

Application de la méthode de régression linéaire multiple pour la détermination des modèles des efforts de coupe en tournage dur

Zahia Hessainia¹, M. A. Yallese¹, Oussama Zerti¹

¹*laboratoire Mécanique et Structures (LMS), Département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma, BP 401, 24000 Guelma, Algérie, E-mail: hessainia_z@yahoo.fr*

Résumé

Dans cette étude, sont exposés les résultats expérimentaux d'une étude sur la dynamique de la coupe qui concerne la mesure des efforts de coupe générés lors de l'usinage d'un acier faiblement allié AISI 4140 à l'état traité (57 HRC) avec un outil en céramique mixte (CC650) à différents rayons du bec ($r = 0,8, 1,2$ et $1,6$) mm contenant 70% AL_2O_3 + 30% TIC. Dans cette étude nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse appliquée à un plan d'expérience de Taguchi (18 essais) avec cinq facteurs de 2 et 3 niveaux afin de faire une étude sur l'effet des cinq paramètres d'entrée à savoir, les éléments du régime de coupe [vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), profondeur de coupe (ap)] et la géométrie de l'outil [angle de direction principal (χ_r) et le rayon du bec de l'outil (r)] sur les efforts de coupe. Des modèles linéaires avec interactions reliant les efforts de coupe aux différentes combinaisons des facteurs de base ont été élaborés au moyen d'un logiciel statistique MINITAB 16 caractérisé par [l'analyse de variance (ANOVA), régression linéaire multiple de la surface de réponse] à fin d'exprimer le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe (V_c, f, ap) et la géométrie de l'outil (χ_r, r) sur les efforts de coupe. L'application de cette technique statistique montre que Les efforts de coupe (F_a, F_r et F_t) sont très affectés par l'angle de direction principal et la profondeur de passe. La précision des modèles a été vérifiée à partir des Comparaisons entre les valeurs expérimentaux et prédites. Ces tests montrent une excellente corrélation entre les modèles et les résultats.

Mots clés : Tournage dur, Efforts de coupe, Analyse de variance (ANOVA), Méthodologie de la surface de réponse (RSM), Modèles de prédiction.

Nomenclature

V_c	vitesse de coupe m/min	F_t	effort tangentiel
ap	profondeur de passe mm	λ	angle d'inclinaison en degré
f	vitesse d'avance mm/min.	γ	angle de coupe
HRC	dureté Rockwell	α	angle de dépouille
R^2	coefficient de détermination	r_e	rayon du bec (mm)
F_a	effort axial [N]	χ_r	angle de direction d'arête en degré
F_r	effort radial [N]	RSM	la méthodologie de la surface de réponse
PC%	rapport de contribution de facteur en %		

1. Introduction

Le tournage dur concerne l'usinage des matériaux ferreux durcis entre 45 et 70 HRC par des opérations principalement de finition interne ou externe [1]. Il se présente comme alternative à la rectification conventionnelle souvent longue et coûteuse lors de l'usinage des pièces de précision, c'est un procédé promoteur qui intéresse de nombreux industriels pour les avantages qu'il du point de vue productivité et flexibilité [2, 3, 4]. L'usinage des aciers durcis a connu son développement essentiellement avec l'apparition de nouveaux de coupe tels que les cermets, les céramiques et le nitrure de bore cubique [5, 6, 7]. Il résulte de ce procédé d'usinage moderne une qualité certaine avec des délais d'exécution plus courts et des coûts compétitifs [2]. L'étude des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance de coupe nécessaire pour réaliser l'usinage et permet aussi de dimensionner les organes de la machine et prévoir les déformations de la pièce pendant l'usinage. Plusieurs chercheurs [8] considèrent également les efforts de coupe comme un critère de l'usinabilité des matériaux. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail où sont présentés les résultats expérimentaux d'une étude des efforts de coupe générés lors de l'usinage d'un acier faiblement allié AISI 4140 traité à (57 HRC) avec un outil en céramique mixte (CC650).

2. Procédure expérimentale

2.1. Equipement et matériels

Les opérations d'usinage relatives aux essais sur les efforts de coupe ont été effectuées sur des éprouvettes rondes en acier traité de nuance AISI 4140 de 70 mm de diamètre et de 370mm de longueur. Cette acier présente une bonne résistance, une bonne trempabilité une résistance notable à l'usure et aux efforts mécaniques (pièce de transmission) telles que bielles, engrenages, arbres ect....

Sa composition chimique est donnée comme suit : 0.42% c ; 0.25%Si ; 0.018%S ; 0.021%Ni ; 0.209%Mo ; 0.68%Mn ; 0.013%P ; 0.022 % Cu; 1.08%Cr ; 0.004% V ; 96,95% Fe.

Le durcissement de l'acier est obtenu par traitement thermique ; trempe suivi d'un revenu à fin d'aboutir à une dureté de 57 HRC.

Ces essais sont réalisés sur un tour parallèle de marque TOS TRENCIN modèle SN40 d'une puissance sur la broche de 6.6 KW.

L'outil de coupe utilisé est la CC650 un mélange d'alumine (Al_2O_3) à base de céramique avec du carbure de titane (TiC). Suivant la norme ISO stand art, l'outil est désigné par SNGA 12 04 08 T01020. Le porte outil utilisé dont la désignation PSBNR 2525 M12 avec une partie active matérialisé par la géométrie suivante : [$Kr = 75^\circ, 45^\circ$; $\alpha = 6^\circ$; $\gamma = -6^\circ$ $\lambda = -6^\circ$, r = 0.8, 1.2 et 1.6mm] [9].

Pour la mesure des efforts de coupe on a utilisé un dynamomètre à quartz type (KISTLER 9257B) avec une gamme de mesure qui varie de -5 à 5 KW. Il permet d'enregistrer les trois

Composante des efforts de coupe dans les trois directions X, Y, Z en temps réel (Figure1)

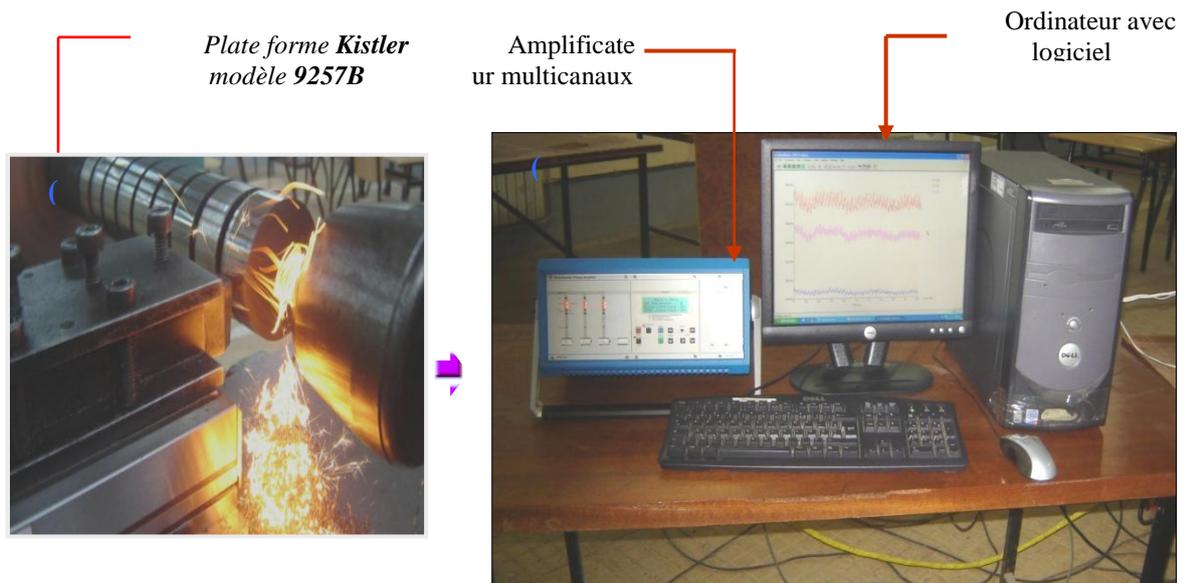


Figure 1. a) Opération du tournage dur, b) Chaîne de mesure des efforts de

Pour étudier l'impact des conditions de coupe (V_c, f, a_p) et la géométrie de l'outil (χ, r), nous avons utilisé le plan de Taguchi (18 essais) avec cinq facteurs de 2 et 3 niveaux. La procédure expérimentale consiste à réaliser des passes de chariotage en variant les conditions de coupe et la géométrie de l'outil et on mesurant les valeurs des efforts de coupe F_a, F_r et F_t respectivement. Dans cette étude, la table orthogonale standard de Taguchi (18 essais) [10] est adoptée comme plan expérimentale tableau 2. Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau 1

Tableau 1 : Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 18 essais

Niveau	Vitesse de coupe V_c (m/min)	Avance f (mm/tr)	Profondeur de coupe a_p (mm)	Rayon de bec de l'outil r (mm)	L'angle de direction principale χ
1	100	0.08	0.1	0.8	75°
2	150	0.12	0.2	1.2	45°
3	200	0.16	0.3	1.6	

Tableau 2 : Plan d'expérience de Taguchi pour un plan de 18 essais

	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	1	2
5	1	2	2	2	3
6	1	2	3	3	1
7	1	3	1	2	1
8	1	3	2	3	2
9	1	3	3	1	3
10	2	1	1	3	3
11	2	1	2	1	1
12	2	1	3	2	2
13	2	2	1	2	3
14	2	2	2	3	1
15	2	2	3	1	2
16	2	3	1	3	2
17	2	3	2	1	3
18	2	3	3	2	1

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats des essais de la rugosité selon le plan de Taguchi

Dans le tableau 3, sont présentées les valeurs expérimentales des trois composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r et F_t). Ces valeurs sont obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de 18 essais avec cinq facteurs de 2 et 3 -niveaux (plan de Taguchi). Le matériau de coupe utilisé dans ce plan est la céramique non revêtue (CC650) à différents rayons du bec de l'outil ($r = 0.8, 1.2$ et 1.6) mm.

Tableau 3 : Résultats des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) en fonction des paramètres du régime de coupe (V_c , f , et a_p) et la géométrie de l'outil (χ_r , r) [11]

N° essai	χ_r	V_c	f	a_p	r	F_a	F_r	F_t
1	75	100	0,08	0,1	0,8	4.32	28	14,66
2	75	100	0,12	0,2	1,2	11.52	52,38	46,75
3	75	100	0,16	0,3	1,6	10.37	74,71	65,03
4	75	150	0,08	0,1	1,2	7.04	36	15,68
5	75	150	0,12	0,2	1,6	30.85	96,76	93,85
6	75	150	0,16	0,3	0,8	10.77	74,71	65,03
7	75	200	0,08	0,2	0,8	14.55	63,68	44,7
8	75	200	0,12	0,3	1,2	13.96	88,81	61,51
9	75	200	0,16	0,1	1,6	14.75	47,41	29,41
10	45	100	0,08	0,3	1,6	70.74	257,4	250,39
11	45	100	0,12	0,1	0,8	14.07	62,74	48,74
12	45	100	0,16	0,2	1,2	35.76	62,87	32,96
13	45	150	0,08	0,2	1,6	39.38	143,76	131,06
14	45	150	0,12	0,3	0,8	56.31	104,49	158,28
15	45	150	0,16	0,1	1,2	24.21	97,26	77,32
16	45	200	0,08	0,3	1,2	31.25	150,39	120,82
17	45	200	0,12	0,1	1,6	39.71	106,35	98,64
18	45	200	0,16	0,2	0,8	48.57	124,81	117,91

On constate que les efforts de coupe augmentent en fonction de la profondeur de coupe et diminués avec l'augmentation de la vitesse de coupe pour différents angles de directions principales. Avec l'augmentation de la profondeur de coupe on assiste à un accroissement important. La nette augmentation est logique (l'épaisseur du copeau devienne importantes). Donc, avec la diminution de l'angle de direction principal les composantes de l'effort de coupe se trouvent alors augmentées et cela pour tous les régimes de coupe du plan [12].

3.2. Analyse de la variance pour les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t): Modèle linéaire complet

L'analyse des variances pour les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) ainsi que les coefficients de régression estimés sont présentés sur le tableau 4. L'analyse a été effectuée en utilisant des données non codées. Dans ce tableau sont mentionnés les valeurs des degrés de liberté (DL), la somme des carrés des écarts (Seq SS), les carrés moyens (CM ajust), la propriété statistique (F) la probabilité (Prob) et la contribution en pourcentage (PC%) de chaque facteur et des différentes interactions indiquant le degré d'influence sur les résultats. Plus le pourcentage de contribution (PC %) est grand plus le facteur à un effet sur les paramètres étudiées. Le pourcentage de contribution se calcule de la façon :

$$PC\% = \frac{SeqSS}{Total} \times 100 \quad (1)$$

Tableau 4 : Régression de la surface de réponse pour les efforts de coupe: (a) F_a , (b)

F_r et (c) F_t des paramètres du régime de coupe (V_c , f , et a_p) et la géométrie de l'outil

Coefficients de régression estimés pour F_a		Analyse de la variance pour F_a						
Termes	Coeff	Source	DL	Seq SS	CM ajust	F	P	PC%
Constante	-25.5146	χ_r	1	3250.06	405.23	3.82	0.19	54.15
χ_r	0.334432	V_c	1	21.36	0.16	0.00	0.97	0.35
V_c	-0.328091	f	1	43.51	148.97	1.41	0.35	0.72
f	516.526	a_p	1	669.54	364.80	3.44	0.20	11.15
a_p	666.059	r	1	272.75	19.50	0.18	0.71	4.54
r	-27.5021	$X_r \times V_c$	1	27.27	8.29	0.08	0.80	0.45
$\chi_r \times V_c$	0.001300	$\chi_r \times f$	1	154.48	198.68	1.87	0.30	2.57
$\chi_r \times f$	-16.6119	$\chi_r \times a_p$	1	414,77	0.11	0.00	0.97	6.91
$\chi_r \times a_p$	-0.118776	$\chi_r \times r$	1	5.25	67.80	0.64	0.50	0.08
$\chi_r \times r$	0.583135	$V_c \times f$	1	521.98	91.10	0.86	0.45	8.69
$V_c \times f$	4.07480	$V_c \times a_p$	1	338.58	77.69	0.73	0.48	5.64
$V_c \times a_p$	0.209051	$V_c \times r$	1	23.87	6.75	0.06	0.82	0.39
$V_c \times r$	0.209051	$f \times a_p$	1	16.49	8.99	0.08	0.79	0.27
$f \times a_p$	-531.990	$f \times r$	1	31.52	6.06	0.06	0.83	0.52
$f \times r$	-170.548	$a_p \times r$	1	2.54	2.54	0.02	0.89	0.04
$a_p \times r$	-170.548	Erreur résiduelle	2	212.01	106			3.53
		Total	17	6000.98				100

(a)

Coefficients de régression estimés pour F_r		Analyse de la variance pour F_r						
Termes	Coefficients	Source	D	Seq SS	CM ajust	F	P	PC%
Constante	-600.729	χ_r	1	14320.5	1.8	1.8	0.96	30.96
χ_r	5.66220	V_c	1	152.1	1283.1	1.72	0.32	0.32
V_c	0.782643	f	1	2102.0	709.0	0.95	0.43	4.54
f	7766.24	ap	1	11578.5	4731.27	6.33	0.12	25.03
ap	2004.75	r	1	4382.3	418.6	0.56	0.53	9.47
r	-424,388	$\chi_r \times V_c$	1	183.3	347.4	0.46	0.56	0.39
$\chi_r \times V_c$	-0.008420	$\chi_r \times f$	1	2.6	1094.8	1.46	0.35	0.00
$\chi_r \times f$	-38,9948	$\chi_r \times ap$	1	175.1	0.1	0.00	0.99	0.37
$\chi_r \times ap$	-0,103197	$\chi_r \times r$	1	422.9	17.31	0.02	0.89	0.91
$\chi_r \times r$	0,294623	$V_c \times f$	1	5572.5	24.6	0.03	0.87	12.05
$V_c \times f$	-2,11641	$V_c \times ap$	1	776.0	2426.9	3.25	0.21	1.67
$V_c \times ap$	-13,8428	$V_c \times r$	1	1048.4	1125.6	1.51	0.34	2.26
$V_c \times r$	2,69772	$f \times ap$	1	1868.2	3322.1	4.44	0.17	4.03
$f \times ap$	-10223,6	$f \times r$	1	35.7	1730.4	2.31	0.26	0.07
$f \times r$	-2880,93	$ap \times r$	1	2129.6	2129.6	2.85	0.23	4.60
$ap \times r$	1563,55	Erreur résiduelle	2	1495.1	1495.1	747.5		3.33
		Total	17	46244.8		5		100

(b)

Coefficients de régression estimés pour F_t		Analyse de la variance pour F_t						
Termes	Coeff	Source	DL	Seq SS	CM ajust	F	P	PC%
Constante	612.406	χ_r	1	21821.0	3868.78	4.98	0.15	35.17
χ_r	-8.28506	V_c	1	17.4	640.9	4.98	0.45	0.02
V_c	-0.774284	f	1	3979.4	4953.2	6.38	0.12	6.40
f	-6118,54	ap	1	15885.7	1177.9	1.52	0.34	25.60
ap	763,169	r	1	5054.4	354.3	0.46	0.56	8.14
r	303,131	$\chi_r \times V_c$	1	1.3	21.4	0.03	0.88	0.00
$\chi_r \times V_c$	-0,002092	$\chi_r \times f$	1	326.9	156.6	0.20	0.69	0.52
$\chi_r \times f$	14,7460	$\chi_r \times ap$	1	462.8	1555.8	2.00	0.29	0.74
$\chi_r \times ap$	13,8306	$\chi_r \times r$	1	124.5	367.34	0.47	0.56	0.20
$\chi_r \times r$	1,35734	$V_c \times f$	1	8531.4	3202.8	4.13	0.17	13.75
$V_c \times f$	24,1606	$V_c \times ap$	1	2897.2	3.5	0.00	0.95	4.67
$V_c \times ap$	-0,522558	$V_c \times r$	1	233.9	540.3	0.70	0.49	0.37
$V_c \times r$	-1,86898	$f \times ap$	1	341.1	114.0	0.15	0.73	0.54
$f \times ap$	-1894,12	$f \times r$	1	258.7	130.8	0.17	0.72	0.41
$f \times r$	792,049	$ap \times r$	1	607.5	607.5	0.78	0.47	0.97
$ap \times r$	-835,112	Erreur résiduelle	2	1552.7	766.36			2.50
		Total	17	62035.8				100

(c)

Les tableaux 4 (*a*, *b*, et *c*) présentent l'analyse des variances (ANOVA) des trois composantes de l'effort de coupe. Ces tableaux prouvent que les effets principaux de l'angle de direction principale (χ_r), la vitesse de coupe (V_c) l'avance par tour (f), la profondeur de coupe (ap), le rayon du bec (r) sur les composantes de l'effort de coupe radial (Fr) et tangentiel (Ft) sont significatives car le pourcentage de contribution est supérieur à l'erreur associée, alors que la vitesse de coupe (V_c) n'a pas d'effet significatif sur l'effort de coupe axial.

En effet, le tableau 4*a* montre que les interactions ($\chi_r \times ap$, $V_c \times f$ et $V_c \times ap$) sont significatives sur l'effort de coupe axial, Le tableau 4*b* montre que les interactions ($V_c \times f$, $f \times ap$ et $ap \times r$) sont significatives sur l'effort de coupe radial. En outre, les résultats du tableau 4*c*, montrent que les interactions ($V_c \times f$, et $V_c \times ap$) ont des effets significatifs sur l'effort tangentiel.

L'angle de direction (χ_r) à une influence principale sur les composantes de l'effort de coupe Fa , Fr et Ft avec des contributions : 54.15%, 30.96% et 35.17% respectivement, suivi par la profondeur de coupe de (11.15%, 25.03% et 25.60%), de l'interaction entre la vitesse de coupe et l'avance ($V_c \times f$) de (8.69%, 12.05% et 13.75%) et le rayon du bec avec des contributions de (4.54%, 9.47% et 8.14%), respectivement. Les résultats similaires ont également été observés par [13].

Dans le tournage dur, l'effort radial Fr est habituellement la composante la plus grande, puis l'effort de coupe tangentiel Ft et enfin l'effort axial Fa . Ceci peut être justifié par l'augmentation de la résistance à la pénétration du matériau à usiner sous l'effet de l'augmentation de sa dureté après trempe.

3.3. Analyses de régression des efforts de coupe (Fa , Fr et Ft) en fonction du régime de coupe (V_c , f et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r)

L'analyse de régression des efforts de coupe (effort axial Fa , effort radial Fr et effort tangentiel Ft) en fonction du régime de coupe (V_c , f , et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r) donnent les équations des modèles complets 3, 4 et 5. Les coefficients des modèles mathématiques de l'effort axial Fa , effort radial Fr et effort tangentiel Ft sont mentionnés dans le tableau 4 (*a*, *b* et *c*). Le coefficient R^2 peut s'interpréter comme le quotient des variances expliquées par la variance des réponses mesurées, d'où R^2 varie entre 0 et 1. Une valeur de R^2 proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif. Le coefficient de détermination de la régression R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation 2

$$R^2 = 1 - \frac{SSE_{\text{erreur}}}{SS_{\text{total}}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Fa = & -25,5146 + 3.34 \times 10^{-1} \chi_r - 3.28 \times 10^{-1} V_c + 516.52 f - 27.50 r + 666.05 ap + \\ & 1.30 \times 10^{-3} \chi_r V_c - 16.61 \chi_r f + 5.83 \times 10^{-1} \chi_r r - 1.18 \times 10^{-1} \chi_r ap + 4.07 V_c f + 2.09 V_c r - \\ & 2.47 V_c ap - 170.54 fr - 531.99 fap - 54.05 rap \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Fr = & -600.729 + 5.66 \chi_r + 7.82 \times 10^{-1} V_c + 7766.24 f + 2004.75 ap - 424.38 r - \\ & 8.42 \times 10^{-3} \chi_r V_c - 38.99 \chi_r f - 1.03 \times 10^{-1} \chi_r ap + 2.94 \chi_r r - 2.11 V_c f - 13.84 V_c ap + \\ & 2.69 V_c r - 10223.6 fap - 2880.93 fr + 1563.55 apr \end{aligned} \quad (4)$$

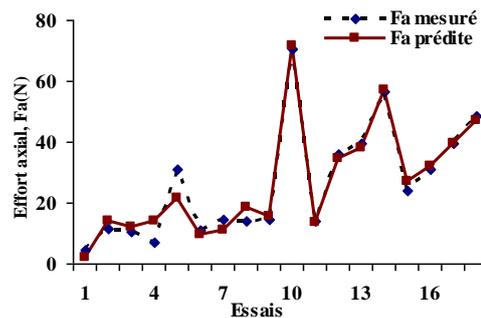
$$\begin{aligned}
 Ft = & 612.406 - 8.28\chi_r - 7.74 \times 10^{-1}Vc - 6118.54f + 763.16ap + 303.13r - \\
 & 2.09 \times 10^{-3}\chi_r Vc + 14.74\chi_r f + 13.83\chi_r ap + 1.35\chi_r r + 24.16Vcf - 5.22 \times 10^{-1}Vcap - \\
 & 1.86Vcr - 1894.12fap + 792.04fr - 835.11apr
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, les modèles réduits des efforts de coupe (l'effort axial Fa , l'effort radial Fr et l'effort tangentiel Ft) en fonction du régime de coupe (Vc , f , et ap) et la géométrie de l'outil (χ_r , r) donnent les équations des modèles réduits 6, 7 et 8 respectivement.

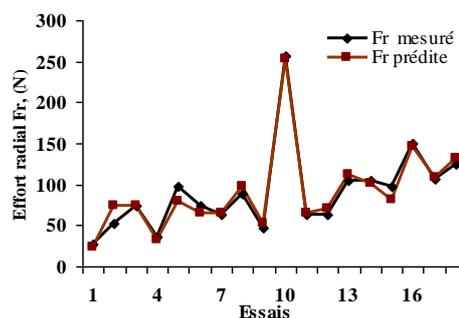
$$\begin{aligned}
 Fr = & -600.729 + 5.66\chi_r + 7.82 \times 10^{-1}Vc + 7766.24f + 2004.75ap - 424.38r - \\
 & 2.11Vcf - 10223.6fap + 1563.55apr
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$Ft = 612.406 - 8.28\chi_r - 6118.54f + 763.16ap + 303.13r + 24.16Vcf - 5.22 \times 10^{-1}Vcap
 \tag{8}$$

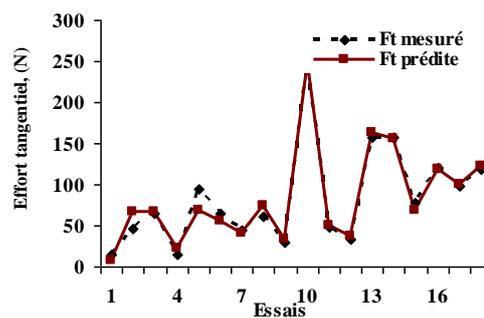
Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des composantes de l'effort de coupe : Fa , Fr et Ft sont $R^2 = 96.47\%$, $R^2 = 96.77\%$ et $R^2 = 97.50\%$ respectivement. R^2 (ajust) = 69.97% , R^2 (ajust) = 72.52 et R^2 (ajust) = 78.73% respectivement. Les valeurs du coefficient de détermination sont élevés, ce qui prouve que les modèles relativement significatifs et en bonne adéquation avec les résultats expérimentales.



(



(



c

Figure 2: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour

Pour valider ces modèles, il est nécessaire d'étudier la comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurés) et prédites des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) figure 2 (a, b et c). Les figure 2 (a, b et c), montrent que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches. Donc on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donnent des résultats précis.

6. Conclusion et perspective

L'étude réalisée des efforts de coupe permise de mieux comprendre les phénomènes en tournage dur et cela dans le but d'avoir une meilleure stabilité du système usinant et de mettre en évidence des modèles avec interactions.

1) Les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) sont très affectés par l'angle de direction principal avec une contribution de (54.15%, 30.96% et 35.17%) respectivement, suivi par la profondeur de coupe avec une contribution de (11.15%, 25.60% et 25.03%) respectivement. Alors, la vitesse de coupe n'a pas d'influence significative.

2) L'analyse des résultats de l'effort de coupe radial, montre que l'outil avec un rayon de bec de 1.6 mm donne un effort de coupe plus grand, suivi par le rayon de bec de 1.2 mm et en dernier lieu par le rayon du bec de 0.8 mm.

3) L'effort radial est prépondérant en tournage dur suivi par l'effort tangentiel et en dernier lieu l'effort axial « la coupe se fait en dehors de la limite du rayon du bec de l'outil ».

4) Les coefficients de détermination (R^2) des différents modèles sont élevés, ce qui prouve que ces modèles sont en bonne concordance avec les valeurs trouvées expérimentalement.

La généralisation des modèles obtenus en introduisant l'effet d'autres facteurs tels que la dureté du matériau et la vibration de la machine est un travail de recherche qui pourra nous aider à mieux optimiser le procédé du tournage dur.

Références

1. Poulachon, A. Moison, Hard turning Cutting Mechanisms and Metallurgical Aspects. Tans.ASME J of Eng. For Ind. Mai 2000.

2. G. Poulachon, Aspets phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage C-B N des aciers durcis. Thèse de doctorat de l'ENSAM DE Cluny. Déc 1999.
3. W König , R Komanduri, Tonshoff (H.K.) et Askershoh (G.). Machining of Hard Materials, Annals of the CIRP, vol 33/02/1984, P. 417-427.
4. Tournage dur et usinage à grande vitesse (UGV), centre technique des industries mécaniques (CETIM), 2000. Rapport, PP.86.
5. S.Y.Luo, Y.S. Lias Y.Y. Tsai, Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools. Journal of Materials Processing Technology 88 (1999) 114-121.
6. M.A. Yallese, L. Boulanouar, N.Ouelaa, A. Rezagia, N. Kribes. Influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage 100Cr6 (60 HRC) avec le CBN. Premier Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques du 23 au 25 mars 2005 Hammamet, Tunis.
7. J.L. Hug, Tournage des métaux durs, machine de production, 1995, pp. 17-19.
8. Y. Kevin, C. Chou, J. Evans and M.M Barash. Experimental investigation on cubic boron nitride turning of hardened AISI 52100 steel. Journal of Materials Processing Technology, V134, Issue 1, 1 March 2003, pp 1-9.
9. SANDVIK Coromant, Catalogue Général, Outil de coupe Sandvik Coromant, Tournage, Fraisage, Perçage, Attachements, 2009
10. P. Ross. (1988) Taguchi techniques for quality engineering –loss function. Orthogonal experiments. Parameter and tolerance design, McGraw-Hill. New york, PP. 10-50.
11. Z. Hessainia, Thèse de doctorat, Etude de l'impact des paramètres affectant la rugosité des surfaces et les efforts de coupe en usinage des pièces traitées thermiquement, Université de 08 Mai 1945 Guelma (2014).
12. A.M.A. Al-Ahmari, Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 1-3, pp. 305-311 (2007).
13. Z. Hessainia, M. A. Yallese, Bouzid Lakhdar, Mabrouki Tarek, On the application of response surface methodology for predicting and optimizing surface roughness and cutting forces in hard turning by PVD coated insert, "International Journal of Industrial Engineering Computations"6(2015) 267-284.