céramique HC1 (Al_2O_3).

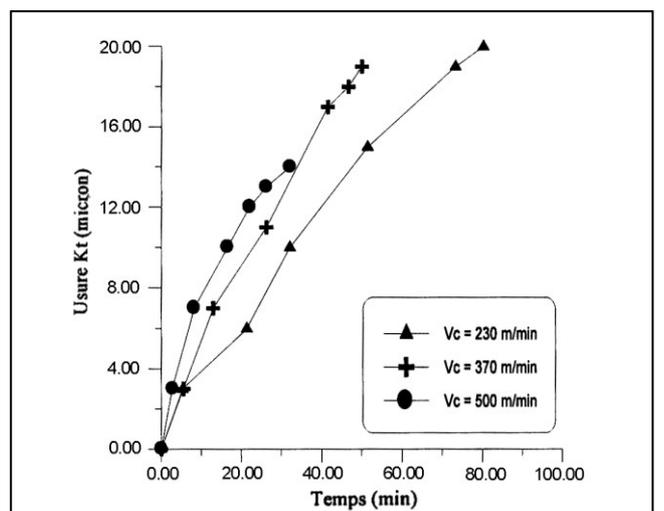


Figure 6: Usure en cratère $Kt = f(t)$.
Céramique SN80 ($Al_2O_3 + ZrO_2$).

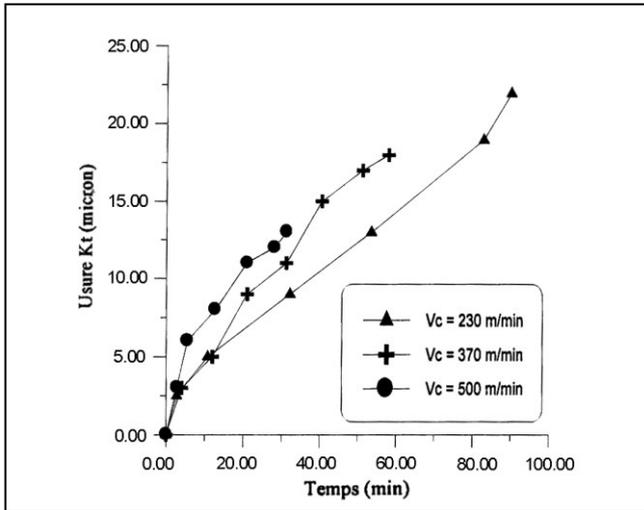


Figure 7: Usure en cratère $K_t = f(t)$.
Céramique HC2 ($Al_2O_3 + TiC$).

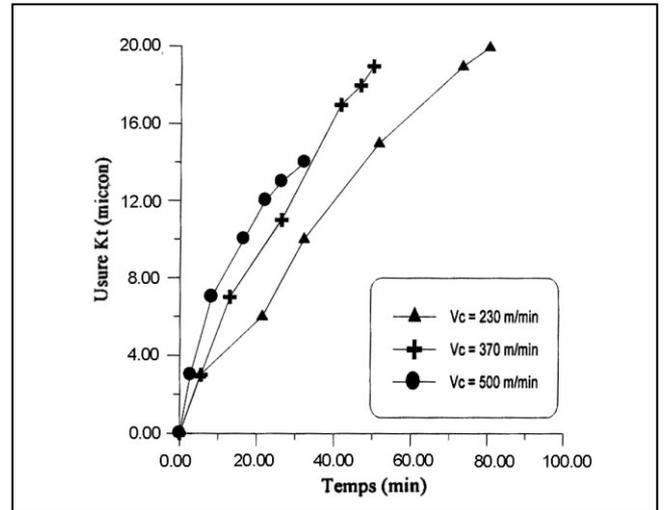


Figure 8: Usure en cratère $K_t = f(t)$.
Céramique WXR ($Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC$).

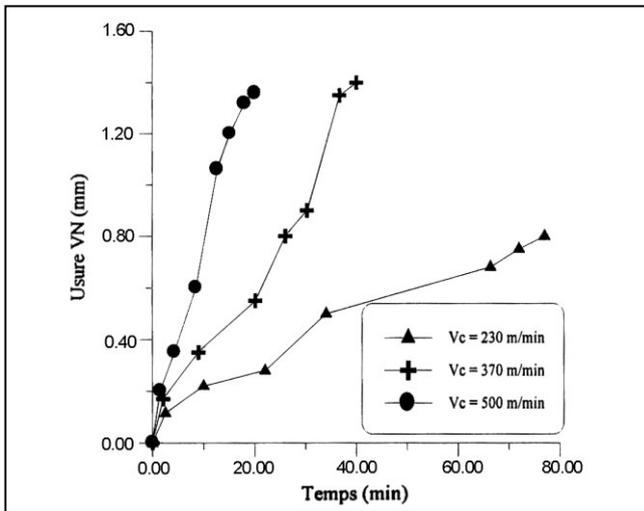


Figure 9: Usure en entaille $V_N = f(t)$.
Céramique HC1 (Al_2O_3).

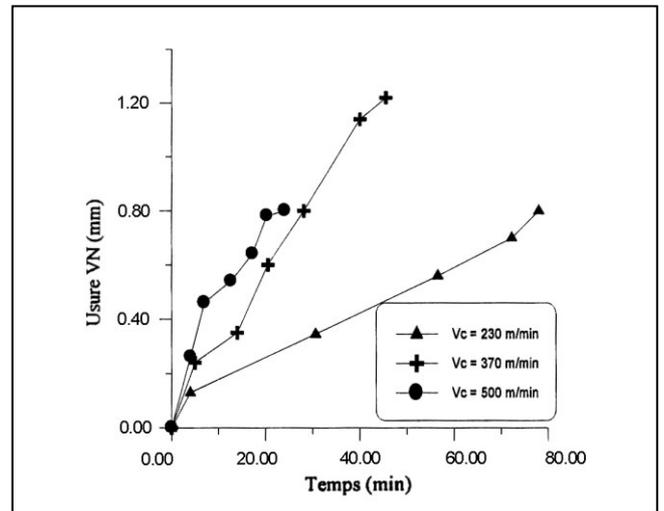


Figure 10: Usure en entaille $V_N = f(t)$.
Céramique SN 80 ($Al_2O_3 + ZrO_2$).

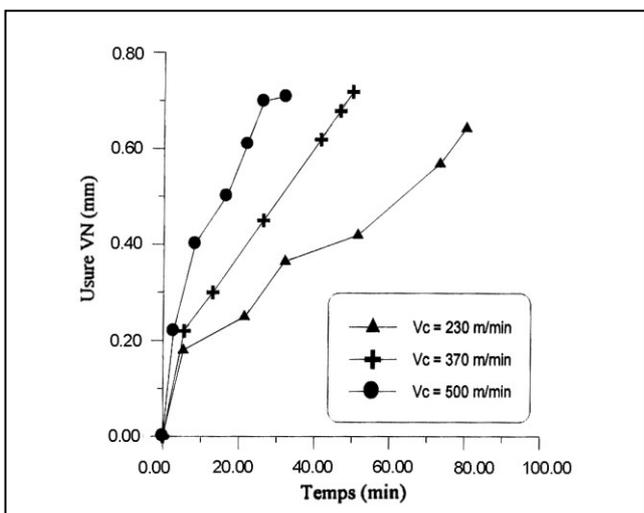


Figure 11: Usure en entaille $V_N = f(t)$.
Céramique HC2 ($Al_2O_3 + TiC$).

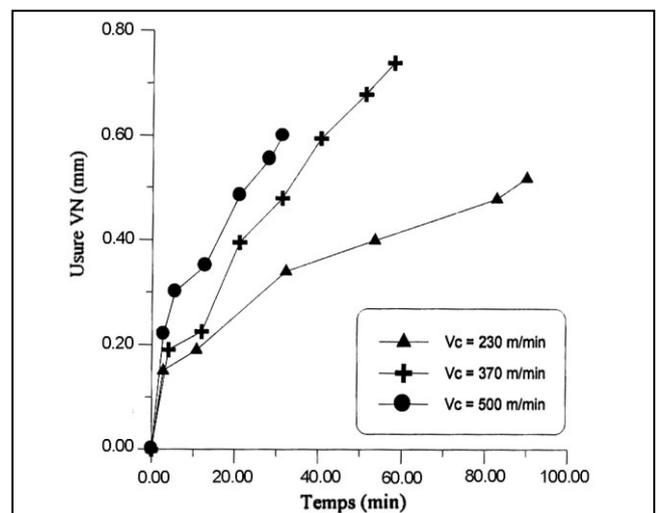


Figure 12: Usure en entaille $V_N = f(t)$.
Céramique WXR ($Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC$).

des céramiques à grande vitesse (230-500 m/min), résulte une tendance de la soudure du matériau usiné extrêmement faible [14], ce qui réduit l'usure des plaquettes et donne un bon fini de la pièce.

8/ Les modèles présentés dans cette étude sont en bonne corrélation avec les valeurs obtenues expérimentalement, le coefficient de corrélation (R^2) variant entre 0,995 - 0,997. Ces modèles sont particulièrement utiles pour réaliser une étude d'un point de vue économique sur des opérations de tournage, en tenant des paramètres de coupe qui conduisent à une productivité optimale [15].

CONCLUSION

Cette étude a permis d'éclaircir un certain nombre de points du problème relativement complexe de la coupe, en faisant intervenir des paramètres liés au comportement interfacial du couple céramique-métal, et ce, en vue de sélectionner les meilleures nuances de céramique pour des conditions de travail données. Les résultats des essais d'usure montrent que la céramique blanche renforcée par ZrO_2 résiste mieux à l'écaillage par rapport à l'alumine pure Al_2O_3 . Cependant, la tenue de la céramique noire $Al_2O_3+TiC+ZrO_2$ est meilleure comparativement à Al_2O_3+TiC . L'usure en cratère n'est pas un critère de durée de vie des plaquettes céramiques testées, car les valeurs relevées de la profondeur du cratère sont très faibles. En ce qui concerne l'usure en entaille, là encore, la nature de ce phénomène complexe ne peut être exposée en détail dans le cadre de cette étude. Mais cela conduit à considérer l'entaille comme un paramètre caractéristique de l'état d'usure de l'arête de coupe des outils céramiques. La vitesse de coupe est le facteur essentiel provoquant l'usure. Elle doit donc être ajustée selon les modèles déterminés par l'expérimentation.

REFERENCES

[1]- Pastor H., "The evolution of cutting tool materials", Bulletin du Cercle d'études des métaux, N°13, nov. (1996).

- [2]- Feldmuhle, "La céramique de coupe au présent", *Machine Moderne*, N°890, nov., (1984), pp. 20-22.
- [3]- Torre J.P., "L'utilisation des céramiques dans les outils de coupe", *Industrie Céramique*, N°839, juin, (1989).
- [4]- Vigneau J., "Outils de coupe en céramique utilisation actuelle et perspective", *Matériaux Mécanique - Electricité*, N°421, juil. (1987), pp. 14-17.
- [5]- Chancel P., "Les nouveaux outils coupants", *CETIM Information*, N°147, fév. (1996).
- [6]- Yaltese M.A., "Etude du comportement des matériaux de coupe modernes", Projet de recherche N°J2425/01/99, Université de Guelma, (1999).
- [7]- Roumesy B., "Détermination des lois d'usure des outils de coupe", *Machine outil*, N°321, juil. (1975).
- [8]- Roumesy B., Bedrin C., "Méthode d'essais rapide pour la détermination de la tenue de coupe des outils", *Matériaux et Technique*, Août (1981).
- [9]- Boulanour L. et Benghersallah M., "The study and modelling of wear for a removal plain milling cutters in metallic carbide inserts", *Revue des Sciences et Technologie - Synthèse*, Univ. Annaba, N°5, juin (1999) pp. 71-75.
- [10]- Boulanour L., Belhadi S. et Lahreche T., "Influence de la géométrie sur la durée de vie d'un outil de tour en acier rapide", *Matériaux et Technique*, N°9-10, (1997).
- [11]- Boulanour L. and Andonov I., "Statistical modelling of the machinability of cutting tool steel X40CrMo6-2", *Revue de Métallurgie*, N°10, octobre (1996), pp. 1311-1318.
- [12]- Hug J.L., "Tournage des métaux durs", *Machine de Production*, (1995), pp.17-19.
- [13]- König K., "Machining of hard materials", *Annals of the CIRP*, (1984), pp.417-427
- [14]- Geiskopf F. et al., "Usinage à grande vitesse", ENS Cachan, LURPA, déc. (1999).
- [15]- Yaltese M.A., Boulanour L. et S. Belhadi, "Etude des performances des outils céramiques lors du tournage", *In Proceeding "Conférence Internationale sur la Productique"*, CIP2001, Alger, juin (2001), pp. 345-350.
- [16]- Luo S.Y., Lias Y.S. and Tsai Y.Y., "Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools", *Journal of Materials Processing Technology*, 88, (1999), pp. 114-121. □