

INVESTIGATION DE L'USURE DE DEUX MATERIAUX A OUTILS A BASE D'ALUMINE-SiC_w ET DE CBN-TiCN LORS DE L'USINAGE D'UN ACIER A ROULEMENT 60HRC

Reçu le 30/12/2001 – Accepté le 25/10/2003

Résumé

Dans ce travail sont exposés les résultats relatifs à l'étude du comportement à l'usure de deux matériaux à outils modernes : la céramique composite CC670 et le nitrure de bore cubique CBN7020, lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé (60HRC) à usinabilité difficile. L'influence de la vitesse de coupe sur la tenue des deux outils, ainsi que l'influence de l'usure sur la rugosité ont été étudiées. Les résultats trouvés montrent que le CBN7020 dépasse de loin la céramique composite CC670 en qualité de surface et en durée de vie. Les qualités de surfaces obtenues sont comparables à celles obtenues en rectification ($0.2\mu\text{m} < \text{Ra} < 1.6\mu\text{m}$). Des modèles mathématiques pour la prédiction éventuelle de la durée de vie des deux matériaux à outils en fonction de la vitesse de coupe sont proposés.

Mots clés: Céramiques, Usure, Usinage, Durée de vie, Nitrure de bore cubique, Acier.

Abstract

This investigation present results related to the study of wear behavior of composite ceramic (CC670) and a cubic boron nitride (CBN 7020) tools, during the machining of hardened steel 100Cr6. Both cutting speed influence on tool lifetime and wear influence on roughness are studied at laboratory conditions. The different tests are carried out in accordance with the long duration wear method. Mathematical models which describe tool lifetime as a function of cutting speed for both materials are proposed together with a physical interpretation of obtained results.

Keywords: Ceramic, Wear, Machining, Tool-Life, Cubic boron nitride, Steel.

M.A. YALLESE¹
L. BOULANOUAR²
S. BELHADI¹

¹ Laboratoire Mécanique et Structure (LMS)
Université de Guelma
BP 401, 24000 Guelma, Algérie

² Laboratoire mécanique des matériaux et maintenance industrielle (LR3MI)
Université Badji Mokhtar
BP. 12, 23000 Annaba, Algérie

ملخص

في هذا البحث تم عرض النتائج الخاصة بدراسة سلوك تآكل قلم من الخزف المركب القاطع CC670 وقلم من النتريد البوري المكعب CBN7020 خلال تشغيل الصلب 100Cr6 المقسى. تأثير سرعة القطع على مدة حياة القلمين وكذلك تأثير التآكل على الخشونة قد تمت دراستها. التجارب قد تمت وفق طريقة التآكل الطويلة المدى. النتائج المحصل عليها تبين تفوق واضح للنتريد البوري المكعب على الخزف المركب CC670 من حيث جودة حالة السطح المشغل ومدة حياة القلم. حالة السطح المحصل عليه يمكن مقاربتها بحالة السطوح المحصل عليها أثناء عملية التخليخ. نماذج رياضية لحساب مدة حياة القلم بدلالة سرعة القطع قد عرضت وتفسير فيزيائي للنتائج قد تم.

الكلمات المفتاحية: الخزف القاطع – التآكل – تشغيل – مدة الحياة – النتريد البوري المكعب – الصلب.

Les progrès techniques dans le domaine de l'automobile, de l'espace et du nucléaire, ont développé l'emploi de matériaux très durs et d'usinabilité très difficile. La mise en forme de ces derniers a exigé l'utilisation de nouveaux matériaux à outils très résistants. Les outils de coupe en aciers rapides, carbures et cermets sont utilisés en tournage pour la plupart des matériaux usinés [1]. Cependant, leurs tenues sont limitées et leur usage devient parfois impossible notamment lors de l'usinage des pièces ayant une grande dureté et une résistance à l'abrasion très élevée [2-3]. C'est le cas principalement des aciers et des fontes trempés, des alliages réfractaires à base de nickel et des matériaux composites à matrice métallique. Le choix rationnel des matériaux de coupe ne peut se faire qu'avec des expérimentations spécifiques à chaque nuance et leur mise en œuvre nécessite une maîtrise suffisante du déroulement du processus de coupe, en particulier, l'évolution de l'usure des outils [4-8]. Notre étude s'inscrit dans ce cadre. Elle a pour objectif d'évaluer les capacités de coupe de deux matériaux à outils qui sont en l'occurrence la céramique composite CC670 et le nitrure de bore cubique CBN7020.

1- GENERALITES SUR L'USURE DES OUTILS

Lors de l'usinage des matériaux durs (dureté > 45 HRC) à une vitesse de coupe élevée, les sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe augmentent. Le frottement et les pressions élevées qui s'exercent à l'interface copeau / outil provoquent l'usure des outils [9-12]. Les formes d'usure des outils de coupe dépendent essentiellement de la nature de l'outil, du matériau usiné, des conditions de coupe et du type d'usinage. Les principales formes rencontrées sont représentées sur la figure 1. Elles se distinguent essentiellement par :

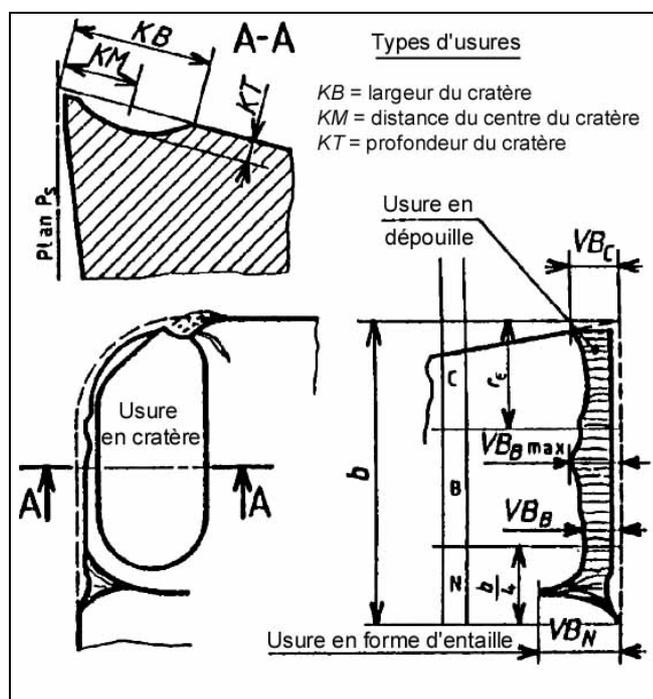


Figure 1: Différentes formes d'usure des outils [13].

1. L'usure en dépouille ou frontale qui est due au frottement de la pièce sur la face en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête de coupe, de largeur moyenne (VB). Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer puisqu'elle détermine l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce usinée.

2. L'usure en cratère, caractérisée par une cuvette formée sur la face d'attaque de l'outil, suite au frottement du copeau. Cette forme d'usure est provoquée par une diffusion importante, due à l'existence de températures élevées à l'interface copeau-outil. La forme du cratère est définie par sa profondeur (KT).

3. L'usure en entaille, caractérisée par la valeur (VN) sur la surface en dépouille principale de l'outil. Cette usure se développe dans certaines conditions de coupe, suite aux arrachements de particules et à l'effondrement de l'arête tranchante au niveau de la hauteur du diamètre périphérique de la pièce usinée.

Matériau de coupe	Composition chimique	Désignation ISO
Nitrure de bore cubique (7020)	57%CBN+35%TiCN+8%autres	SNGA 12 04 08
Céramique composite (CC670)	75% Al ₂ O ₃ + 25% SiC	SNGA 12 04 08

Tableau 1: Composition chimique et désignation des plaquettes de coupe utilisés.

Matériau de coupe	Dureté Hv (daN/mm ²)	Ténacité (MPa.m ^{1/2})	Module de Young (GPa)	Densité (G/cm ³)	Taille de grain (µm)
CBN7020	2800	4.2	570	4.3	2.5
Céramique CC670	2040	8.9	390	3.7	3

Tableau 2: Caractéristiques mécaniques du CBN7020 et de la céramique CC670.

% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Ni
1.05	0.38	0.21	0.03	0.028	1.41	0.21

Tableau 3: Composition chimique de l'acier 100Cr6.

2- PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les essais réalisés sont des essais d'usure de longue durée [NF E66-505]. Les équipements utilisés pour les essais ainsi que les conditions de coupe sont les suivants :

2.1- Equipements utilisés

Les essais d'usure sont réalisés sur un tour très rigide (TOS TRENCIN) modèle SN40 de 6,6 kW sur la broche (Fig.2). Les plaquettes de coupe utilisées sont amovibles de forme carrée, avec inserts en coin pour le CBN7020 (Fig.3). Toutes les informations relatives aux deux matériaux de coupe utilisés sont regroupées dans les tableaux 1 et 2.

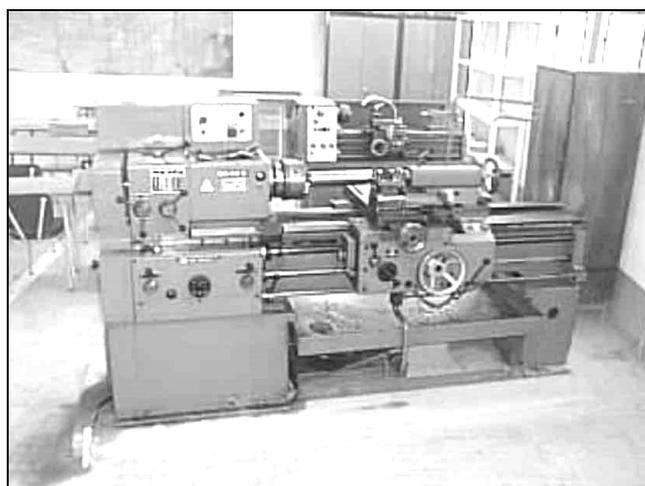


Figure 2: Tour (TOS TRENCIN) SN40.

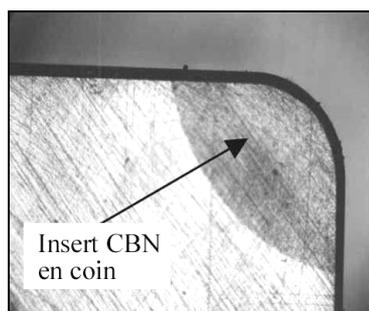


Figure 3: Plaquette CBN7020.

Les porte-plaquettes utilisés sont du type: CSBNR2525M12 et PSBNR2525K12 ayant la géométrie suivante : $\chi_r = 75^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\gamma = -6^\circ$; $\lambda = -6^\circ$ (Fig.4).

Les essais d'usure sont réalisés sur des éprouvettes en acier trempé 100Cr6 de 80 mm de diamètre et 400 mm de longueur (Fig.5). La composition chimique de cet acier est indiquée dans le tableau 3.

Après trempe et revenu, la dureté de l'acier 100Cr6 passe de 28HRC à 60HRC. Cet acier est très résistant à l'usure; il est utilisé surtout pour la fabrication

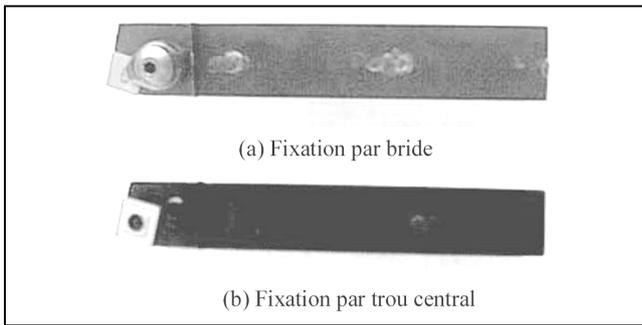


Figure 4: Porte-plaquettes utilisés.

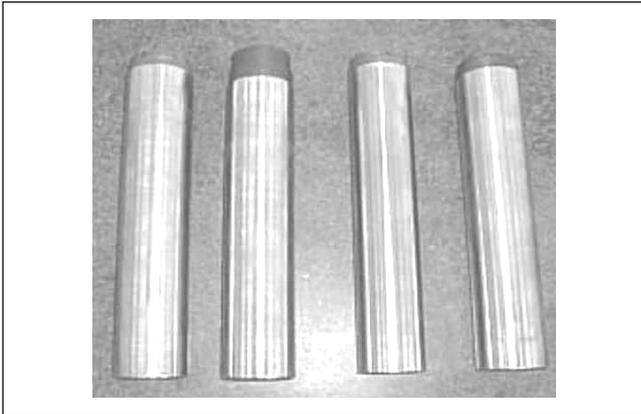


Figure 5: Eprouvettes utilisées pour les essais d'usure.

des billes, rouleaux, bagues et cages de roulements. On l'emploie également pour la mise en forme à froid comme matrices de formage, cylindres de laminoirs et comme revêtement d'usure [14].

Le suivi de l'évolution de l'usure a été effectué à l'aide d'un microscope optique type HUND (W-AD) équipé d'une caméra CCD. Quant à la mesure de la rugosité, nous avons utilisé un rugosimètre SurfTest 301 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante de profil de rugosité. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, les mesures de la rugosité ont été réalisées directement sur la machine et sans démontage de la pièce.

2.2- Conditions de coupe

Les essais d'usure effectués par la céramique composite CC670 et le CBN7020 sont planifiés suivant la méthode unifactorielle. Les conditions de coupe sont les suivantes :

- Vitesse de coupe CBN7020: $V_{c1}=120$ m/min ; $V_{c2}=180$ m/min; $V_{c3}=220$ m/min.
- Vitesse de coupe CC670: $V_{c1}=60$ m/min; $V_{c2}=90$ m/min; $V_{c3}=120$ m/min.
- Avance : $f = 0.08$ mm/tr.
- Profondeur de passe : $a_p = 0.5$ mm.
- Usure en cratère admissible : $[KT] = 0.15$ mm.
- Usure en dépouille admissible : $[VB] = 0.3$ mm.
- Usinage à sec.

3- RESULTATS

3.1- Evolution de l'usure en fonction du temps

Les essais effectués ont permis le suivi de l'usure en dépouille (VB) et en cratère (KT) des deux matériaux de

coupe testés, en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe (Fig.6 et 7).

3.2- Influence de l'usure sur la rugosité de l'acier 100Cr6

Les résultats des essais de l'influence de l'usure en dépouille des deux matériaux de coupe testés sur l'état de surface de l'acier trempé 100Cr6 à différentes vitesses de coupe, sont représentés sur les figures 8 et 9. La profondeur de passe et l'avance sont maintenues constantes et elles sont égales respectivement à 0.5 mm et 0.08 mm/tr.

Ces résultats montrent que la valeur de la rugosité n'est pas stable et uniforme, mais elle subit une dégradation en fonction de l'évolution de l'usure en dépouille de la céramique composite CC670 et du CBN7020.

4- TRAITEMENT DES RESULTATS

4.1- Détermination de la durée de vie

Le traitement graphique des résultats de l'usure en dépouille (VB) en fonction du temps a permis la détermination des tenues de la céramique composite CC670 et du CBN7020 à différentes vitesses de coupe. En se basant sur les courbes d'usure $VB=f(t)$ et en prenant comme critère d'usure admissible $[VB]=0.3$ mm alors, on peut déterminer les durées de vie à partir des points d'intersection de la droite $[VB]=0.3$ mm avec les courbes d'usure. On trace verticalement, des droites qui donnent directement les tenues sur l'axe des temps. Ainsi, les valeurs des tenues sont mentionnées dans la figure 10.

4.2- Détermination des modèles de l'usure

La relation mathématique reliant la durée de vie T d'un outil et la vitesse de coupe est proposée par le modèle de G.I. Taylor, en 1907 [15] :

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

où T : Durée de vie (Tenue) (min),

V_c : Vitesse de coupe (m/min),

C_v : Constante qui tient compte des conditions de coupe,

n : Exposant de Taylor.

En prenant le logarithme des deux parties du modèle (1) on aura :

$$\log T = n \log V_c + \log C_v \quad (2)$$

On obtient une équation linéaire de la forme $y = ax + b$. La représentation graphique dans un repère en coordonnées bilogarithmiques de cette fonction permet de déterminer l'exposant n qui représente la pente de la droite et la constante $\log C_v$ qui représente son ordonnée.

Le traitement des résultats de la tenue, par la méthode des moindres carrées, a permis la détermination des constantes du modèle de l'usure (Modèle de Taylor) pour la céramique CC670 et le CBN7020 (Tab. 4).

A partir des valeurs expérimentales (Fig.10) des tenues et des modèles mathématiques trouvés (Tab. 4), on peut tracer facilement les droites de Taylor à l'échelle bilogarithmique (Fig. 11).

A partir des modèles mathématiques trouvés (Tab 4), on peut déterminer la tenue de l'outil en fonction des vitesses de coupe choisies.

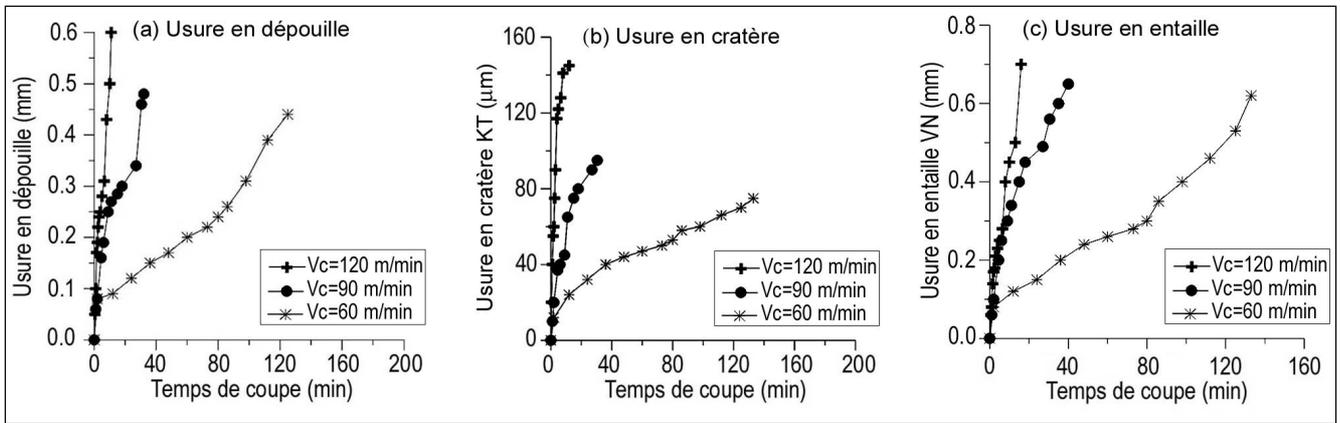


Figure 6: Evolution de l'usure de la CERAMIQUE COMPOSITE CC670 en fonction du temps à différentes vitesses de coupe Vc.

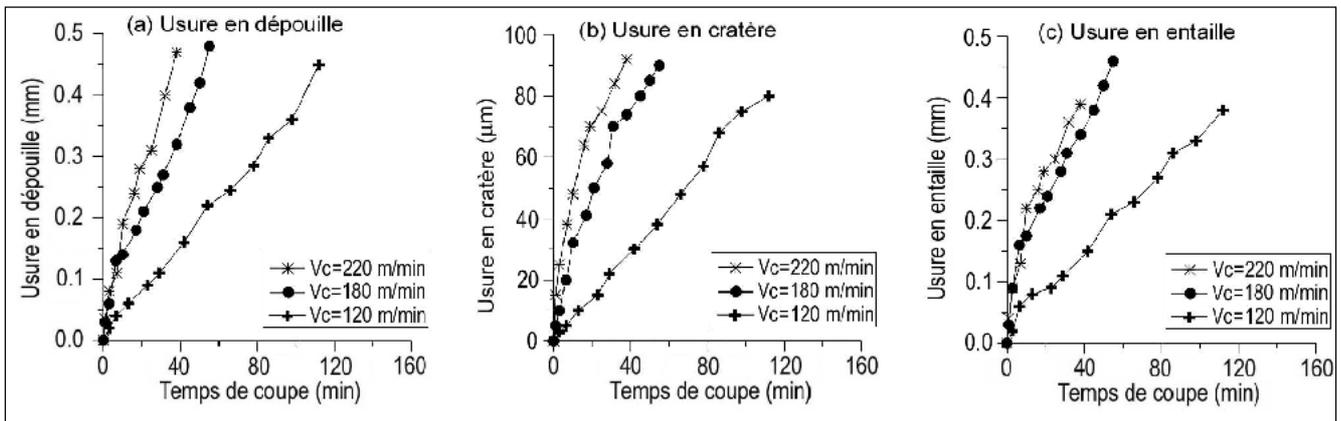


Figure 7: Evolution de l'usure du NITRURE DE BORE CUBIQUE CBN 7020 en fonction du temps à différentes vitesses de coupe Vc.

5- ANALYSE DES RESULTATS

L'usure en dépouille se manifeste au début par l'apparition d'une bande striée et brillante, parallèle à l'arête de coupe. Après un certain temps de travail, les micro-écaillages apparaissent et, avec l'augmentation de la profondeur du cratère sur la surface d'attaque de l'outil, on assiste à un effondrement de l'arête de coupe, qui est due à une usure combinée de (VB) et (KT) (Fig.12 et 13). Cette usure est importante à considérer, puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce et la précision dimensionnelle.

Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la valeur de l'usure en cratère augmente car la vitesse à l'interface «outil / copeau» et la dureté de la couche enlevée de la pièce à usiner (couche trempée) sont extrêmement élevées. Ces deux paramètres entraînent une élévation de la température, qui conduit à l'usure en cratère (Fig.14). Plus l'usure en cratère (KT) est proche de l'arête tranchante de l'outil, plus son évolution fragilise cette dernière et conduit à sa rupture [16]. De ce fait, cette usure doit être considérée comme un paramètre caractéristique de l'usure des arêtes de coupe des deux matériaux de coupe testés.

L'analyse des résultats montre que l'influence de la vitesse de coupe est significative. En effet, avec l'augmentation

de cette dernière, on remarque une nette diminution de la tenue. Les conséquences sur le plan industriel de l'augmentation de la vitesse de coupe vis-à-vis de la tenue des deux outils sont représentées dans le tableau 5.

Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la tenue des deux outils diminue; si on rapporte ce temps de coupe trouvé au débit de copeau produit à différentes vitesses de coupe, on peut dire qu'à la vitesse 120m/min, le CBN 7020 produit 9600 (m) de copeau par contre le CC670 produit 744 (m) de copeau. Il découle que le CBN est plus productif que la céramique CC670. L'analyse des valeurs des longueurs du copeau produit nous amène à dire que les vitesses 120m/min pour le CBN7020 et 60 m/min pour la céramique CC670, conduisent à un meilleur rendement (Tab.6).

L'analyse comparative des tenues des deux matériaux

Matériaux de Coupe	Modèle de Taylor sous ses deux formes		Coef. de détermination R ²
	[VB]=0.3mm	[VB]=0.4mm	
Nitrure de bore cubique CBN7020	$V T^{0,472} = 954,766$	$V T^{0,533} = 1427,538$	0.994
	$T = \exp^{14,52} V^{-2,117}$	$T = \exp^{13,625} V^{-1,876}$	0.992
Céramique Composite CC670	$V T^{0,259} = 189,244$	$V T^{0,251} = 201,461$	0.974
	$T = \exp^{20,702} V^{-3,948}$	$T = \exp^{21,103} V^{-3,977}$	0.990

Tableau 4: Modèles de Taylor sous ses deux formes.

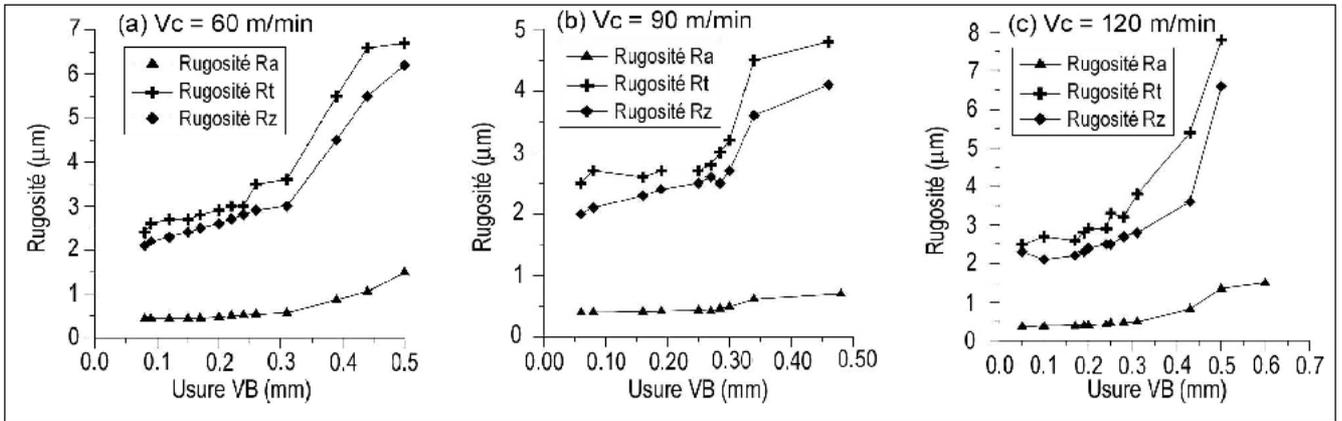


Figure 8: Rugosité en fonction de l'usure (VB) de la CERAMIQUE CC670 à différentes vitesses de coupe.

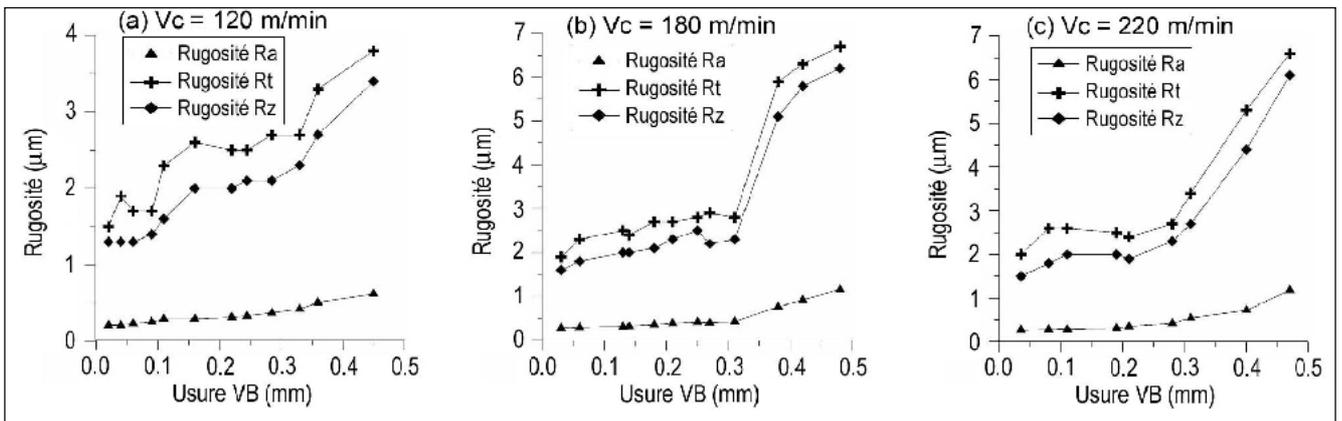


Figure 9: Rugosité en fonction de l'usure (VB) du NITRURE DE BORE CBN 7020 à différentes vitesses de coupe.

de coupe testés montre, qu'avec la vitesse de $V_c=120$ m/min, les durées de vie respectives du CBN7020 et de la céramique CC670 sont de 80 min et 6.2 min. On remarque que la tenue du CBN7020 est 13 fois supérieure à celle de la céramique CC670. Ces performances du CBN7020 pour les opérations de finition de l'acier 100Cr6 trempé, peuvent être expliquées par la haute rigidité et la tenue exceptionnelle de ses arêtes de coupe, ajoutées à cela son excellente dureté et sa stabilité chimique à des températures élevées, ce qui rend ce matériau de coupe moderne approprié à l'usinage de finition des matériaux durs.

Les durées de vie des deux outils trouvées montrent que le CBN7020 présente une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé dans la plage de vitesses [120 – 220] m/min. Par contre, l'usinage avec la céramique composite CC670 à la vitesse de 120 m/min, se caractérise par une instabilité et un étincelage énorme, conduisant à la rupture de l'outil après quelques minutes de travail. C'est pourquoi, pour garder une tenue intéressante sur le plan industriel, il est conseillé d'éviter les vitesses supérieures à 120 m/min (Fig.15 et 16).

Lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé à 60HRC et dans des conditions de coupe stables, les copeaux obtenus sont fragmentés et dentelés. Nous avons remarqué que cette forme change suivant la vitesse de coupe, l'usure et l'écaillage de l'outil. Ces derniers introduisent des

Matériaux	Augmentation de la vitesse (m/min)	Rapport des tenues
Nitrure de bore cubique CBN7020	de 120 à 180	2.28
	de 120 à 220	3.63
	de 180 à 220	1.6
Céramique Composite CC670	de 60 à 90	5.27
	de 60 à 120	15.32
	de 90 à 120	2.9

Tableau 5: Conséquence de l'augmentation de la vitesse sur la tenue des deux matériaux.

Vitesse de coupe (m/min)	Tenue (min)		Longueur de copeau (m)	
	[VB] = 0.3mm	[VB] = 0.4mm	[VB] = 0.3mm	[VB] = 0.4mm
120	80	105	9600	12600
180	35	47.3	6300	8514
220	22	34	4840	7480
60	95	114	5700	6840
90	18	30	1620	2700
120	6.2	7	744	840

Tableau 6: Longueur du copeau enlevé à différentes vitesses de coupe.

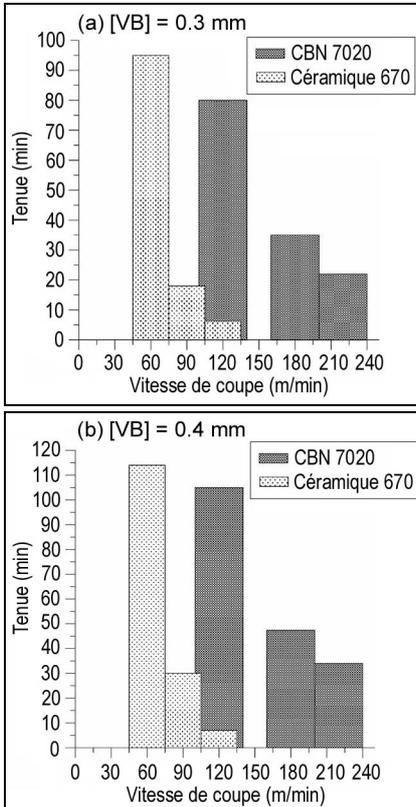


Figure 10: Tenues du CBN 7020 et de la CERAMIQUE CC670 à différentes vitesses de coupe.

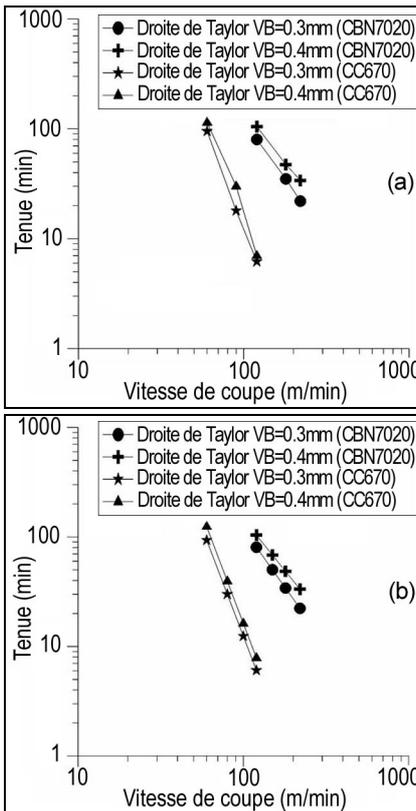


Figure 11: Valeurs des tenues des deux outils de coupe en fonction de la vitesse de coupe, (a) expérimentales et (b) calculées d'après les modèles.

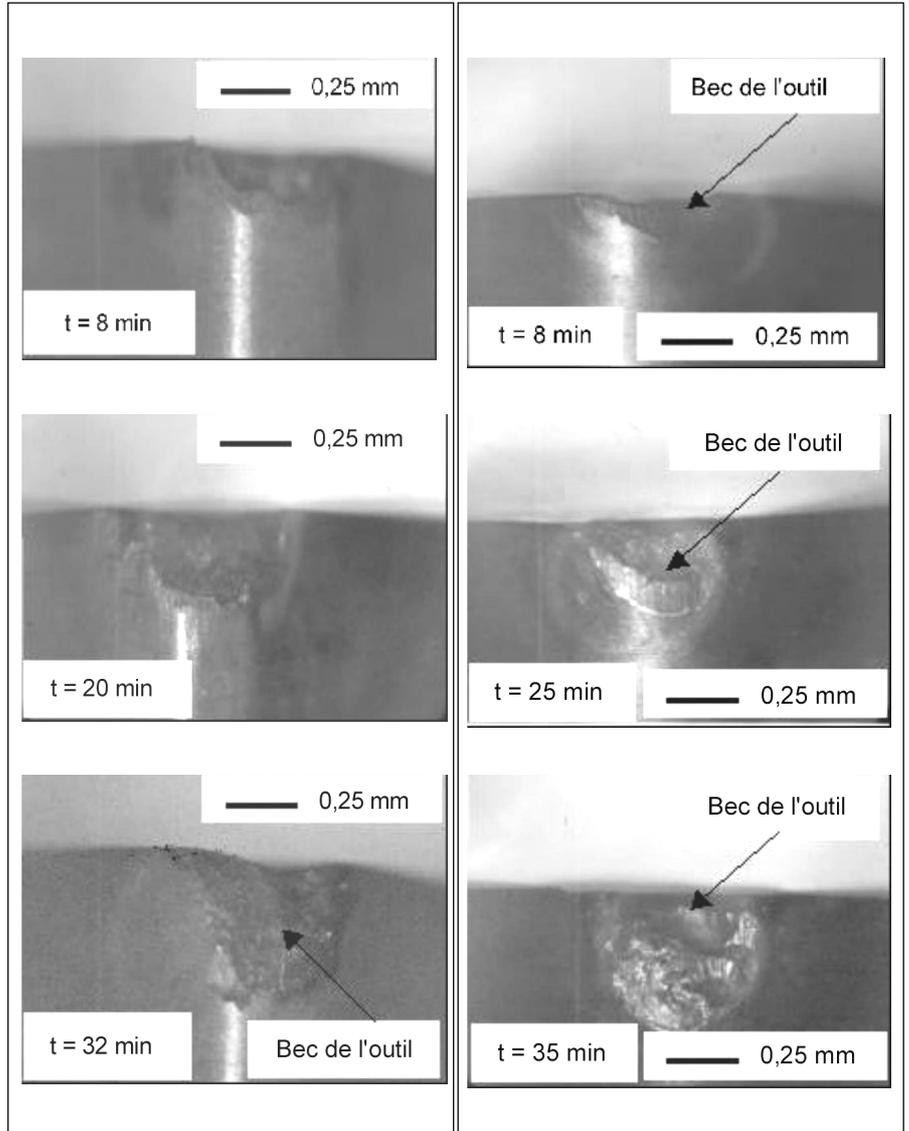


Figure 12: Evolution de l'usure en dépouille de la céramique CC670 jusqu'à l'effondrement de l'arête de coupe, $V_c=90$ m/min ; $f=0.08$ mm/tr ; $a_p=0.5$ mm.

Figure 13: Evolution de l'usure en dépouille du CBN 7020 jusqu'à l'effondrement du bec de l'outil, $V_c=220$ m/min ; $f=0.08$ mm/tr ; $a_p=0.5$ mm.

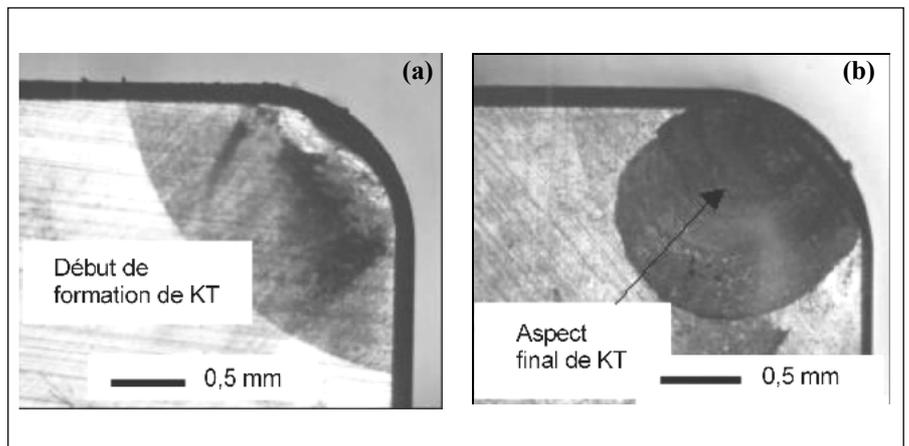


Figure 14: Aspect de l'usure en cratère du CBN7020 après un temps d'usinage de 9 min (a) et 80 min (b). $V_c=120$ m/min ; $f=0.08$ mm/tr ; $a_p=0.5$ mm.

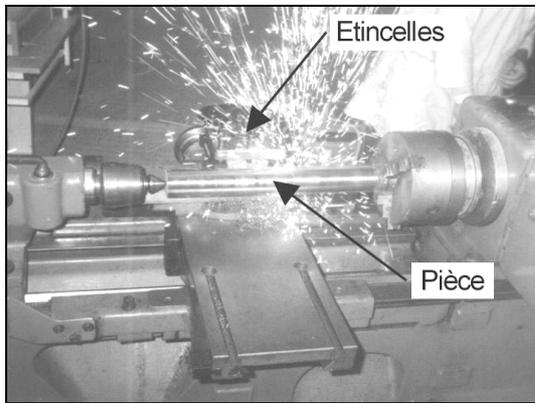


Figure 15: Etincelage lors de l'usinage avec la céramique CC670 à 120 m/min.

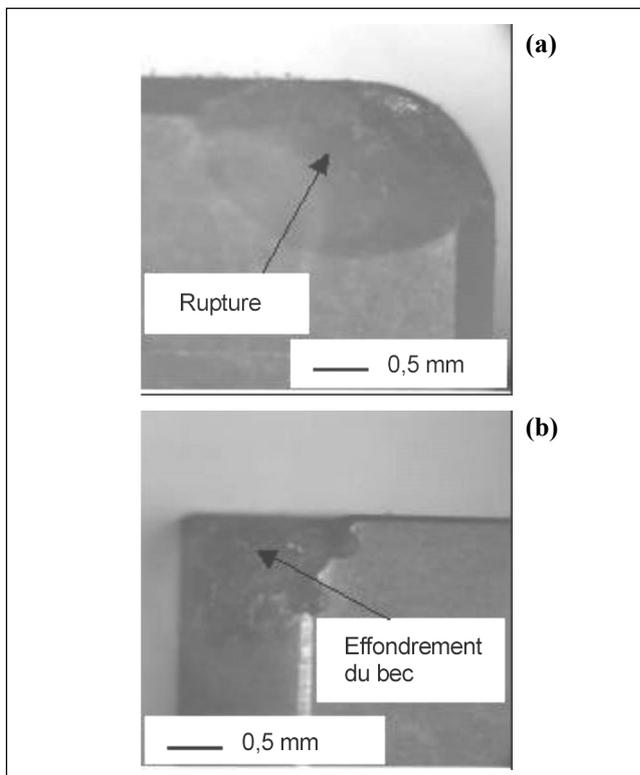


Figure 16: Aspect de la céramique CC670 sur la surface en dépouille (a) et en cratère (b) après 7 min de travail, $V_c=120$ m/min ; $f=0.08$ mm/tr ; $a_p=0.5$ mm.

changements au niveau de la géométrie de la partie active de l'outil de coupe, qui influe à son tour sur la forme du copeau.

L'analyse de l'influence de l'usure sur la rugosité à différentes vitesses de coupe (Fig.8 et 9) montre que l'augmentation de l'usure en dépouille (VB) du CBN7020 et de la céramique CC670 conduit directement à une dégradation de la surface usinée. Tant que l'usure est régulière et ne dépasse pas la valeur admissible $[VB]=0.3$ mm, l'évolution de la rugosité est très lente et l'état de surface reste bon. Au-delà de cette valeur, la rugosité augmente brusquement mais reste fort acceptable. Les qualités des surfaces, obtenues lors du tournage de l'acier 100Cr6 trempé à l'aide du CBN7020, sont

comparables à celles obtenues en rectification ($0.2\mu\text{m} < Ra < 1.6\mu\text{m}$), même avec une usure qui dépasse $[VB]=0.3$ mm.

Si l'on fait un bilan thermique lors de l'usinage de l'acier trempé 100Cr6 par l'outil CBN7020 dans l'intervalle des vitesses de coupe supérieures à 120 m/min, on remarque que la coupe est caractérisée par un écoulement du copeau au rouge. Bien que la température du copeau augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la température de la pièce ne varie presque pas, alors qu'un échauffement se produit par des vitesses de coupe plus faibles. La chaleur produite lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé à grande vitesse de coupe est en effet évacuée par le copeau, les échanges thermiques avec la pièce étant minimes, car le temps de contact entre le copeau et la pièce est faible (Fig.17).

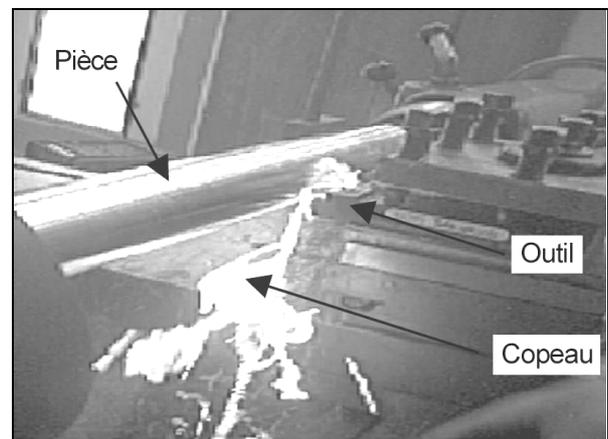


Figure 17: Evacuation de la chaleur par le copeau.

Les modèles mathématiques trouvés montrent la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie du CBN7020 et de la céramique CC670. Ils permettent donc de déterminer, pour des conditions de coupe stabilisées, la vitesse de coupe à utiliser en fonction de la durée de vie souhaitée. Avec le modèle de Taylor, la vitesse de coupe a une influence capitale sur la durée de vie des outils; avec son augmentation, la tenue des deux matériaux de coupe diminue. Ces modèles sont très utiles pour l'élaboration des abaques et aussi l'optimisation éventuelle du processus de coupe. Les coefficients de corrélation des modèles trouvés sont élevés et convergent vers l'unité, ce qui traduit leur bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

CONCLUSION

Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- 1) Malgré l'usinabilité difficile de l'acier 100Cr6, le CBN7020 s'est montré relativement très résistant à l'usure par rapport à la céramique CC670, et ceci, même en travaillant avec des vitesses de coupe élevées. Sa grande résistance à la dureté lui a permis de donner un très bon état de surface en dehors de l'intervalle de l'usure admissible $[VB]=0.3$ mm.
- 2) Grâce à son excellent effet sur la qualité des surfaces usinées, le CBN7020 offre la possibilité d'exécuter des opérations d'ébauche et de finition sur le même poste de

travail, influant avantageusement sur le cycle de production, sur le coût de fabrication et sur la précision des pièces usinées.

- 3) La grande quantité de chaleur produite pendant l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé est évacuée principalement par le copeau, évitant la dilatation thermique de la pièce, c'est-à-dire qu'elle ne sera pas affectée thermiquement.
- 4) L'usure des outils en CBN7020 et en céramique CC670 influe sur la rugosité de la surface usinée, et en particulier aux vitesses de coupe élevées. Avec l'évolution de l'usure des outils, l'état de surface du matériau usiné se dégrade.
- 5) Les modèles trouvés dans cette étude sont en bonne corrélation avec les valeurs obtenues expérimentalement et ils sont utiles pour l'établissement des abaques et pour une éventuelle étude d'optimisation.
- 6) Les vitesses de coupe utilisées pour la céramique CC670 peuvent paraître faibles vis-à-vis de celles utilisées par le CBN7020. Mais c'est une question de coût; pour travailler vite et pour la grande série, on choisit le CBN7020. La céramique composite CC670 est moins productive par rapport au CBN7020, c'est pourquoi elle est conseillée pour des productions très réduites et à des vitesses de coupe basses.

NOMENCLATURE

a_p	: profondeur de passe [mm]
f	: avance [mm/tr]
HB	: dureté Brinell
HRC	: dureté Rockwell
[KT]	: usure en cratère admissible [mm]
KT	: usure en cratère [mm]
r	: rayon de bec de l'outil [mm]
R^2	: Coefficient de détermination
R_a	: écart arithmétique moyen [μm]
R_t	: écart total de la rugosité [μm]
R_z	: profondeur moyenne de la rugosité [μm]
T	: durée de vie de l'arête de coupe [min]
t	: temps de coupe [min]
[VB]	: usure en dépouille admissible [mm]
VB	: usure en dépouille [mm]
VN	: usure en entaille [mm]
Vc	: vitesse de coupe [m/min]
α	: angle de dépouille [degré]
χ_r	: angle de direction principale [degré]
γ	: angle de coupe [degré]
λ	: angle d'inclinaison d'arête [degré]

REFERENCES

- [1]- Pastor H., "The evolution of cutting tool materials", *Bulletin du cercle d'études des métaux*, N°3, nov. (1996), pp.7.1-7.11.
- [2]- Chancel P., "Les nouveaux outils coupants", *CETIM information*, N°147, fév. (1996).
- [3]- Boulanouar 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), pp. 43-46.
- [4]- Maamar M., Girot F., "Etude de l'usure des outils de coupe lors de l'usinage d'un composite (AS7G06+15% de SiC particulaire)", *Mécanique Industrielle et Matériaux, Revue du GAMI*, Vol.47-N°3, sept. (1994).
- [5]- 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*, N°88 (1999), pp.114-121.
- [6]- Boulanouar L., Becir N., "Etude de l'influence des outils en CBN sur l'état de surface de l'acier 100C6", *Mécanique industrielle et matériaux*, Vol 50, N°4, Nov. (1997), pp. 179-181.
- [7]- Yaltese M.A. et Boulanouar L., "Etude des performances des outils céramiques lors du tournage", Conférence internationale sur la productique CIP 2001, Alger juin (2001), pp.345-350.
- [8]- Yaltese M.A., "Etude du comportement des matériaux de coupe modernes", Rapport de projet de recherche N°J2425/01/99, Université de Guelma, Algérie.
- [9]- Hug J.L., "Tournage des métaux durs", *Machine de production*, (1995), pp.17-19.
- [10]- König K., "Machining of hard materials", *Annals of the CIRP*, (1984), pp.417-427.
- [11]- Nottle 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.
- [12]- Kaufeld M. et S.Torbay, "Rationalisation de l'usinage très grande vitesse", SOFETEC (1999).
- [13]- Dietrich R., Garsaud D., Gentillon S., Nicolas M., "Précis de méthodes d'usinage", 5^e édition, Nathan (1992).
- [14]- Poulachon G., "Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis", Thèse de doctorat de l'ENSAM de Cluny, (1999).
- [15]- Bedrin C. et Roumesy B., "Usinage par outil coupant", fascicule 1-2, INSA Lyon (1989).
- [16]- Yaltese M.A., Boulanouar L. et Belhadi S., "Etude de l'usure de la céramique composite et du CBN7020 lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé", les VIIIèmes Journées Maghrébines des Sciences des Matériaux, Bizerte, Tunisie 25-27 Mars (2002). □