

# APPROCHE EXPERIMENTALE DE LA RUGOSITE EN TOURNAGE DUR

M. BOURDIM <sup>1</sup>, N. MAHMOUDI <sup>1</sup>, A. BOURDIM

1. Centre universitaire Ahmed Zabana  
Bormadia, 48000 Relizane, Algerie  
mokhtar\_61@yahoo.fr.

mahmoudi.nouredine@yahoo.fr

*RESUME.* Le tournage dur est une technique désormais pratiquée couramment dans un grand nombre d'ateliers, y compris certains restés sceptiques durant assez longtemps. Elle conduit à réduire les temps de passage des pièces à l'usinage et à supprimer, le plus souvent, des opérations de finition, en particulier sur rectifieuses. Pour un grand nombre de fabrications, les résultats obtenus sont tout à fait satisfaisants sans nécessiter de précautions particulières. Pour d'autres plus contraignantes les vitesses de coupe et avances jouent un grand rôle sur le résultat final.

Nous disons aussi que le tournage dur est un procédé prometteur qui intéresse de nombreux industriels pour les avantages qu'il présente du point de vue productivité et flexibilité. Pour maîtriser le procédé et rentabiliser son utilisation industrielle il est nécessaire d'étudier l'intégrité de l'état de surface usinée et les lois qui régissent sa variation en fonction des paramètres d'usinage.

*ABSTRACT.* Hard turning is a technique now commonly practiced in a large number of workshops, including some who have remained skeptical for quite some time. It reduces the time required for the passage of workpieces during machining and, in most cases, eliminates finishing operations, particularly on grinding machines. For a large number of manufactures, the results obtained are quite satisfactory without requiring special precautions. For other more restrictive cutting speeds and advances play a big part on the final result. We also say that hard turning is a promising process that is of interest to many manufacturers for the advantages it offers in terms of productivity and flexibility. To master the process and to make its industrial use profitable, it is necessary to study the integrity of the machined surface condition and the laws governing its variation as a function of the machining parameters.

*MOTS-CLES :* tournage dur, rugosité, flexibilité, état de surface, paramètres de coupe, usinage.

*KEYWORDS:* Hard turning, roughness, flexibility, surface finish, cutting parameters, machining.

## 1. Introduction

On appelle état de surface les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont le plus souvent mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant qui relèvent le profil de la surface [1-5].

L'aptitude d'une pièce à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions, notamment des caractéristiques de ses états de surface.

L'état de surface d'une pièce va dépendre donc :

- de sa matière ... ;
- du mode d'usinage ... ;
- du traitement de surface.

Si nous contrôlons à l'aide d'un profilomètre une surface usinée, nous obtenons un graphique dont l'image est donnée par la figure ci contre. Les déformations sont bien sûr très nettement agrandies.

De ces défauts, répartis également en surface, de part et d'autre de la ligne ox, nous retiendrons le rapport le plus influent sur la rugosité : Ra.

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage figure 1[6].

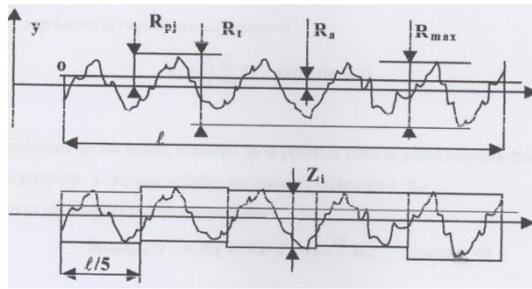


Figure 1. Critères de rugosité [1]

Soit  $ox$  la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^l y \, dx = 0 \quad (1)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne, soit :

Rugosité moyenne arithmétique  $R_a$  dite C.L.A (Center Line Average),  $R_a$  représente la moyenne arithmétique des écarts (valeur absolue) par rapport à  $ox$  :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| \, dx \quad (2)$$

Rugosité moyenne quadratique R.M.S (Root Mean Square). Ce critère (non normalisé par AFNOR) [6] représente l'écart moyen quadratique par rapport à  $ox$  :

$$R.M.S = \left[ \frac{1}{l} \int_0^l y^2 \, dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Rugosité totale  $R_{max}$ , elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité.

Rugosité totale  $R_t$ , représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil relevé sur toute la longueur de palpage  $L$ .

Rugosité  $R_z$ , représente la rugosité totale moyenne.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_1^5 Z_i \quad (4)$$

Il a été démontré que les conditions de coupe utilisées influencent de manière très significative l'intégrité des surfaces fonctionnelles. De plus les paramètres de coupe ont des effets considérables sur la qualité de la surface obtenue en tournage dur ; l'augmentation de la vitesse de coupe et la diminution de l'avance permettent la diminution de la rugosité et améliorent la qualité de la surface [7-11].

## 2. Modèle expérimental

Nous présentons dans ce paragraphe la méthodologie de l'expérimentation ainsi que le matériel mis en œuvre pour étudier l'évolution de l'état de surface obtenu par tournage dur des aciers durcis.

### 2.1. Matériel utilisé

La matière des éprouvettes usinées est un acier fortement allié selon la norme française NF A 35-590, voir le tableau 1.

Tableau 1. Matière de l'éprouvette

<i>Matière d'éprouvette</i>
<i>X100 CrMoV5</i>

Le durcissement de l'éprouvette est obtenu par une trempe à 940° suivie d'un revenu à 280°C afin d'obtenir une dureté de 62 HRC.

L'outil de coupe figure 2, est formé d'une plaquette triangulaire irréversible en carbure de titane revêtu de type TNMG 16 04 08 et d'un porte outil de désignation SOGIMO 90°20W3K10 a une géométrie suivante.

$$\psi = 95^\circ ; \alpha = 6^\circ , \gamma = -6^\circ$$



Figure 2 .Plaquette et porte plaquette

L'usinage a été réalisé sans lubrification sur un tour parallèle conventionnel de marque «TOS TRENCIN » figure 3, d'une puissance de 6,8Kw du hall technologique de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. En tournage dur, des machines extrêmement rigides, puissantes et précises sont recommandées. Toute faiblesse dans le système machine-outil entraîne une dégradation rapide de l'outil et de l'état de surface. De manière générale, un tour adapté à l'usinage des matériaux durs doit présenter un certains nombres de caractéristiques vues dans les chapitres précédents, le tour utilisé s'est avéré suffisamment rigide pour identifier le comportement de l'outil. Lors des essais nous n'avons pas observé de phénomène de broutement, sauf quelques vibrations ont été observées pour les sections de copeau les plus élevées.

Afin d'étudier l'impact des différents paramètres de coupe chaque essai est répété quatre fois. la procédure consiste à réaliser des passes de chariotage en variant les conditions de coupe et en mesurant la valeur de la rugosité Ra.



Figure 3 .Vue générale de l'usinage

Le rugosimètre PERTHEN, figure 4 est de type « PERTHOMETER C3A », muni d'un enregistreur type PERTHOGRAPH, du laboratoire de la SOREMAP de Tlemcen.



Figure 4. Rugosimètre PERTHEN

## 2.2. Conditions de coupe

Les conditions de coupe adaptées ont été déterminées suivant les exigences et les recommandations de Sandvik.

- Vitesse de coupe  $V_c$  (variable) = (100 et 200 ) m/min.
- Vitesse d’avance  $f$  (variable) = (0,08 et 0,2) mm/tr.
- Profondeur de passe  $a_p$  (variable) = (0,05 et 0,4) mm.

## 3. Résultats expérimentaux des plans d’expériences :

Le tableau ci dessous donne les valeurs de la rugosité en fonction du plan d’expérience choisi[12].

Tableau 2. Valeurs de rugosité

$N^\circ$ d’essai	$X_1 =$ $V_c(m/min)$	$X_2 =$ $f(mm/tr)$	$X_3 =$ $a_p(mm)$	$Ra_1$ $\mu m$	$Ra_2$ $\mu m$	$Ra_3$ $\mu m$	$Ra_{moy}$ $\mu m$
1	-	-	-	0,23	0,34	0,43	<b>0,333</b>
2	+	-	-	0,32	0,20	0,19	<b>0,236</b>
3	-	+	-	0,89	0,88	0,91	<b>0,893</b>
4	+	+	-	0,63	0,84	0,90	<b>0,790</b>
5	-	-	+	0,64	0,65	0,70	<b>0,663</b>
6	+	-	+	0,44	0,44	0,48	<b>0,453</b>
7	-	+	+	0,69	0,91	0,21	<b>0,603</b>
8	+	+	+	0,56	0,70	0,56	<b>0,606</b>

### 3.1. Exploitation des résultats des plans d’expériences de la rugosité

Afin de pouvoir déterminer le modèle mathématique de la rugosité exploitons les résultats des tableaux suivants tirés des plans d’expériences.

Tableau 3. Valeurs du plan d'expérience

N°	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	Y			Y moy	S <sub>i</sub> <sup>2</sup>	Ŷ	Ŷ - Y <sub>moy</sub>		
				X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>						
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,23	0,34	0,43	0,33	0,010033333	0,345	0,00013611		
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,32	0,2	0,19	0,24	0,005233333	0,243333	4,4444E-05		
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,89	0,88	0,91	0,89	0,000233333	0,901667	6,9444E-05		
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,63	0,84	0,9	0,79	0,0201	0,8	0,0001		
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,64	0,65	0,7	0,66	0,001033333	0,6	0,00401111		
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,44	0,44	0,48	0,45	0,000533333	0,498333	0,002025		
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,69	0,91	0,21	0,60	0,128133333	0,646667	0,00187778		
8	1	1	1	1	1	1	1	0,56	0,7	0,56	0,61	0,006533333	0,545	0,00380278		
Σ											4,58	0,171833		0,01207		
entrez les donnees suivantes																
résultats											N=	8	m =	3	t =	1,68
Y moy =											0,5725					
							1	0,5725	β <sub>0</sub> =	0,5725	S <sub>reg</sub> <sup>2</sup>	0,02	21,5E-3			
							1	-0,050833333	β <sub>1</sub> =	-0,0508	S(β <sub>1</sub> ) =	0,029916				
							1	0,150833333	β <sub>2</sub> =	0,1508	Δ(β <sub>1</sub> ) >=	50,3E-3				
							0	0	β <sub>3</sub> =	0,0092	S <sub>res</sub> <sup>2</sup> =	3,64E-05				
							0	0	β <sub>12</sub> =	0,0258	F <sub>exp</sub> =	0,0016947				
							0	0	β <sub>13</sub> =	-0,0008	L =	4				
							1	-0,1275	β <sub>23</sub> =	-0,1275						
							0	0	β <sub>123</sub> =	0,0275						

En exploitant les résultats ci dessus, on peut écrire directement le modèle mathématique global de la rugosité pour le matériau usiné, en considérant uniquement les coefficients de régression significatifs, il s'écrit comme suit.

$$Ra_1 = 0,57 - 0,05X_1 + 0,15X_2 - 0,12X_2X_3 \tag{5}$$

Fixons maintenant tour à tour chaque variable d'entrée (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>) à sa valeur moyenne, et examinons l'impact que cela a sur la distribution de la sortie(Ra) le modèle mathématique devient alors :

$$Ra_1(X_2, X_3) = 0,57 + 0,15X_2 - 0,12X_2X_3 \tag{6}$$

$$Ra_1(X_1, X_3) = 0,57 - 0,05X_1 \tag{7}$$

$$Ra_1(X_1, X_2) = 0,57 - 0,05X_1 + 0,15X_2 \tag{8}$$

Remplaçons maintenant chaque variable par sa vraie grandeur le modèle mathématique final s'écrit comme suit :

$$Ra_1(a, p) = 0,57 + 0,15.a - 0,12.a.p \tag{9}$$

$$Ra_1(Vc, p) = 0,57 - 0,05.Vc \tag{10}$$

$$Ra_1(Vc, a) = 0,57 - 0,05.Vc + 0,15.a \tag{11}$$

#### 4. Courbes de rugosité

La variation de la rugosité en fonction des différents paramètres de coupe (Vitesse de coupe, Vitesse d'avance et Profondeur de passe).

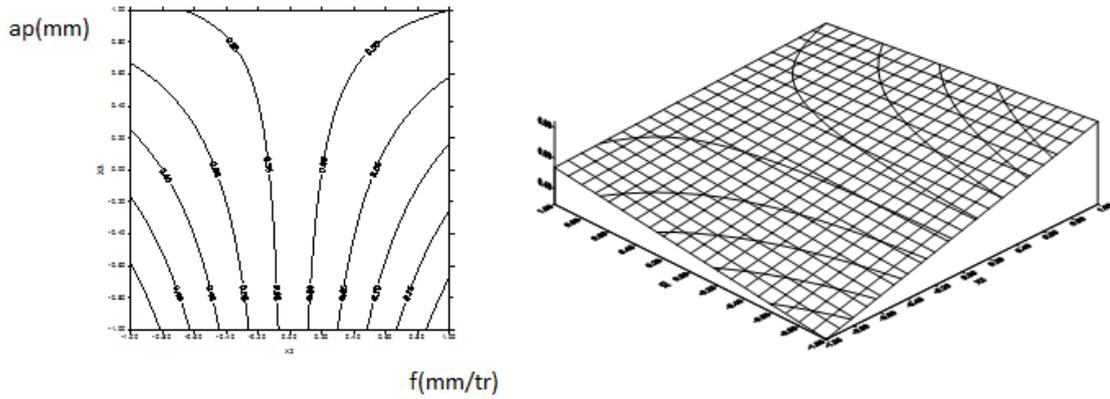


Figure 5. Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance et la profondeur de passe

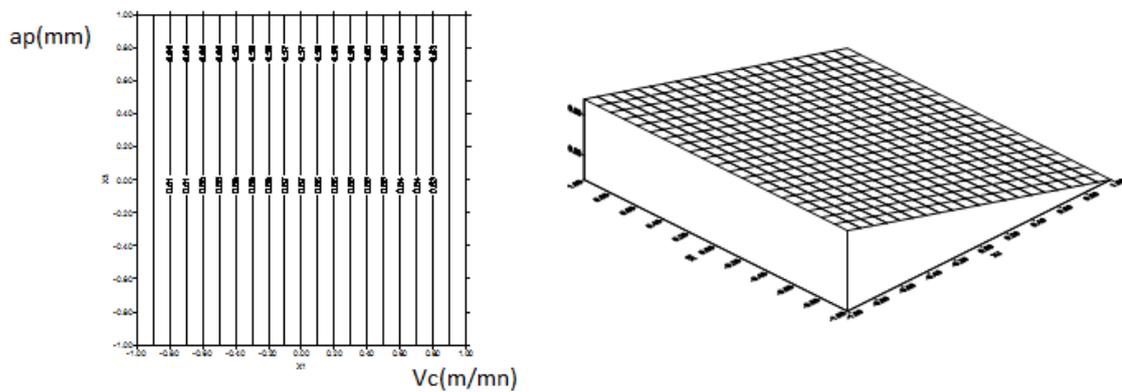


Figure 6. Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe

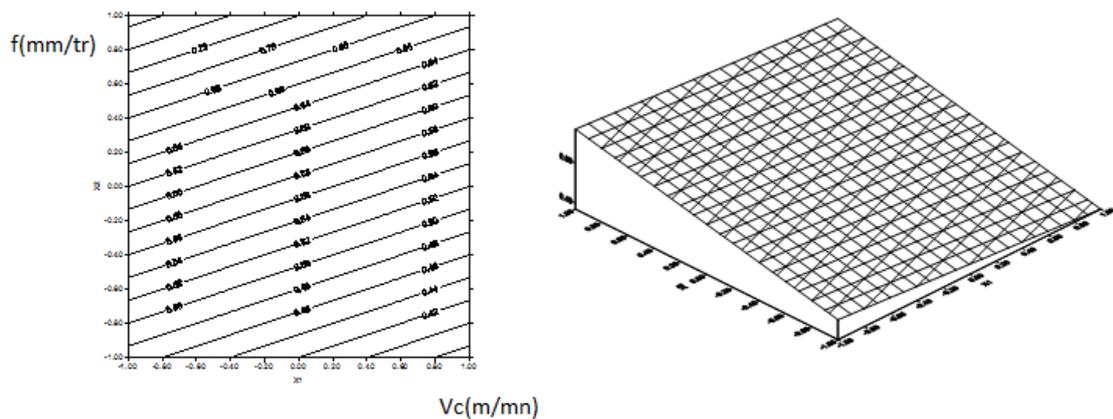


Figure 7. Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance

Les courbes tracées par surfer montrent bien que seules la vitesse de coupe et la vitesse d'avance qui ont un impact significatif sur la rugosité, par contre la profondeur de passe est presque sans effets, comme on peut le voir directement sur la figure 6, ainsi que dans le modèle mathématique global formules (7et 10) ; les deux formules ne comportent pas la variable profondeur de passe, ce ci explique le non effet de la profondeur de passe sur l'état de surface, comme synthèse on peut dire.

- La rugosité moyenne obtenue par le tournage dur du matériau usiné reste inférieur à 1 micron, ce qui appuie notre recherche bibliographique.
- L'interprétation du graphe 7 montre que la rugosité évolue linéairement avec la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, alors que la figure 6, montre que la rugosité diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe sans aucune influence de la profondeur de passe.
- Les résultats obtenus dans les figures ci-dessus convergent avec le comportement du phénomène physique de la coupe des métaux. La rugosité diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et diminue avec la diminution de la vitesse d'avance.
- En considérant un intervalle de confiance de 90% pour tracer les graphes de l'évolution de la rugosité, la profondeur de passe n'a pratiquement aucune influence sur l'évolution de la rugosité.
- La rugosité semble être une fonction décroissante de la vitesse de coupe, les résultats obtenus indiquent aussi que cette rugosité est une fonction croissante de la vitesse d'avance.
- L'analyse des résultats montre aussi que la valeur de la rugosité obtenue par le tournage dur est comparable à celle obtenue par la rectification, sauf que l'usinage est fait sur une même machine ce qui influe judicieusement le cycle d'usinage.
- Une faible vitesse de coupe entraîne un arrachement de matière, elle engendre de profonds sillons, donc un mauvais état de surface, seulement il faut éviter des vitesses de coupe importantes car le système usinant devient instable et provoque une dégradation de l'état de surface de la pièce à usiner.
- Du point de vue économie l'usinage se fait à sec aucun liquide de refroidissement n'est utilisé et par conséquent aucun déchet ne doit être éliminé.

## 5. Conclusion

Les expériences réalisées nous ont permis d'élaborer des modèles mathématiques de la rugosité et des différentes composantes ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) des efforts de coupe. Ces modèles ont été obtenus par les logiciels Surfer et celui des plans d'expérience associé à Excel, en utilisant la régression linéaire multiple et la méthodologie de surface de réponse. Les résultats indiquent que la vitesse d'avance est le principal facteur de la rugosité, suivie par la vitesse de coupe, par contre la profondeur de passe son effet n'est pas très important.

Les résultats ont révélé que la profondeur de passe influence d'une manière significative les forces de coupe que la vitesse d'avance et de la vitesse de coupe, on peut dire aussi qu'avec l'augmentation de l'avance les efforts de coupe s'accroissent à leur tour, ce qui génère des vibrations dans le système usinant et accélère le processus de dégradation de l'arête de coupe.

D'un point de vue technique, en tournage dur une bonne qualité géométrique de surface est obtenue avec des machines outils sur la base de technologies classiques en utilisant des broches avec des paliers à roulements.

Pour terminer notre étude expérimentale confirme les critères de rugosité trouvés par plusieurs chercheurs (Datta S, Fnides B et d'autres...).

### Remerciements :

*Les auteurs tiennent à remercier le responsable du hall technologique de l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen ainsi que le personnel technique de l'entreprise SOREMAP de la wilaya de Tlemcen pour leurs aides et leurs disponibilités.*

## Bibliographie et références

- Datta S et All. (2010). *Simultaneous Optimization of Correlated Multiple Surface Quality Characteristics of Mild Steel Turned Product*, Journal Intelligent Information Management, Vol.10, p.26-39.
- ENS.(1999) . *Usinage à grande vitesse*, LUPRA, Cachan.
- Fnides B et Al. (2008). *Cutting forces and surface roughness in hard turning of hot work steel X38CrMoV5-1 using mixed ceramic*, Journal Mekanika, Vol.70,p.73-78.
- Jacques J. (2011). *Pratique de l'analyse de sensibilité*, Université de lille1.
- Hamann J.C et Al. (1997). *New tool development for the high speed milling of titanium alloys*, First French and German Conference on High Speed Machining, p.356-360.

- Remadna M. (2001). *Le Comportement du système usinant en tournage dur : application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitrure de Bore Cubique)*. Thèse de Doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- Gekonde H.O and Subramanian S.V. (1997). *Influence of phase transformation on tool crater wear*, First French and German Conference on High Speed Machining, p.49-62.
- Grolleau V. (1996). *Approche de la validation expérimentale des simulations numériques de la coupe avec prise en compte des phénomènes locaux à l'arête de l'outil*. Thèse de doctorat de l'Ecole Doctorale Sciences pour l'ingénieur.
- Kagnaya M. (2009). *Contribution à l'identification des mécanismes d'usure d'un WC-6%Co en usinage et par une approche tribologique et thermique*. Thèse de doctorat de l'ENSAM.
- Komanduri R et Al. (1982). *On the catastrophic Shear Instability in High Speed Machining of an AISI 4340 Steel*, Journal of Engineering for industry, Vol.104,p121-131.
- Le Guen M. (2006). *Premiers pas en régression linéaire*, Revue MODULAD, Vol.35, p1-144.
- Reutler A. (1999). *Cutting Tool Technology in High - Speed Milling /HSM* , fraisa SA, 1999.
- Bourdim M. (2009). *Usiner en tournage dur*, 9ième Congrès de Mécanique Marrakech Maroc, 21 - 24 Avril 2009