

# ETUDE DU COMPORTEMENT A L'USURE DU CBN 7020 LORS DE L'USINAGE DE L'ACIER 100Cr6 TREMPÉ

## Résumé

Dans cet article sont exposés les résultats d'une étude expérimentale sur le comportement à l'usure d'un outil de coupe en Nitrure de Bore Cubique (CBN7020) et l'effet de l'usure sur la rugosité de la surface lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé. Les essais ont été réalisés dans des conditions proches de celles industrielles. Les résultats montrent qu'en travaillant avec des vitesses de coupe relativement élevées, le CBN7020 s'est montré très résistant à l'usure. Il a également donné de très bons états de surface même au-delà de l'usure admissible [0,3]mm. Le CBN permet donc de réaliser avec le même outil des opérations d'ébauche et de finition sur le même poste de travail (tournage). Dans ce cas la phase habituelle de rectification est éliminée. Ceci va influencer avantageusement sur le cycle et le coût de fabrication ainsi que sur la précision macro- et micro-géométrique des pièces usinées. Des modèles mathématiques pour la prédiction éventuelle de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe sont proposés.

**Mots clés :** Usure - Usinage - Durée de vie - Nitrure de bore cubique - Acier - Rugosité.

## Abstract

*This paper deals with an experimental study on wear behaviour of a cutting tool made of Cubic Boron Nitride (CBN7020). It also presents the effect of wear on the roughness of machined surface of a hardened 100Cr6 steel. The tests were carried out under conditions similar to those of industrial manufacturing. The obtained results show that CBN7020 was very resistant to wear at relatively high cutting speeds and gave very good surface qualities even beyond acceptable wear limit [0,3] mm. The CBN tools thus, make it possible to perform roughing and finishing operations on the same machining station and the grinding phase is simply eliminated. This approach will influence advantageously the production cycle and the manufacturing cost as well as the dimensional precision of machined parts. Mathematical models for possible tool-life prediction as a function of cutting speed are proposed.*

**Key words :** Wear - Machining - Tool Life - Cubic Boron Nitride - Steel - Roughness.

## 1. INTRODUCTION

Les progrès techniques dans le domaine de l'automobile, de l'espace et du nucléaire, ont imposé l'emploi des matériaux très durs à usinabilité difficile et qui demandent pour leur usinage des matériaux à outils très résistants. Les outils de coupe en aciers rapides, en carbures et en cerinets sont utilisés en tournage pour la plupart des matériaux usinés [1], mais leur tenue est limitée et leur usage est parfois impossible lorsque certaines pièces à usiner se caractérisent par une grande dureté et une résistance à l'abrasion très élevée [2, 3]. C'est principalement, le

cas des aciers et des fontes trempés, des alliages réfractaires à base de nickel et des matériaux composites à matrice métallique. Parallèlement, progrès font apparaître de nouveaux matériaux susceptibles d'être utilisés pour réaliser des outils coupants modernes répondant à ces exigences. 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 pendant le déroulement du processus de coupe, en particulier l'évolution de l'usure des outils [4, 5]. Notre étude s'inscrit dans ce cadre, les essais réalisés nous ont permis d'évaluer les capacités de coupe d'un outil représentant une grande famille de matériaux de coupe modernes, qui

M.A. YALLESE\* & L. BOULANOUAR\*\*

\* Laboratoire mécanique et structure (LMS),  
Centre universitaire de Guelma, BP 401, 24000  
Guelma, Algérie.

\*\* Laboratoire Mécanique des Matériaux et  
Maintenance Industrielle (LR3MI), Département de  
Génie mécanique, Université Badji Mokhtar  
Annaba, 23000, Algérie.



est en l'occurrence le « Nitrure de Bore Cubique CBN7020 ».

## 2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les essais ont été réalisés conformément aux essais d'usure de longue durée [NF E66-505] et cela pour évaluer la durée de vie de l'outil en Nitrure de Bore Cubique CBN7020 [6]. Ce type d'essais offre la possibilité de travailler dans des conditions proches de celles de l'industrie. Les équipements utilisés pour les essais ainsi que les conditions de coupe sont les suivants :

### 2.1 Equipements utilisés :

- **Machine-outil** : Tour très rigide (TOS TRENCIN) modèle SN40 de puissance sur la broche égale à 6,6 kW.

- **Outil de coupe** : Le porte plaquette utilisé est du type PSBNR2525K12, ayant la géométrie suivante :  $\chi_r^\circ = 75$  ;  $\alpha^\circ = 6$  ;  $\gamma^\circ = -6$  ;  $\lambda^\circ = -6$ .

- **Plaquettes** : Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée, toutes les informations relatives aux plaquettes sont regroupées dans le tableau 1.

- **Appareil de mesure de l'usure** : Pour la mesure de l'usure on a utilisé un microscope optique type HUND (W-AD) équipé d'une camera CCD.

- **Appareil de mesure de la rugosité** : Pour la mesure des différents critères de rugosité on a utilisé

un Rugosimètre SurfTest 301 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante intégrée de profil de rugosité.

- **Matériau à usiner** : Nous avons usiné des rondins d'acier 100Cr6 trempé de diamètre extérieur  $D = 80\text{mm}$  et de longueur  $L = 400\text{mm}$ , avant la composition chimique suivante (Tab. 2).

Cet acier est très résistant à l'usure, il est utilisé surtout pour la fabrication des billes, rouleaux, bagues et cages de roulements. On l'emploie également pour l'usinage à froid comme matrices de formage, cylindres de laminaires et comme revêtement d'usure [7].

### 2.2 Conditions de traitement thermique

Les conditions de traitement thermique de l'acier 100Cr6 sont indiquées dans le Tableau 3.

### 2.3 Conditions de coupe

Les essais d'usure effectués par le CBN7020 sont planifiés suivant la méthode unifactorielle, les conditions de coupe sont les suivantes :

- Vitesse de coupe :  $V_{c1} = 120\text{ m/min}$  ;  $V_{c2} = 180\text{ m/min}$  ;  $V_{c3} = 220\text{ m/min}$ .

- Avance :  $f = 0.08\text{ mm/tr.}$

- Profondeur de passe :  $a_p = 0.5\text{ mm}$ .

- Usinage à sec.

- Usure admissible en dépouille et en cratère (d'après ISO) :  $[VB] = 0.3\text{ mm}$  et  $[KT] = 0.15\text{ mm}$ .

Tableau 1 : Caractéristiques des plaquettes utilisées.

Matériau de coupe	Composition chimique	Désignation	Firme
Nitrure de Bore Cubique	57%CBN+35%TiCN+8%autres	SNGA 12 04 08 (7020)	Sandvik

Tableau 2 : Composition chimique de l'acier 100Cr6.

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

Tableau 3 : Condition de traitement thermique de l'acier 100Cr6.

Acier	Dureté avant traitement	Dureté après traitement	Traitement thermique
100Cr6	285 HB	60HRC	Trempe + Revenu



### 3. RESULTATS DES EXPERIENCES

#### 3.1 Evolution de l'usure en fonction du temps

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 et de la vitesse de coupe. Les figures (1 à 3), illustrent l'évolution des paramètres de l'usure VB, KT et VN de l'outil CBN7020, face à l'acier 100Cr6 trempé.

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

Les résultats des essais de l'influence de l'usure de l'outil CBN7020 sur l'état de surface de l'acier 100Cr6 trempé, à différentes vitesses de coupe, sont représentés sur les figures de (4 à 6).

### 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 l'outil CBN 7020 à

différentes vitesses de coupe. En se basant sur les courbes d'usure  $VB = f(t)$  et en prenant comme critère d'usure admissible recommandé d'après ISO,  $|VB| = 0.3\text{mm}$  alors, on peut déterminer les tenues, à partir des points d'intersection des droites  $|VB| = 0.3\text{mm}$  avec les courbes d'usure. On trace verticalement, des droites qui donnent directement les tenues sur l'axe X. Ainsi les valeurs des tenues sont illustrées dans le tableau 4

#### 4.2 Détermination des constantes du modèle de l'usure

Le traitement des résultats de la tenue d'après la méthode des moindres carrés, a permis la détermination des constantes du modèle de Taylor pour l'outil CBN7020 testé (Tableau 5). A partir des valeurs des tenues trouvées expérimentalement (tableau 4) et à partir du modèle mathématique déduit (tableau 5), on peut tracer facilement les droites de Taylor (figure 7 et 8).

Tableau 4 : Tenues de l'outil CBN7020 à différentes vitesses de coupe.

Matériau de coupe	Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	Tenue (min)	
		$ VB  = 0.3 \text{ mm}$	$ VB  = 0.4 \text{ mm}$
Nitrure de Bore Cubique CBN7020	120	80	105
	180	35	47.3
	220	22	34

Tableau 5 : Modèle de Taylor déduit sous ses deux formes pour  $|VB| = 0.3$  et  $0.4$  mm.

Matériau	Modèle de Taylor sous ses deux formes $ VB  = 0,3\text{mm}$	Modèle de Taylor sous ses deux formes $ VB  = 0,4\text{mm}$	Coef. de corrélation (R)
Nitrure de Bore Cubique CBN7020	$V T^{0,472} = 954,766$	$V T^{0,533} = 1427,538$	R = 0,997
	$T = \exp^{11,52} V^{-2,117}$	$T = \exp^{13,625} V^{-1,876}$	R = 0,996

### 5. ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

#### 5.1 Analyse des résultats de l'usure

Lors de l'observation du mode de dégradation de l'arête de coupe principale des pastilles CBN7020, l'usure en dépouille se manifeste 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. L'augmentation de la profondeur du cratère sur la surface d'attaque de l'outil, conduit à un effondrement de l'arête de coupe, qui est du à une usure combinée de VB et KT. Cette usure est importante par conséquent elle mérite une attention particulière, puisqu'elle affecte l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce.



Les résultats de l'usure en cratère montrent que pour des vitesses de coupe élevées, les valeurs de l'usure en cratère augmentent rapidement. Ceci est dû à la vitesse d'interface, extrêmement élevée entre la surface d'attaque de l'outil et le copeau et à la grande dureté de la couche enlevée (couche trempée) d'autre part. Ces deux paramètres entraînent une élévation considérable de la température, qui conduit à l'usure en cratère. Au fur et à mesure que l'usure en cratère (KT) se rapproche de l'arête tranchante de l'outil, son évolution fragilise cette dernière et conduit à sa rupture. De ce fait cette usure doit être considérée comme un paramètre caractéristique de l'usure des arêtes de coupe de l'outil CBN7020 face aux aciers trempés.

L'analyse des résultats montre, que l'influence de la vitesse de coupe est significative. En effet, avec l'augmentation de cette dernière en remarquant une nette diminution de la tenue de l'outil CBN7020. Les conséquences sur le plan pratique de l'augmentation de la vitesse de coupe conduisent aux rapports des tenues suivants (tableau 6).

Avec l'augmentation de la vitesse de coupe la tenue de l'outil CBN7020 diminue, si on rapporte ce temps de coupe trouvé au débit du copeau produit par différentes vitesses de coupe, on peut dire que la vitesse de coupe  $V_c = 120$  m/min, conduit à un meilleur rendement,  $L = 9600$  m pour  $[VB] = 0.3$  mm et  $L = 12600$  m pour  $[VB] = 0.4$  mm, (Tableau 7).

L'analyse comparative des résultats des tenues obtenues, montre que les performances du CBN7020 dépassent de très loin celles des outils en aciers rapides, en carbures métalliques et en cermets quand il s'agit d'usiner les aciers trempés à 60 HRC [6]. Ces performances pour les opérations de finition de l'acier 100Cr6 traité, peuvent être partiellement expliquées par la haute rigidité et la tenue exceptionnelle de ses arêtes de coupe. Il faut ajouter à cela sa haute dureté et sa stabilité chimique aux températures élevées, ce qui rend ce matériau de coupe moderne particulièrement approprié à l'usinage de finition des matériaux durs.

Durant l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé par l'outil en Nitrure de Bore Cubique, on remarque que la coupe est caractérisée par un écoulement de copeau très chaud, ayant une couleur rouge. La chaleur produite lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé à grande vitesse de coupe est évacuée presque totalement par le copeau. Les échanges thermiques

avec la pièce sont minimes, car le temps de contact entre le copeau et la pièce est faible (figure 9).

Le critère d'usure recommandé par ISO et adopté dans nos essais, est l'usure en dépouille  $[VB] = 0.3$  mm. Lors de la réalisation des essais nous avons remarqué qu'aucune anomalie (vibrations, rugosité élevée ou précision non respectée) d'usinage ne s'est produite quand l'usure de l'outil dépasse la valeur  $[VB] = 0.3$  mm (dans l'intervalle: 0.3 à 0.4 mm). Pour cela on peut dire que, lors des opérations d'ébauche et de demi-finition, les exigences envers la précision et le fini sont beaucoup plus réduites par rapport à celles de l'usinage de finition. C'est pourquoi, la valeur admissible de l'usure peut être augmentée jusqu'à ce que l'outil ne perde pas ses capacités de coupe. Cela permet d'accroître non seulement la durée de vie de l'outil de coupe mais aussi la productivité de travail. Le modèle mathématique de Taylor déduit, montre la relation étroite entre la vitesse de coupe et la durée de vie des plaquettes en CBN7020. Il permet à cet effet de calculer la vitesse de coupe pour une durée de vie donnée. En outre il est très utile pour l'élaboration des abaques et pour l'optimisation éventuelle du processus de coupe. Le coefficient de corrélation du modèle trouvé, est élevé et converge vers l'unité, ce qui traduit sa bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

## 5.2 Analyse des résultats de la rugosité en fonction de l'usure

L'analyse des résultats, exprimant l'influence de l'usure sur la rugosité à différentes vitesses de coupe montre, que l'augmentation de l'usure en dépouille VB de l'outil CBN7020, conduit directement à une dégradation de la surface usinée de l'acier 100Cr6. Tant que l'usure en dépouille 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 toujours fort acceptable. Les qualités des surfaces obtenues lors du tournage de l'acier 100Cr6 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 admissible dépassant  $[VB] = 0.3$  mm.

Tableau 6 : Conséquence de l'augmentation de la vitesse de coupe sur la tenue du CBN.

Matériau	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



Tableau 7 : Longueur de copeau enlevé pour différentes vitesses de coupe.

Vitesse de coupe (m/min)	Tenue (min) [VB] = 0.3mm	Tenue (min) [VB] = 0.4mm	Longueur de copeau (m) [VB] = 0.3mm	Longueur de copeau (m) [VB] = 0.4mm
120	80	105	9600	12600
180	35	47.3	6300	8514
220	22	34	4840	7480

## 6. CONCLUSION

Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- Malgré l'agressivité accrue de l'acier 100Cr6 trempé, le CBN7020 s'est montré relativement très résistant à l'usure même en travaillant avec des vitesses de coupe élevées, ce qui lui a permis de donner un très bon état de surface en dehors de l'intervalle de l'usure admissible [VB] = 0.3 mm.
- Grâce à son excellent effet sur la qualité des surfaces usinées, la CBN offre la possibilité d'exécuter des opérations d'ébauche et de finition sur le même poste de travail. Ce qui va influencer avantageusement sur le cycle de production, sur le coût de fabrication et sur la précision macro- et micro-géométrique des pièces usinées.
- Il a été constaté que la grande quantité de chaleur produite pendant l'usinage est évacuée principalement par le copeau, ceci évite la dilatation thermique de la pièce. Tout cela peut être expliqué d'une part par le fait que la vitesse de déplacement de l'outil par rapport à la pièce est très élevée, d'autre part la quantité de chaleur produite suite aux frottements internes et externes dans la zone de coupe, n'a pas le temps nécessaire pour se diffuser dans la pièce.
- En travaillant dans ces conditions de coupe sévères (Usinage de l'acier 100Cr6 trempé à 60 HRC), le système usinant s'est montré très stable.
- Les résultats montrent que la valeur de la rugosité n'est pas stable et uniforme, mais elle subit une évolution en fonction de l'usure de l'outil CBN7020. L'endommagement et l'usure de l'outil conduisent à la dégradation de l'état de surface du matériau usiné.
- 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.

En dernier lieu, on peut dire que l'introduction des outils CBN a révolutionné les méthodes d'usinage en

fournissant un matériau de coupe très efficace pour l'usinage des matériaux dont la dureté dépasse les 45 HRC. Toutefois, en raison du coût de ce matériau d'outil, un bilan économique précis des avantages induits 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. Par conséquent les résultats obtenus, peuvent présenter un intérêt pour les entreprises de fabrication mécanique.

## REFERENCES

- [1] H. Pastor, The evolution of cutting tool materials, Bulletin du cercle d'études des métaux, N°=13, nov. 1996.
- [2] P. Chancel, les nouveaux outils coupants, CETIM information N°= 147, fev1996.
- [3] L. Boulanouar, S. Belhadi et T. Lahreche, Influence de la géométrie sur la durée de vie d'un outil de tour en acier rapide, Matériaux et Techniques N°= 9-10 1997.
- [4] L. Boulanouar et K. Becir, 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, Nov1997.
- [5] M.A. Yaltese et L. Boulanouar, Etude des performances des outils céramiques lors du tournage, Conférence Internationale sur la Productique CIP 2001 juin 2001, pp345 à 350.
- [6] M.A. Yaltese et col., Etude du comportement des matériaux de coupe modernes, Projet de recherche CNEPRU N°J2425/01/99, Université de Guelma, Algérie.
- [7] C. Barlier et L. Girardin, Mémotech Productive - Matériaux et Usinage- Editions André CASTEILLA, Paris 1986.
- [8] J.L. Hug, Tournage des métaux durs, machine de production, 1995, pp.17-19.
- [9] W. Konig, Machining of hard materials, Annals of the CIRP, 1984, pp.417-427.
- [10] A.T. Notter et P.J. Heat, Usinage des métaux ferreux de grande dureté à l'aide de l'amborite, machine-outil, N°386, 1981, pp. 166-167
- [11] C. Bedrin et B. Roumesy, usinage par outil coupant, fascicule 1-2, INSA Lyon 1989.



**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]
- T durée de vie de l'outil (tenue). [min]
- $r$  rayon du bec de l'outil. [mm]
- R coefficient de corrélation
- Ra écart arithmétique moyen. [ $\mu$ m]
- Rt écart total de la rugosité. [ $\mu$ m]
- Rz profondeur moyenne de la rugosité. [ $\mu$ m]
- [VB] usure en dépouille admissible. [mm]
- VB usure en dépouille. [mm]
- VN usure en entaille. [mm]
- Vc vitesse de coupe. [m/min]
- $\alpha$  angle de dépouille principale. [degré]
- $\gamma_r$  angle de direction principale. [degré]
- $\gamma$  angle de coupe ou d'attaque. [degré]
- $\lambda$  angle d'inclinaison de l'arête tranchante principale. [degré]

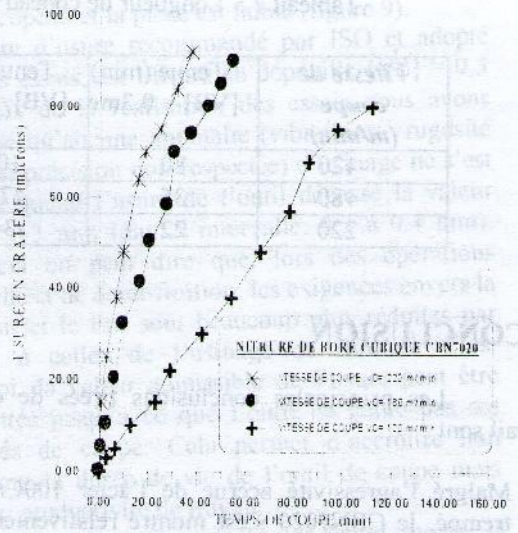


Figure 2 : Evolution de l'usure en cratère en fonction du temps.

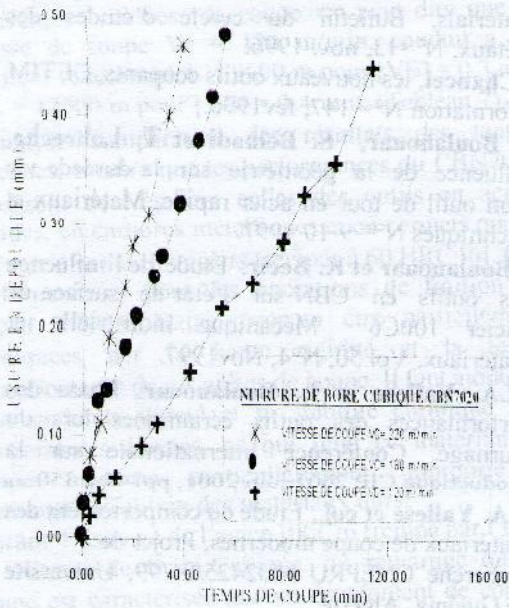


Figure 1 : Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps

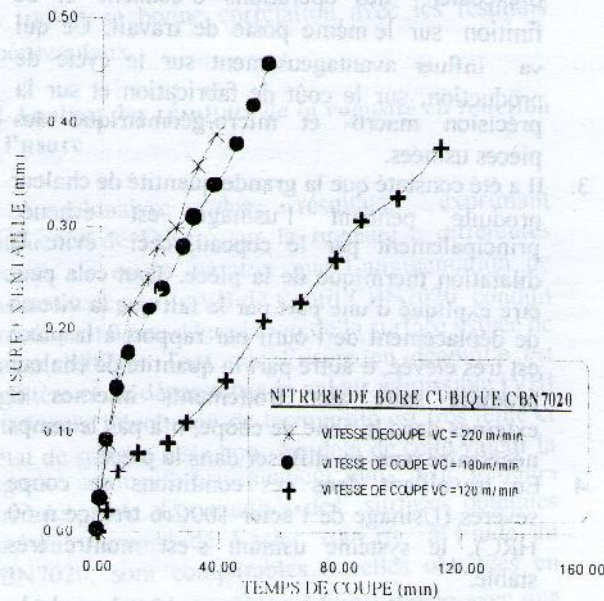


Figure 3 : Evolution de l'usure en entaille en fonction du temps.



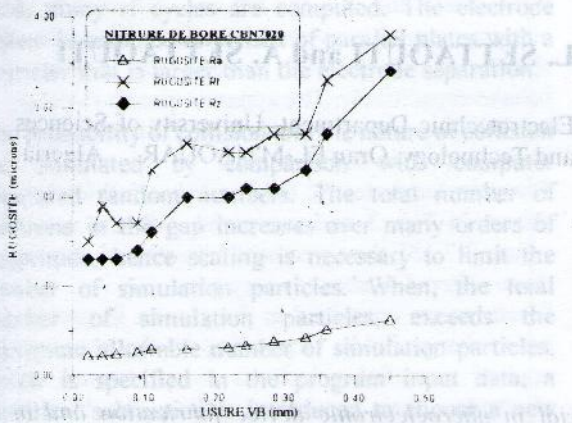


Figure 4 : Rugosité en fonction de l'usure  
 $V_c=120$  m/min;  $f=0.08$ mm/tr,  $a_p=0.5$  mm

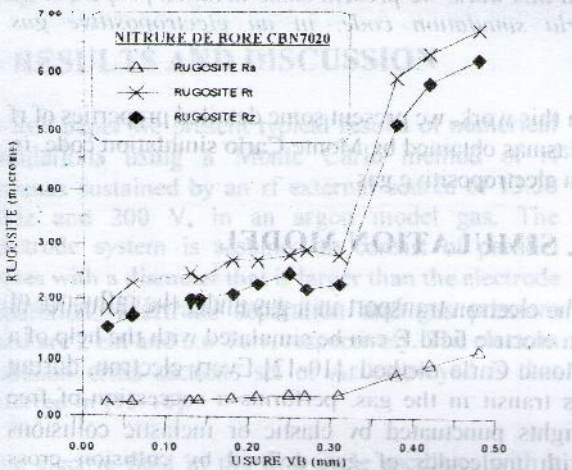


Figure 5 : Rugosité en fonction de l'usure  
 $V_c=180$  m/min;  $f=0.08$ mm/tr,  $a_p=0.5$  mm

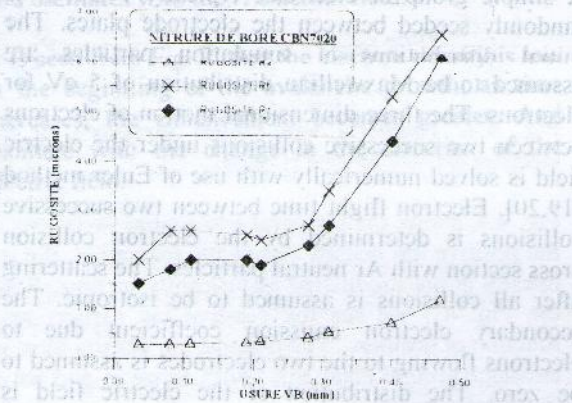


Figure 6 : Rugosité en fonction de l'usure  
 $V_c=220$  m/min;  $f=0.08$  mm/tr,  $a_p=0.5$  mm.

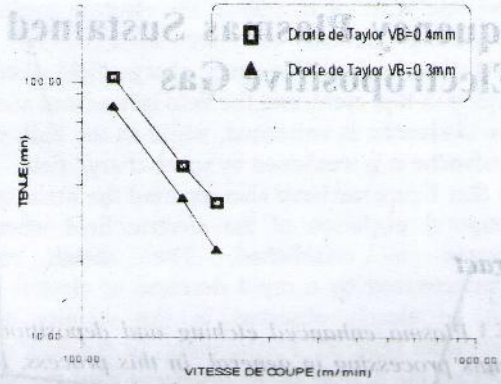


Figure 7 : Droites de Taylor tracées d'après les valeurs des tenues obtenues expérimentalement.

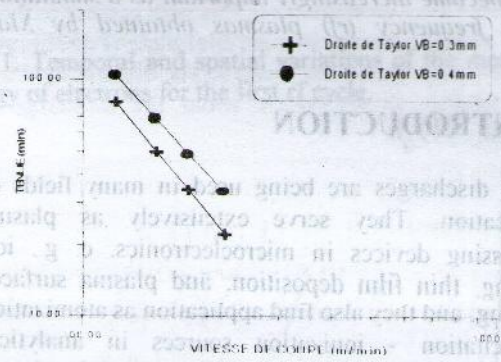


Figure 8 : Droites de Taylor tracées d'après les valeurs des tenues des modèles mathématiques déduits.

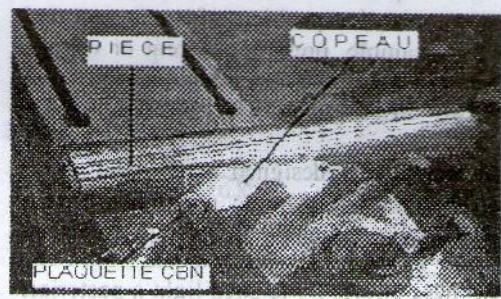


Figure 9 : Evacuation de la chaleur par le copeau durant l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé.