



INFLUENCE DES CONDITIONS DE COUPE SUR LA RUGOSITÉ DE L'ACIER 45NiCrMo16 TRAITÉ USINÉ AVEC UN OUTIL CBN

S. Belhadi^a, M.A. Yallese^a, L. Boulanouar^b & N. Ouelaa^a

a. Laboratoire mécanique et structures (LMS), Université de Guelma, BP 401, 24000 Guelma.

b. Laboratoire Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle (LR3MI), université de Annaba.

Résumé :

L'objectif de cet article est l'étude de l'effet des conditions d'usinage sur la rugosité de la surface usinée en tournage de l'acier 45NiCrMo16 trempé. L'outil de coupe utilisé est en nitrure de bore cubique (CBN TA201). Les essais ont été réalisés selon la méthode de planification des expériences. Le traitement des résultats a permis la déduction de modèles mathématiques exprimant la relation entre la rugosité et les éléments du régime de coupe. L'influence du temps d'usinage et de l'usure de l'outil a été également étudiée. Les résultats montrent que l'impact des conditions d'usinage sur la qualité de la surface usinée est significatif. Une interprétation physique des résultats expérimentaux obtenus et des modèles mathématiques déduits a été faite.

Mots clés : Rugosité, usinage dur, CBN, conditions de coupe, usure.

Abstract :

The aim of this work is to study the effect of machining conditions on turning surface roughness of hardened steel 45NiCrMo16. The used cutting tool is in cubic boron nitride (CBN TA201). The tests have been carried out in accordance with tests planning method. Mathematical models expressing the relationship between roughness and the cutting regime elements have been deduced. Cutting time and tool wear influence on roughness has been also studied. The results show that the machining conditions impact on machined surface quality is significant. Physical interpretation of the obtained experimental results and the deduced mathematical models has been done.

Keywords :

Roughness, Hard turning, CBN, Cutting condition, Wear.

1. INTRODUCTION

Depuis déjà des années les spécialistes de la coupe se sont rendu compte que plus on utilisait des vitesses de coupe élevées lors des usinages les plus divers, plus on parvenait à respecter des précisions poussées avec des finis de surfaces voisines de la rectification [1, 2, 3]. Ceci n'a été possible que grâce aux avancées prises par certains matériaux de coupe afin de répondre à un besoin de travail rapide, d'une part et aux soucis d'obtenir des finis de surface ne nécessitant plus de reprise d'autre part.

Le présent travail a pour but, d'élargir les connaissances sur l'emploi des outils de coupe modernes (Nitrure de Bore Cubique) et de cette manière contribuer à l'amélioration de leurs utilisations. En effet nous avons entamé l'étude de l'influence des éléments du régime de coupe sur un paramètre d'optimisation qui est la rugosité. Ceci dans le cas du tournage de l'acier 45NiCrMo16 à l'état trempé avec un outil en CBN (TA201). Après avoir relevé les qualités des états de surface données par le CBN, nous avons proposé des modèles mathématiques pour la détermination de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe.

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les essais de rugosité ont été réalisés suivant deux méthodes de planification des expériences, méthode unifactorielle et méthode multifactorielle. Les équipements utilisés pour la réalisation des essais ainsi que les conditions de coupe sont les suivants :

2.1 Équipements utilisés

- Machine-outil :

Tour parallèle rigide (TOS TRENCIN SN40) de puissance sur la broche égale à 6,6 kW.

- Plaquettes de coupe :

Ce sont des plaquettes amovibles à fixation par trou centrale, ayant la géométrie suivante :

$\chi_r = 90^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\gamma = -6^\circ$; $\lambda^\circ = -6^\circ$
 $r = 0,8$ mm. Les caractéristiques du CBN utilisé sont indiquées au tableau 1.

- Appareil de mesure de la rugosité :

Pour la mesure des différents critères de rugosité on a utilisé un rugosimètre surfest 301 de mitutoyo équipé d'une imprimante intégrée de profil de rugosité.

- Matériau à usiner :

Nous avons utilisé des éprouvettes en acier 45NiCrMo16 de diamètre $D=80$ mm et de longueur $L=350$ mm, ayant la composition chimique indiquée au tableau 2.

2.2 Condition de traitement thermique :

Cet acier a subi un traitement thermique de trempe et de revenu, ce qui a permis d'augmenter sa dureté de 27 à 55HRC.

2.3 Conditions de coupe :

a) Pour la méthode unifactorielle les conditions de coupe sont les suivants :

- Vitesse de coupe variable :
 $V_c = 125 - 160 - 235 - 320$ m/min ;
 $f=0,08$ mm/tr et $a_p=0,5$ mm (Constantes)
- Avance variable :
 $f = 0,08 - 0,14 - 0,20 - 0,24$ mm/tr ;
 $V_c = 118$ m/min et $a_p = 0,5$ mm (Constantes)
- Profondeur de passe variable :
 $a_p = 0,25 - 0,5 - 0,75 - 1$;

$V_c = 120$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr (Constantes)

- Usinage à sec

b) Pour la méthode multifactorielle les conditions de coupe varient dans l'intervalle suivant :

- Vitesse de coupe :
 $V_c = 83$ à 233 m/min
- Avance :
 $f = 0,08$ à $0,14$ mm/tr
- Profondeur de passe :
 $a_p = 0,25$ à $0,75$ mm
- Usinage à sec

3. RESULTATS DES EXPERIENCES

3.1 Résultats des expériences suivant la méthode unifactorielle :

Les résultats de la variation des critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) en fonction de l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont représentés sur les (fig. 1-2-3).

Les figures 4 à 7, présentent les résultats du suivi en fonction du temps de coupe des critères de rugosité étudiés.

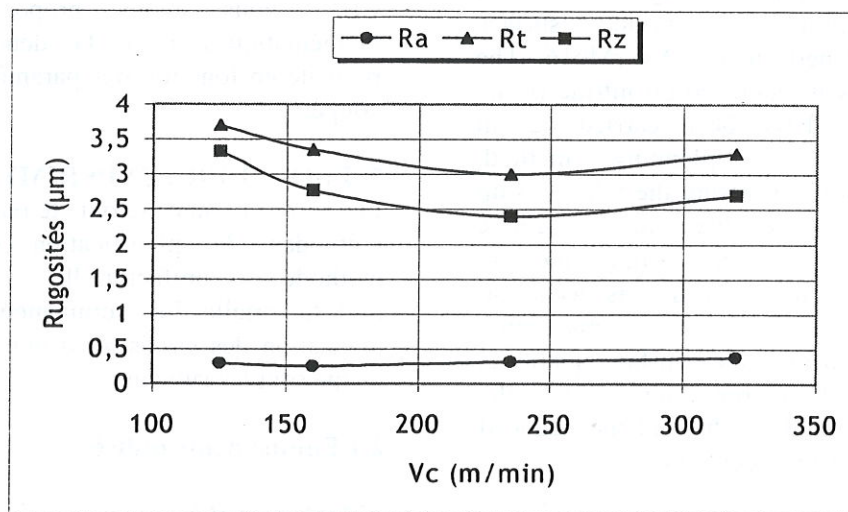


Fig. 1: Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe ($f = 0,08$ mm/tr ; $a_p = 0,5$ mm).

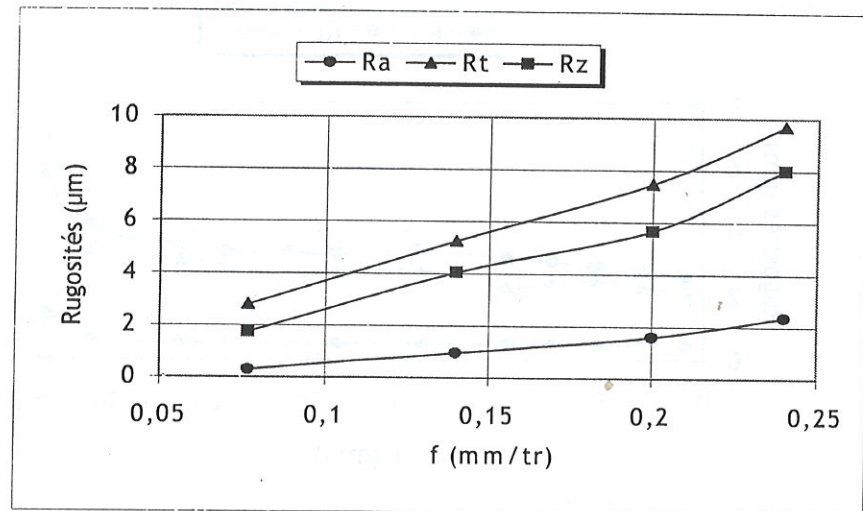


Fig. 2: Evolution de la rugosité en fonction de l'avance ($V_c = 118 \text{ m/min}$; $a_p = 0,5 \text{ mm}$).

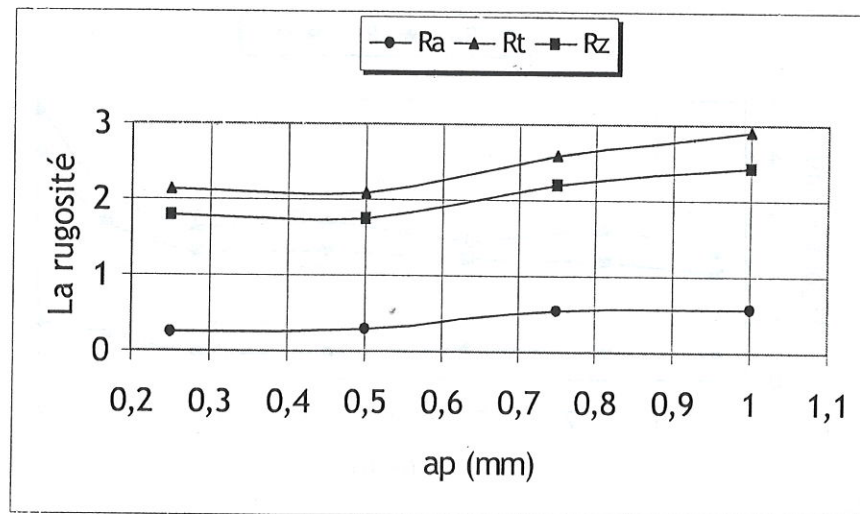


Fig. 3: Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe ($f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $V_c = 118 \text{ m/min}$).

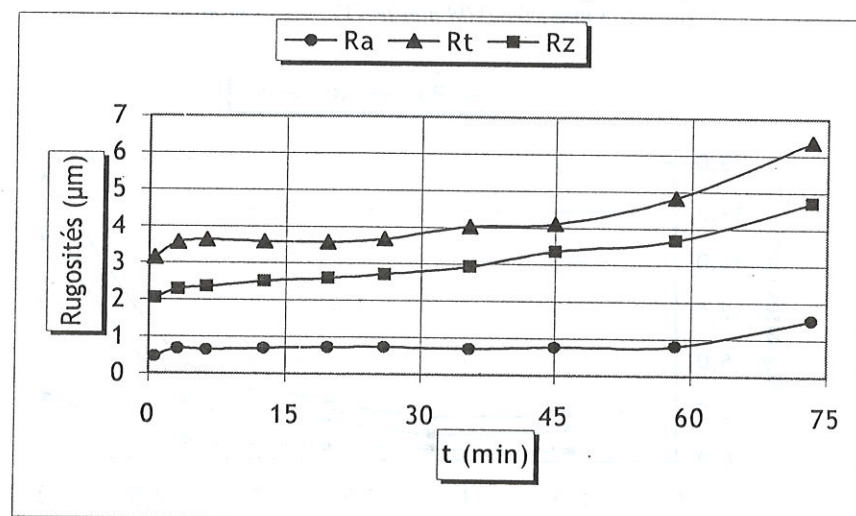


Fig. 4: Evolution de la rugosité en fonction du temps ($a_p = 0,5 \text{ mm}$; $f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $V_c = 125 \text{ m/min}$).

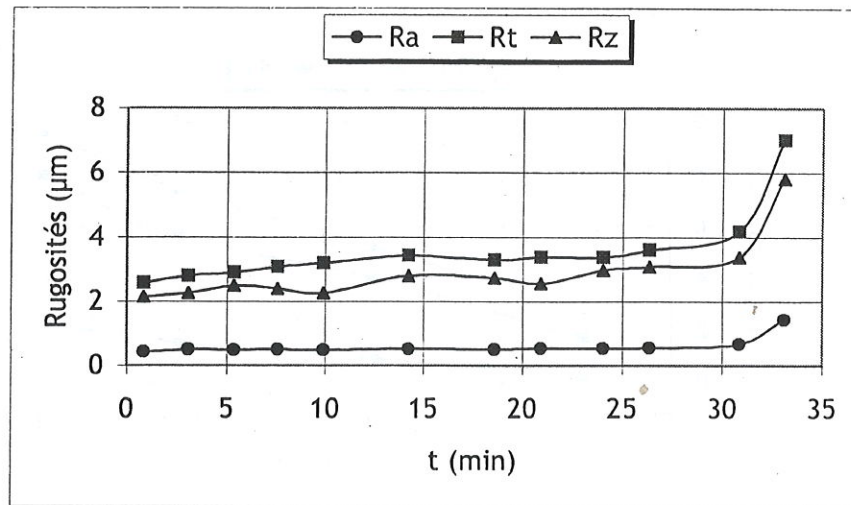


Fig. 5: Evolution de la rugosité en fonction du temps
($a_p = 0,5 \text{ mm}$; $f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $V_c = 160 \text{ m/min}$).

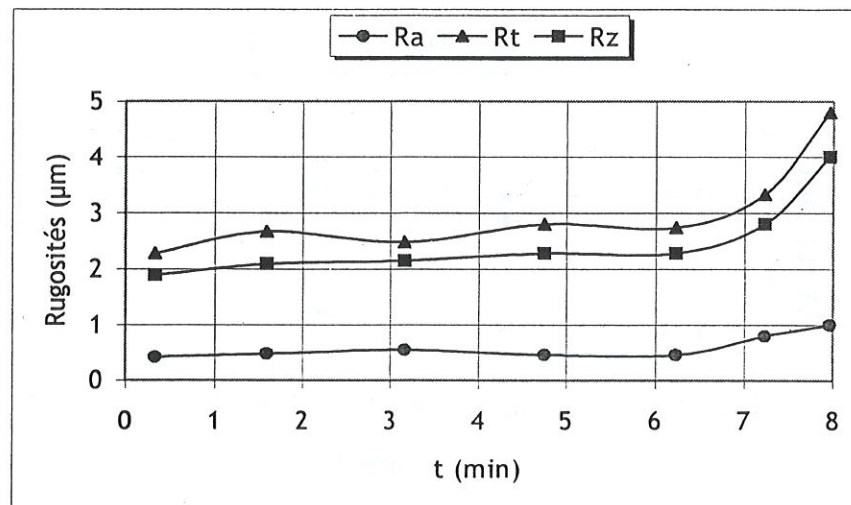


Fig. 6: Evolution de la rugosité en fonction du temps
($a_p = 0,5 \text{ mm}$; $f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $V_c = 235 \text{ m/min}$).

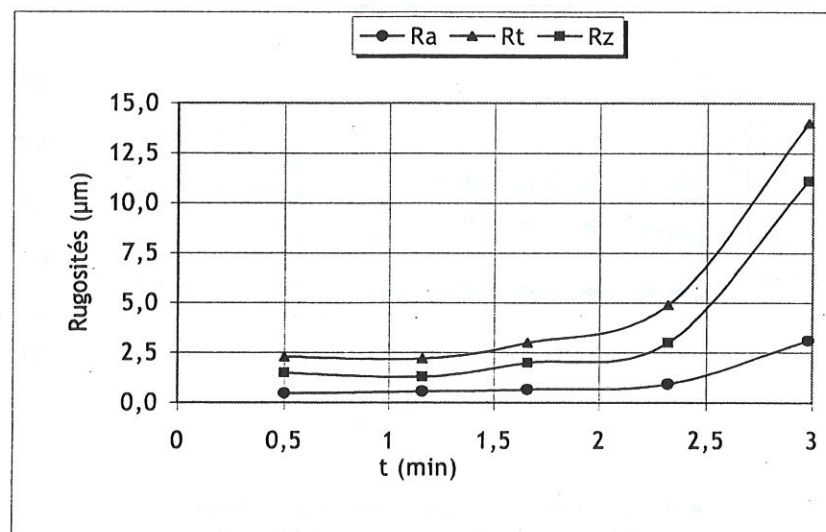


Fig. 7: Evolution de la rugosité en fonction du temps
($a_p = 0,5 \text{ mm}$; $f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $V_c = 320 \text{ m/min}$).

3.2 Résultats des expériences suivant la méthode multifactorielle :

Les résultats de la variation des critères de la rugosité (R_a , R_z et R_t) pour les différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) sont représentés dans le tableau 3.

4. EXPLOITATION DES RESULTATS

4.1 Détermination des modèles de la rugosité : (méthode unifactorielle)

Le traitement des résultats expérimentaux obtenus (fig.1-2-3), a permis la détermination des modèles statistiques, exprimant la relation entre les différents critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) et chacun des paramètres du régime de coupe (V_c , f et a_p) (tableau 4).

4.2 Détermination des modèles de la rugosité :

Le traitement des résultats obtenus (tableau 3), a permis la détermination des modèles, exprimant la relation entre les critères de rugosité et les paramètres du régime de coupe (V_c , f et a_p) ensemble (tableau 5).

5. ANALYSE DES RESULTATS

Les différents résultats obtenus témoignent de la bonne qualité de surface réalisée par le CBN TA201 lors de l'usinage du 45NiCrMo16 trempé. En effet les rugosités obtenues ($f \leq 0,2$ mm/tr) sont comparables à celles obtenues par rectification (tableau 6). Les performances du CBN TA201 sont principalement dues à la grande dureté et la stabilité chimique aux températures élevées.

Les modèles déduits dans cette étude sont en bonne corrélation avec les expériences puisque les coefficients de détermination sont assez élevés ($R^2 = 0,800$ à $0,999$). Ces modèles sont très utiles pour faire une étude économique d'une opération de tournage en prenant l'état de surface comme contrainte technologique, et permettent aussi de posséder un ensemble de données sur les facteurs du régime de coupe afin d'obtenir la productivité optimale.

Influence de la vitesse de coupe :

La vitesse de coupe possède une influence significative, en effet les résultats obtenus (fig.1) montrent que l'état de surface de l'acier 45NiCrMo16 s'améliore jusqu'à la vitesse ≈ 240 m/min, puis tend à se détériorer quant la vitesse de coupe augmente. L'amélioration de la rugosité s'explique par le fait que la matière usinée est peu ductile (acier trempé à 55HRC) et les vitesses de coupe choisies sont élevées, ce qui

ne favorise pas la formation de l'arête rapportée, Donc il n'y a pas la dégradation de l'état de surface par l'adhésion de particules ou fragments du copeau sur la surface déjà usinée. Alors que l'état de surface se dégrade lors de l'usinage avec des vitesses de coupe très élevées à cause de l'usure intense de l'arête de coupe.

Influence de l'avance :

L'avance par tour possède l'effet le plus significatif, en effet sur la courbe d'évolution de la rugosité en fonction de l'avance (fig.2), on constate une augmentation importante des différents critères de la rugosité avec l'augmentation de l'avance. D'autre part l'exposant de ce paramètre dans les modèles déduits (tableau.5) possède la valeur la plus grande en valeur absolue. Ceci est principalement dû à la cinématique de coupe.

Influence de la profondeur de passe :

Ce paramètre a une influence assez réduite sur la rugosité, les résultats des essais montrent (fig.3) que la profondeur de passe apporte une légère augmentation des différents critères de rugosité.

Influence du temps de coupe :

Les résultats des essais de la rugosité en fonction du temps de coupe à différentes vitesses de coupe (figures 4 à 7) montrent, que la rugosité n'est pas uniforme, mais évolue en fonction du temps de coupe. En effet chacune des différentes courbes peut être divisée en trois parties principales, à savoir une évolution rapide, puis une stabilisation (évolution lente) de la rugosité et en fin une dégradation rapide de l'état de surface, qui correspondent respectivement à la période de rodage de la partie active de l'outil de coupe, la période de l'usure normale de l'outil et en fin la période de l'usure catastrophique.

6. CONCLUSIONS

Les principales conclusions tirées de cette étude sont :

- Par sa résistance à l'usure le CBN est particulièrement approprié à la finition.
- Les rugosités obtenues nous permettent souvent de se passer des opérations ultérieures de rectification. Par conséquent des opérations d'ébauche et de finition peuvent être réalisées sur la même machine-outil, ce qui permet une réduction importante du temps de production.
- Les modèles obtenus sont adéquats et sont nécessaires pour une éventuelle étude d'optimisation.
- L'avance possède l'influence la plus importante, c'est d'ailleurs le premier facteur sur

lequel on doit agir en le diminuant pour améliorer la qualité de la surface usinée.

- L'influence de la profondeur de passe sur la rugosité des surfaces usinées est presque négligeable, son augmentation pourrait compenser la perte de production causer par l'usinage avec de faibles avances.
- Dans une prédiction de la rugosité lors d'une opération d'usinage, l'usure de la partie active de l'outil est un facteur à considérer. En effet ce facteur dégrade l'état de surface.
- Lors de l'usinage du 45NiCrMo16 trempé, il existe une plage de vitesse dite optimale qui permet d'obtenir une meilleure qualité de surface.

Références :

- [1] J. RIOUT, Les états de surface, CETIM-Notes Techniques, N°18, déc. 1985.
- [2] J. GIRART, Les états de surface en tournage, choix des conditions de coupe, influence des principaux paramètres de coupe" CETIM-Information, N°61, mai 79.
- [3] P. CHANCEL, Qualité des surfaces fraisées, CETIM-Information, N°161, 1998.
- [4] M.A. YALLESE, Etude du comportement des matériaux de coupe modernes, Projet de

NOMENCLATURE :

V_c	Vitesse de coupe	χ_r	Angle de direction principal [°]
f	Avance par tour [mm/tr]	α	Angle de dépouille [°]
a_p	Profondeur de passe [mm]	γ	Angle d'attaque [°]
R_a	Ecart arithmétique moyen [μm]	λ	Angle d'obliquité d'arête [°]
R_t	Ecart total de la rugosité [μm]	r	Rayon de bec de l'outil [mm]
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité [μm]	HRC	Dureté Rockwell

Tableau 1 : Caractéristiques des plaquettes utilisées.

Matériau de coupe	Composition chimique	Désignation	Firme
CBN « TA201 »	65%CBN+ TiN (liant)	TNMX 16 04 08 SN	PLANTSEE TIZIT

Tableau 2 : Composition chimique de l'acier 45NiCrMo16.

% C	%Mn	% Si	%Ni	%Cr	%Mo	%P	%S
0,43	0,51	0,22	3,90	1,80	0,34	0,032	0,035

Tableau 3 : Résultats des expériences suivant la méthode multifactorielle.

N°	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a (μm)	R_t (μm)	R_z (μm)
1	83	0,08	0,25	0,42	2,80	2,13
2	83	0,08	0,75	0,85	4,10	3,16
3	83	0,14	0,25	0,89	4,96	4,00
4	83	0,14	0,75	0,92	4,50	4,10
5	233	0,08	0,25	0,39	2,60	2,10
6	233	0,08	0,75	0,39	2,90	2,30
7	233	0,14	0,25	0,61	4,00	3,40
8	233	0,14	0,75	0,62	3,86	3,30

Tableau 4 : Modèles mathématiques déduits (méthode unifactorielle).

recherche N°J2425/01/99, Centre Universitaire de Guelma, Algérie.

- [5] M.A. YALLESE, L. BOULANOUAR et S.BELHADI Etude des performances des outils céramiques lors du tournage, Conf. Inter. sur la Productique CIP2001 Juin 2001, pp 345-350.
- [6] C.BEDRIN et B. ROUMESY, usinage par outil coupant, fascicule 1-2, INSA lyon 1989.
- [7] S. ENACHE, La qualité des surfaces usinées. Dunod, 1972.
- [8] A. CHEVALIER, guide du dessinateur industriel, hachette technique 1979.
- [9] J.L. HUG, Tournage des métaux durs, machine de production, 1995, pp.17-19.
- [10] W. KONIG et al., Machining of hard materials, Annals of the CIRP, 1984, pp.417-427.
- [11] 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.
- [12] C.O.NONGA, Etat de surface d'un composite usiné, CETIM-Information, N°141, déc 1994.

3.2 Résultats des expériences suivant la méthode multifactorielle :

Les résultats de la variation des critères de la rugosité (R_a , R_z et R_t) pour les différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) sont représentés dans le tableau 3.

4. EXPLOITATION DES RESULTATS

4.1 Détermination des modèles de la rugosité : (méthode unifactorielle)

Le traitement des résultats expérimentaux obtenus (fig.1-2-3), a permis la détermination des modèles statistiques, exprimant la relation entre les différents critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) et chacun des paramètres du régime de coupe (V_c , f et a_p) (tableau 4).

4.2 Détermination des modèles de la rugosité :

Le traitement des résultats obtenus (tableau 3), a permis la détermination des modèles, exprimant la relation entre les critères de rugosité et les paramètres du régime de coupe (V_c , f et a_p) ensemble (tableau 5).

5. ANALYSE DES RESULTATS

Les différents résultats obtenus témoignent de la bonne qualité de surface réalisée par le CBN TA201 lors de l'usinage du 45NiCrMo16 trempé. En effet les rugosités obtenues ($f \leq 0,2$ mm/tr) sont comparables à celles obtenues par rectification (tableau 6). Les performances du CBN TA201 sont principalement dues à la grande dureté et la stabilité chimique aux températures élevées.

Les modèles déduits dans cette étude sont en bonne corrélation avec les expériences puisque les coefficients de détermination sont assez élevés ($R^2 = 0,800$ à $0,999$). Ces modèles sont très utiles pour faire une étude économique d'une opération de tournage en prenant l'état de surface comme contrainte technologique, et permettent aussi de posséder un ensemble de données sur les facteurs du régime de coupe afin d'obtenir la productivité optimale.

Influence de la vitesse de coupe :

La vitesse de coupe possède une influence significative, en effet les résultats obtenus (fig.1) montrent que l'état de surface de l'acier 45NiCrMo16 s'améliore jusqu'à la vitesse ≈ 240 m/min, puis tend à se détériorer quand la vitesse de coupe augmente. L'amélioration de la rugosité s'explique par le fait que la matière usinée est peu ductile (acier trempé à 55HRC) et les vitesses de coupe choisies sont élevées, ce qui

ne favorise pas la formation de l'arête rapportée, Donc il n'y a pas la dégradation de l'état de surface par l'adhésion de particules ou fragments du copeau sur la surface déjà usinée. Alors que l'état de surface se dégrade lors de l'usinage avec des vitesses de coupe très élevées à cause de l'usure intense de l'arête de coupe.

Influence de l'avance :

L'avance par tour possède l'effet le plus significatif, en effet sur la courbe d'évolution de la rugosité en fonction de l'avance (fig.2), on constate une augmentation importante des différents critères de la rugosité avec l'augmentation de l'avance. D'autre part l'exposant de ce paramètre dans les modèles déduits (tableau.5) possède la valeur la plus grande en valeur absolue. Ceci est principalement dû à la cinématique de coupe.

Influence de la profondeur de passe :

Ce paramètre a une influence assez réduite sur la rugosité, les résultats des essais montrent (fig.3) que la profondeur de passe apporte une légère augmentation des différents critères de rugosité.

Influence du temps de coupe :

Les résultats des essais de la rugosité en fonction du temps de coupe à différentes vitesses de coupe (figures 4 à 7) montrent, que la rugosité n'est pas uniforme, mais évolue en fonction du temps de coupe. En effet chacune des différentes courbes peut être divisée en trois parties principales, à savoir une évolution rapide, puis une stabilisation (évolution lente) de la rugosité et en fin une dégradation rapide de l'état de surface, qui correspondent respectivement à la période de rodage de la partie active de l'outil de coupe, la période de l'usure normale de l'outil et en fin la période de l'usure catastrophique.

6. CONCLUSIONS

Les principales conclusions tirées de cette étude sont :

- Par sa résistance à l'usure le CBN est particulièrement approprié à la finition.
- Les rugosités obtenues nous permettent souvent de se passer des opérations ultérieures de rectification. Par conséquent des opérations d'ébauche et de finition peuvent être réalisées sur la même machine-outil, ce qui permet une réduction importante du temps de production.
- Les modèles obtenus sont adéquats et sont nécessaires pour une éventuelle étude d'optimisation.
- L'avance possède l'influence la plus importante, c'est d'ailleurs le premier facteur sur

INFLUENCE DES CONDITIONS DE COUPE SUR LA RUGOSITÉ DE L'ACIER

Matériau	Paramètres variables	Modèles	Coefficient de corrélation (R^2)
CBN TA201	Vitesse de coupe (m/min)	$R_a = 4E-06V_c^2 - 0,0013V_c + 0,3818$	0,834
		$R_t = 5E-05V_c^2 - 0,0246V_c + 5,9827$	0,999
		$R_z = 6E-05V_c^2 - 0,0316V_c + 6,2455$	0,986
	Avance (tr/min)	$R_a = 29,864f^2 + 2,9342f - 0,1007$	0,994
		$R_t = 49,442f^2 + 26,419f + 0,4206$	0,997
		$R_z = 58,448f^2 + 18,654f - 0,0189$	0,986
	Profondeur de passe (mm)	$R_a = -0,18a_p^2 + 0,695a_p + 0,0663$	0,885
		$R_t = 1,44a_p^2 - 0,664a_p + 2,18$	0,943
		$R_z = 1,16a_p^2 - 0,502a_p + 1,8175$	0,923

Tableau 5 : Modèles mathématiques déduits (méthode multifactorielle).

Matériau	Paramètres variables	Modèles	Coefficient de corrélation (R^2)
CBN TA201	V_c	$R_a = e^{0,0248} \cdot a_p^{0,183} \cdot f^{0,777} \cdot V_c^{-0,370}$	0,800
	f	$R_t = e^{2,297} \cdot a_p^{0,087} \cdot f^{0,617} \cdot V_c^{-0,035}$	0,801
	a_p	$R_z = e^{2,117} \cdot a_p^{0,116} \cdot f^{0,774} \cdot V_c^{-0,162}$	0,897

Tableau 6 : Comparaison entre la rugosité obtenue en tournage avec CBN TA201 et la rectification.

Procédés d'usinage	R_a (μm)	R_t (μm)	R_z (μm)
Tournage avec CBN TA201	$0,25 \div 1,60$	$2,40 \div 7,48$	$1,80 \div 5,66$
Rectification	$0,2 \div 1,6$	$4 \div 10$	$0,5 \div 4,0$