

OPTIMISATION MULTI-OBJECTIVE DES PARAMETRES DE COUPE LORS DE L'USINAGE D'UN ACIER POUR TRAVAIL A FROID AVEC UN CARBURE REVETU CVD ($Al_2O_3/TiC/TiCN$)

Khaoula SAFI¹, Mohammed A YALLESE¹, Salim BELHADI¹, Smail BOUTABBA² & Tarek MABROUKI³

Le but des industriels aujourd'hui est d'abaisser au maximum les coûts des opérations d'usinage et d'obtenir un bon état de surface. Cela est possible d'une part grâce à la minimisation des efforts de coupe d'où une réduction de la puissance consommée durant l'usinage, et d'autre part par la réduction des défauts micro-géométriques de la surface usinée. Dans ce travail, une étude expérimentale a été réalisée afin d'évaluer l'effet des paramètres de coupe (rayon du bec de l'outil (r), vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f) et profondeur de passe (ap)) sur les un ensemble de critère de qualification, à savoir ; la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe (F_z) et la puissance de coupe consommée (P_c). L'usinage a été réalisé sur des éprouvettes en acier à outil pour travail à froid AISI D3 en utilisant un outil de coupe en carbure à triple revêtement CVD(GC4215) ($Al_2O_3/TiC/TiCN$). L'étude a été réalisée en appliquant la méthodologie de surface de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) sur un plan d'expérience de Taguchi L16 ($4^3 2^1$). L'objectif est d'analyser les effets des paramètres de coupe sur les indicateurs de sortie et proposer des modèles mathématiques traduisant les évolutions de R_a , F_z et de P_c . Ces modèles serviront pour optimiser le procédé étudié en exploitant la fonction de désirabilité (DF), suivant trois objectifs souhaités. Ces derniers correspondent en première étape à la minimisation de la rugosité, en seconde étape à la minimisation de l'effort de coupe et de la puissance consommée et enfin à un compromis de minimisation de l'ensemble R_a , F_z et P_c .

Mots clés : AISI D3, Rugosité de surface, Puissance de coupe, RSM, Modélisation, Optimisation.

Nomenclature

CVD	Dépôt chimique en phase vapeur	f	Avance par tour (mm/tr)
ANOVA	Analyse de la variance	ap	Profondeur de passe (mm)
RSM	Méthodologie de surface de réponse	DL	Degrés de liberté

¹ Laboratoire Mécanique et Structure (LMS), département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945, P.O. Box 401, 24000 Guelma, Algérie. Email : safikhaoula@hotmail.com

² Laboratoire de mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM), département de Génie mécanique, Université 8 Mai 1945, BP 401 Guelma 24000, Algérie

³ Laboratoire de Mécanique Appliquée et d'ingénierie (LR-11-ES19), Université de Tunis El Manar, ENIT, BP 37. Le Belvédère, 1002 Tunisie.

DF	Fonction de désirabilité	SC	Somme des carrés
Ra	Rugosité de surface (μm)	CM	Carrés moyens
Fz	Effort de coupe tangentiel (N)	Cont%	Pourcentage de contribution
Pc	Puissance consommée (W)	F	Coefficient de Fisher
r	Rayon du bec de l'outil (mm)	P	Valeur de la probabilité
Vc	Vitesse de coupe (m/min)	R ²	Coefficient de détermination

1. Introduction

L'usinage occupe une place importante dans les entreprises de fabrication mécanique. L'amélioration de la productivité et de la qualité des pièces usinées de certains matériaux est d'un intérêt inévitable dans les procédés d'usinage et tout particulièrement lors du tournage [1-2]. Parmi ces matériaux, les aciers à outils pour travail à froid (AISI D2, D3 et D6), ils sont largement utilisés dans les différents domaines grâce de leur résistance à l'usure. Ils jouent un rôle très important dans la fabrication des matrices, des poinçons de découpage et d'emboutissage, des filières d'étirage, des galets profileurs, des molettes, des outils à bois et peignes à rouler des filets [3]. La haute qualité des pièces mécaniques peut être obtenue par le contrôle de plusieurs paramètres tels que les conditions de coupe et le bon choix des outils de coupe et des revêtements, conduisant à une amélioration de la production [4]. L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Elle permet le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus. Ceci a généralement un impact économique direct sur les paramètres de la production tels que : le temps technologique d'usinage, le coût global d'opération et la qualité de surface. Pour cela, la modélisation et l'optimisation des paramètres de coupe sont donc nécessaires [5]. Plusieurs recherches ont été réalisées sur l'usinage de l'acier AISI D3 en termes d'usure des outils, de la qualité de surface, des efforts de coupe, de la puissance consommée, de la modélisation et l'optimisation des conditions de coupe. Yallese et al. [6] ont mené une étude comparative qui a permis d'étudier les variations de performances entre les outils CC650 et CBN7020 lors de l'usinage de l'acier X200Cr12 en termes de rugosité. Les résultats trouvés montrent que les basses valeurs de la rugosité de surface ont été obtenues avec les plaquettes de CBN7020. Aouici et al. [7] ont réalisé une étude expérimentale dont le but est de déterminer l'effet des facteurs d'entrée, Vc, f et ap sur les paramètres de sorti, Ra, Fz, Pc et Ks lors du tournage dur du couple d'usinage (céramique mixte/Aacier AISI D3). Les résultats trouvés montrent que Fz est affecté principalement par f suivie par ap et en dernier lieu par Vc. La rugosité de surface est fortement influencée par (f). Bouchlaghem et al [8] ont mené une étude expérimentale pour déterminer l'influence des variables de coupe Vc, f et ap le temps d'usinage sur la rugosité et l'effort de coupe, lors du tournage dur de l'acier

AISI D3 avec des plaquettes en CBN. Ces auteurs ont montré que Ra est très sensible à la variation de f et que Fz est très sensible à la variation de ap . Nouioua et al. [9] ont présenté une modalisation de la rugosité de surface de (Ra), l'effort de coupe (Fz) et la puissance consommée (Pc) et une optimisation des conditions de coupe lors du tournage de l'acier (AISI D3) par un outil en carbure revêtu sous différents environnement de lubrification. Rupinder Singh et al. [10] ont examiné l'évolution de l'usure de l'outil et la rugosité de surface (Ra) pendant le tournage de l'acier AISI D3 avec un outil de coupe en carbure revêtu. Les auteurs ont adopté un plan d'expérience de Taguchi ($L9$). L'analyse de la variance (ANOVA) a montré que f est le facteur dominant affectant la rugosité de surface. Gaitonde V. N. et al. [11] ont utilisé la méthodologie de la surface de réponse (RSM) afin de développer un modèle empirique pour la prédiction de l'effort de coupe, la puissance de coupe, l'effort spécifique de coupe, la rugosité de surface et l'usure de l'outil. L'étude a été réalisée sur un acier à outil pour travail à froid AISI D2 en utilisant des plaquettes de coupe en céramique classique et Wiper. Les auteurs ont trouvé lors de l'analyse des résultats obtenus que la rugosité diminue à des faibles valeurs pour l'avance f et que les plaquettes Wiper ont donné des rugosités faibles.

L'objectif principal de la présente étude est d'analyser l'impact des conditions de coupe r , Vc , f et ap sur les évolutions de Ra, Fz et Pc lors du tournage de l'acier à outil pour travail à froid AISI D3 par un outil en carbure métallique à triple revêtement CVD ($Al_2O_3/TiC/TiCN$) suivant un plan L_{16} ($4^3 \cdot 2^1$) en utilisant la méthode (RSM). Des modèles de régressions seront proposées afin de modéliser le processus et prédire les sorties. Les résultats de la modélisation seront exploités pour optimiser les conditions de coupe suivant plusieurs objectifs désirés en utilisant l'approche de la fonction de désirabilité (FD).

2. Procédure expérimentale

Les essais d'usinage ont été réalisés sur un tour de marque SN40C avec une puissance $Pc=6,6$ kW. Les opérations de chariotage ont été effectuées sur des éprouvettes en acier à outil pour travail à froid AISI D3, de 350 mm de longueur et de 70 mm de diamètre. La composition chimique des éprouvettes est la suivante : 2.00% C ; 0.31 % Si ; 0.259% Ni ; 0.124 % Mo ; 0.29% Mn ; 0.009 % S ; 0.011% P ; 0.162 % Cu ; 12.00 % Cr. Les plaquettes de coupe utilisées pour l'usinage sont en carbure métallique de marque Sandvik (GC4215) à triple revêtement ($Al_2O_3+TiC+TiCN$), par dépôt chimique en phase vapeur (CVD), montées sur un porte-outil de désignation (PSBNR2525K12) (fig. 1).

Un rugosimètre (2D) Surftest 210 de marque Mitutoyo a été utilisé pour la mesure de la rugosité de surface (Ra). Chaque mesure est une moyenne de trois essais réalisés à une orientation radiale (de la pièce) de 120° . Afin de bien caractériser la

topographie de la surface usinée, plusieurs mesures de la rugosité effectuées sur la plate-forme (3D) de métrologie optique modulaire Altisurf 500 ont été réalisées. Pour la mesure de l'effort de coupe tangentiel (F_z) généré lors de l'usinage, un dynamomètre (KISTLER 9257 B) a été utilisé (fig. 1). Il est à noter que la puissance consommée lors de l'usinage est calculé grâce à l'équation 1, qui lie l'effort tangentiel mesuré et la vitesse de coupe avec (P_c).

$$P_c = \frac{F_z \cdot V_c}{60}, [W] \quad (1)$$

Un plan d'expérience de Taguchi L_{16} ($4^3 2^1$) a été adopté dans ce travail dans le but de réduire le nombre d'essais et par conséquent minimiser le coût et le temps des expériences. Les paramètres d'entrée retenus sont V_c , f , ap et r . Si nous avions adopté un plan factoriel complet, le nombre d'essais 128 essais au lieu de 16 essais adoptés dans notre cas. Les niveaux des quatre facteurs sont illustrés dans le tableau 1.



Fig. 1. Moyens expérimentaux pour l'analyse des résultats

Table 1

Niveaux des différents paramètres

3. Résultats et discussion

Le tableau 2 expose les résultats des paramètres de sortie en fonction de la variation des facteurs d'entrée, suivant le plan de Taguchi L16. On constate que la rugosité (Ra) varie de 0.27 μm à 3.14 μm , l'effort de coupe (Fz) varie de 18.3 N à 178.9 N et que la puissance consommée (Pc) varie approximativement de 55.1 W à 800.9 W.

Table 2

Résultats expérimentaux des paramètres de performance

N° d'essais	Facteurs d'entrée				Réponses		
	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	Pc (W)
1	0.4	180	0.08	0.1	0.61	18.3	55.1
2	0.4	255	0.12	0.1	1.13	33.3	141.6
3	0.4	330	0.16	0.3	2.05	112.2	616.9
4	0.4	400	0.20	0.3	3.14	120.1	800.9
5	0.8	180	0.12	0.3	0.87	120.1	360.2
6	0.8	255	0.08	0.3	0.37	79.7	338.8
7	0.8	330	0.20	0.1	1.83	70.6	388.3
8	0.8	400	0.16	0.1	1.19	48.9	326.2
9	1.2	180	0.16	0.1	0.76	39.1	117.4
10	1.2	255	0.20	0.1	1.12	87.9	373.6
11	1.2	330	0.08	0.3	0.37	92.9	510.8
12	1.2	400	0.12	0.3	0.61	103.9	692.7
13	1.6	180	0.20	0.3	0.90	178.9	536.9
14	1.6	255	0.16	0.3	0.46	140.1	595.5
15	1.6	330	0.12	0.1	0.27	31.5	173.2
16	1.6	400	0.08	0.1	0.39	34.9	232.6

3. 1 Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra, Fz et Pc

Afin de faire l'étude statistique et déterminer la contribution des facteurs principaux et les interactions, la méthodologie de la surface de réponse (RSM) [12] a été exploitée avec l'analyse de la variance (ANOVA). Les résultats issus de l'ANOVA pour la rugosité de surface, l'effort et la puissance de coupe, ont été obtenus pour un niveau de signification $\alpha = 0.05$ (c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95%). Dans le tableau 3 sont mentionnées les valeurs des degrés de liberté (DL), la somme des carrés (SC), les carrés moyens (CM), la contribution en pourcentage (Cont%) de chaque facteur et des différentes interactions, indiquant le degré d'influence sur les résultats. La loi de Fisher (F) et la valeur de la probabilité (p) indiquant le niveau de signification des paramètres pour chaque source de variation. La valeur de (p) inférieur à 0.05 montre que le facteur considéré a un impact significatif sur les réponses mesurées.

Les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra) (tableau 3), montrent que l'avance (f) et le rayon (r) sont les paramètres qui ont le plus grand effet sur Ra avec une contribution respective de 42.55 % et 36.83 %. Ils sont suivis par la vitesse (Vc) et la profondeur de passe (ap) avec des contributions respectives de (9.13 et 1.51)%. Les interactions (r x f) et (f x ap) sont aussi significatifs avec des contributions respectives de 5.49 % et 2.94 %, les autres interactions (r x Vc), (r x ap), (Vc x f) et (Vc x ap) ne sont pas significatifs car leurs probabilités sont supérieures à 0.05. Les résultats trouvés sont en accord avec ceux de la littérature [13].

Table 3

Analyse de la variance pour Ra

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
Modèle	10	8.69009	98.51%	0.86901	33.17	0.001
Linéaires	4	1.91896	90.02%	0.47974	18.31	0.003
r	1	1.08190	36.83%	1.08190	41.29	0.001
Vc	1	0.00036	9.13%	0.00036	0.01	0.911
f	1	0.82220	42.55%	0.82220	31.38	0.003
ap	1	0.06627	1.51%	0.06627	2.53	0.173
Interaction	6	0.74948	8.50%	0.12491	4.77	0.054
r x Vc	1	0.00019	0.00%	0.00019	0.01	0.935
r x f	1	0.22329	5.49%	0.22329	8.52	0.033
r x ap	1	0.00004	0.00%	0.00004	0.00	0.969
Vc x f	1	0.00053	0.00%	0.00053	0.02	0.893
Vc x ap	1	0.00544	0.06%	0.00544	0.21	0.668
f x ap	1	0.25906	2.94%	0.25906	9.89	0.026
Erreur	5	0.13100	1.49%	0.02620		
Total	15	8.82109	100.00%			

Le tableau 4 expose les résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe (Fz). Il est clair que la profondeur de passe (ap) et l'avance par tour (f) sont les facteurs les plus influant sur (Fz) avec des contributions respectives de (67.55 et 22.15) %. Ils sont suivis par le rayon du bec (r) et la vitesse de coupe (Vc) avec des contributions respectives de 3.79 % et 1.30 %. Les interactions (r x Vc), (r x f), (r x ap), (Vc x f), (Vc x ap) et (f x ap) ne sont pas significatifs car leurs probabilités sont supérieures à 0.05. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs [14] en ce qui concerne l'influence de la section de coupeau sur l'effort (Fz).

Table 4
Analyse de la variance pour Fz

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
Modèle	10	31121.9	98.83%	3112.2	42.41	0.000
Linéaires	4	14793.3	94.79%	3698.3	50.40	0.000
r	1	16.1	3.79%	16.1	0.22	0.659
Vc	1	20.8	1.30%	20.8	0.28	0.617
f	1	3112.5	22.15%	3112.5	42.42	0.001
ap	1	14333.4	67.55%	14333.4	195.34	0.000
Interaction	6	1274.5	4.05%	212.4	2.89	0.132
r x Vc	1	335.6	0.99%	335.6	4.57	0.085
r x f	1	8.9	0.60%	8.9	0.12	0.742
r x ap	1	82.4	0.26%	82.4	1.12	0.338
Vc x f	1	171.0	0.65%	171.0	2.33	0.187
Vc x ap	1	429.2	1.36%	429.2	5.85	0.060
f x ap	1	58.3	0.19%	58.3	0.79	0.414
Erreur	5	366.9	1.17%	73.4		
Total	15	31488.8	100.00%			

Le tableau 5 présente l'ANOVA pour la puissance (Pc). De toute évidence, il apparaît que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influant sur la puissance de coupe (Pc) avec une contribution de 60.88%, suivie par la vitesse de coupe (Vc) et l'avance par tour (f) avec des contributions de 17.67 % et 17.55 %.

Table 5
Analyse de la variance pour Pc

Source	DL	SC	Cont. %	CM	Valeur de F	Valeur de p
Modèle	10	712053	99.14%	71205	57.42	0.000
Linéaires	4	349112	96.11%	87278	70.38	0.000
r	1	419	0.00%	419	0.34	0.586
Vc	1	40926	17.67%	40926	33.00	0.002
f	1	61302	17.55%	61302	49.43	0.001
ap	1	297428	60.88%	297428	239.83	0.000
Interaction	6	21760	3.03%	3627	2.92	0.130
r x Vc	1	8033	1.11%	8033	6.48	0.052
r x f	1	20	0.26%	20	0.02	0.904
r x ap	1	2240	0.31%	2240	1.81	0.237
Vc x f	1	55	0.00%	55	0.04	0.842
Vc x ap	1	9537	1.33%	9537	7.69	0.039
f x ap	1	114	0.02%	114	0.09	0.774
Erreur	5	6201	0.86%	1240		
Total	15	718254	100.00%			

Dans notre travail l'ANOVA montre que le rayon du bec (r) n'a pas un effet significatif sur P_c . Les interactions ($r \times f$), ($r \times ap$), ($V_c \times f$) et ($f \times ap$) ne sont pas significatifs car leurs probabilités sont supérieures à 0.05. Par contre les deux interactions ($r \times V_c$) et ($V_c \times ap$) sont significatives avec des contributions respectives de 1.11 % et 1.33 %.

La figure 2 illustre le graphique des effets principaux des facteurs sur les paramètres R_a , F_z et P_c . On voit clairement que l'avance (f) et le rayon (r) affectent fortement la rugosité (R_a) car ils ont la plus grande pente. Par contre, la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de coupe (ap) ont un faible effet sur l'évolution des rugosités (R_a). Pour l'effort de coupe (F_z), on constate que la profondeur de coupe (ap) et l'avance (f) affectent fortement F_z . Concernant la puissance consommée (P_c), on remarque que la profondeur de coupe (ap), l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c) affectent fortement P_c , alors que le rayon du bec (r) a un effet moindre sur l'évolution de P_c .

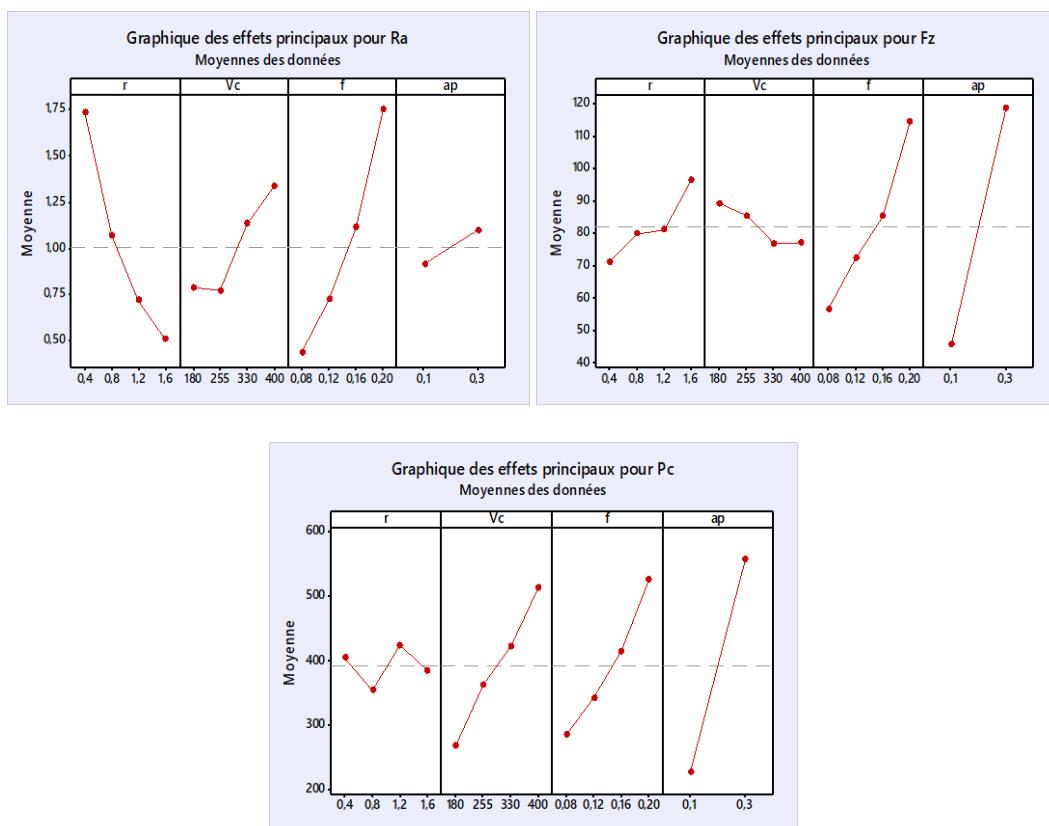


Fig. 2. Graphique des effets principaux pour R_a , F_z et P_c

L'analyse de Pareto (Fig. 3) est une technique simple pour donner la priorité à la résolution des problèmes [15-16]. Cette méthode classe dans l'ordre croissant la valeur du coefficient de Fisher (F) pour identifier le degré d'influence des différents paramètres, du plus grand au plus faible effet sur les réponses considérées. Dans cette analyse, la valeur "F" est obtenue en divisant les carrés moyens des écarts, de chaque facteur par le carré moyen des écarts de l'erreur. Pour un niveau de confiance de 95% ($\alpha=0.05$), si la "valeur F", qui correspond aux différents termes considérés dans le modèle, est supérieure à 2.26, 2.20 et 2.23 respectivement pour Ra, Fz et Pc alors les effets sont significatifs.

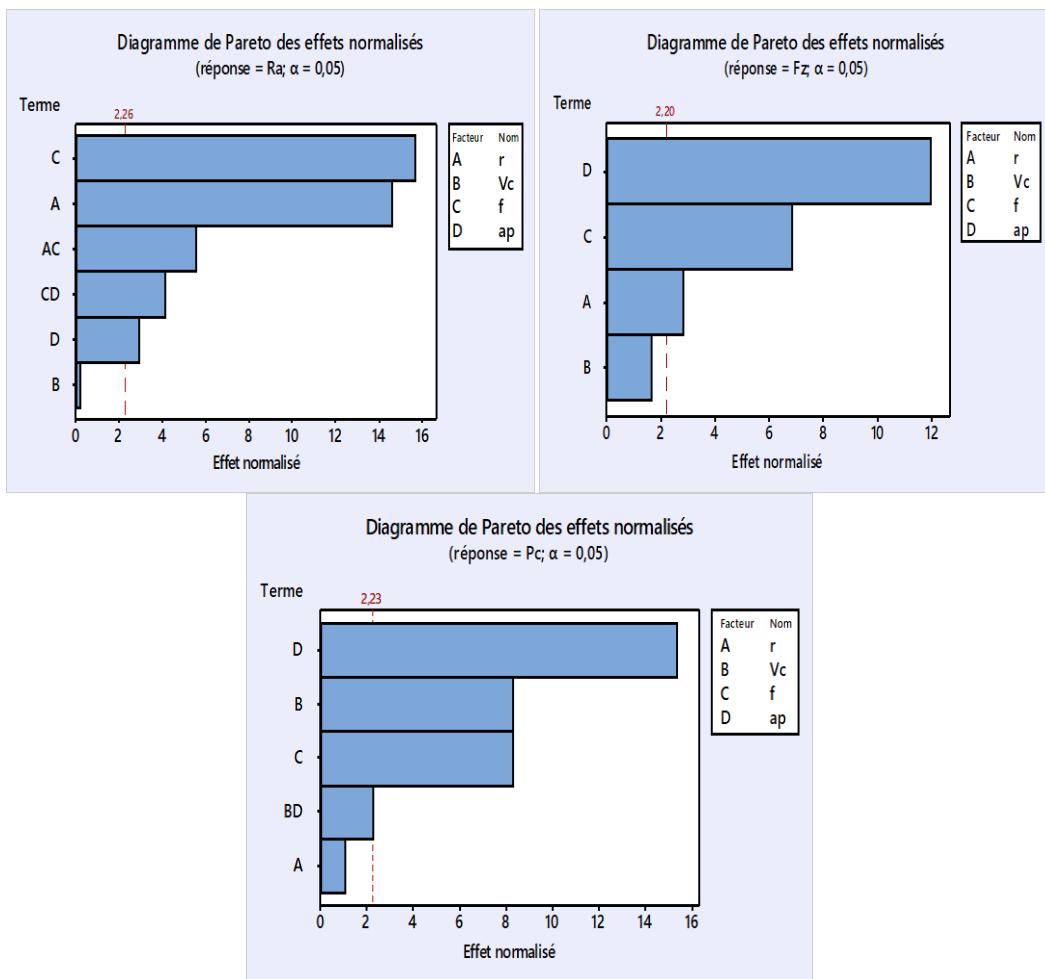


Fig. 3. Diagramme de Pareto des effets pour Ra, Fz et Pc

3.2 Modélisation des paramètres technologiques de performance

La relation entre les facteurs d'entrées et les paramètres de sorties a été modélisée par des équations de régression. Les modèles de la rugosité de surface (Ra), de l'effort de coupe (Fz) et de la puissance consommée (Pc), tenant compte seulement des effets principaux et des interactions qui sont significatives, sont donnés par les équations de régression (1), (2) et (3) avec leurs coefficients de détermination (R^2).

$$Ra = -0.898 + 1.037r - 0.000124Vc + 19.74 f - 3.07ap - 14.60rxf + 28.45f xap \quad (R^2)=98.45\% \quad (2)$$

$$Fz = -57.6 + 19.31r - 0.0615Vc + 466.8f + 364.6ap \quad (R^2)=94.79\% \quad (3)$$

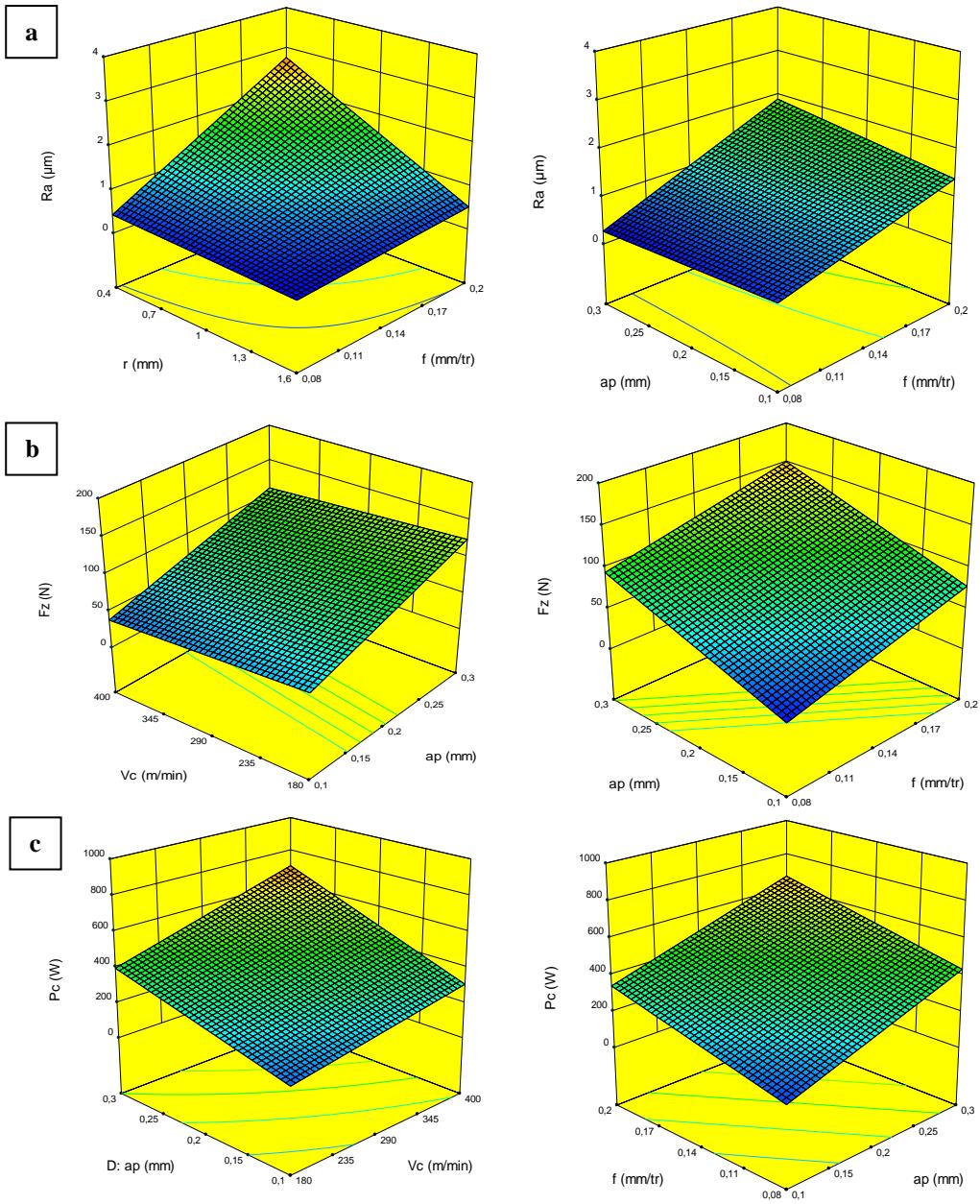
$$Pc = -371.9 + 27.1r + 0.436Vc + 1989f + 710ap + 3.24Vcxap \quad (R^2)=97.43\% \quad (4)$$

La figure (4) regroupe les graphiques de la surface de réponse 3D pour les trois paramètres de sortie (Ra), (Fz) et (Pc) en fonction des combinaisons des éléments suivants : (r ; f) et (ap ; f) pour Ra, (Vc ; ap) et (ap ; f) pour Fz et (ap ; Vc) et (f ; ap) pour Pc.

Les résultats de la rugosité (Ra) (Fig 4.a), montrent l'interaction entre f et ap. En effet on constate que pour une faible valeur de f, le rayon du bec (r) n'a presque pas d'effet sur Ra, alors que pour une avance importante, Ra diminue considérablement avec l'augmentation de r. On constate aussi que pour un rayon du bec élevé l'avance possède relativement, une faible influence sur Ra. Finalement il est clair que la meilleure rugosité de surface (Ra) est obtenue en utilisant une valeur minimale pour f et une valeur maximale pour r. Les résultats trouvés sont en bon accord avec ceux trouvés par [17-18].

les résultats obtenus pour l'effort (Fz) (Fig 4.b), montrent une pente plus grande pour ap et f, ce qui signifie que ces deux facteurs ont une influence remarquable sur Fz. La pente de Vc est très faible comparée à celles de ap et f. Par conséquent, l'effort minimal de coupe est obtenu pour une valeur minimale de ap et f et une valeur maximale de Vc.

Les résultats obtenus pour la puissance (Pc) (Fig 4.c), montrent une pente plus grande pour ap, f et Vc. Cela signifie que l'augmentation de ces trois facteurs induit une augmentation remarquable de Pc. Par conséquent la puissance consommée minimale est obtenu pour des valeurs minimales de ap, f et Vc.

Fig. 4. Surface de réponse 3D de R_a , F_z et P_c

La comparaison entre les valeurs expérimentales de R_a , F_z et P_c et celles estimées par les modèles obtenus par la méthodologie de surface de réponse (RSM) est présentée sur la figure 5. Les résultats de la comparaison prouvent que les valeurs prédites sont très proches des valeurs expérimentales. La figure 5 indique que les modèles de régression trouvés sont capables de représenter le système dans le domaine expérimental considéré.

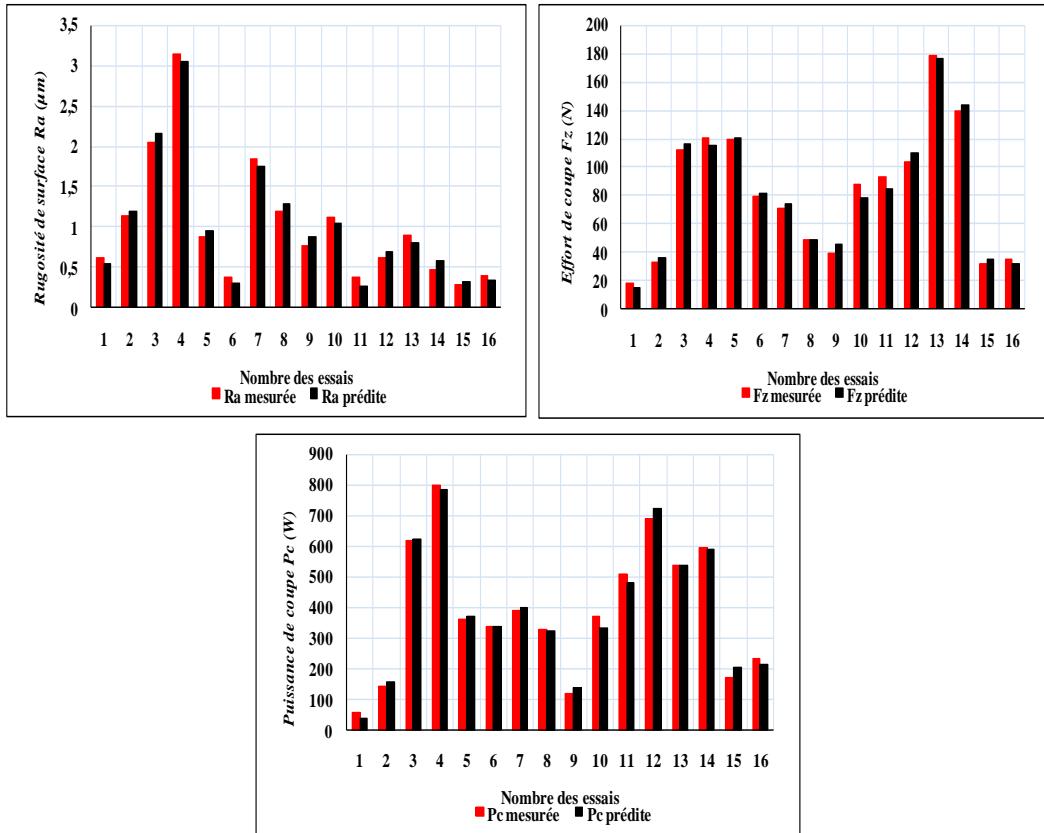


Fig. 5. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédictes de Ra, Fz et Pc

4. Optimisation multi-objectif des conditions de coupe

L'optimisation des paramètres de coupe dans le processus d'usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche [19-20]. Parmi les différentes méthodes d'optimisations, la méthode de la fonction de désirabilité (DF) est adoptée dans cette étude. En effet, elle permet d'optimiser plusieurs objectifs en même temps avec des grandeurs physiques de différentes natures. La maximisation de la fonction de désirabilité (DF), a permis d'optimiser les paramètres de coupe.

Dans ce travail, trois cas d'optimisation ont été étudiés. Le tableau 6 résume les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, les poids et l'importance accordée à chaque paramètre pour les trois cas d'optimisation.

Table 6
Objectifs et plages de paramètres pour différents cas d'optimisation

Conditions	Objectifs	Limite		Importance		
		Inférieure	supérieure	1 ^{er} cas	2 ^{ème} cas	3 ^{ème} cas
r	dans l'intervalle	0.4	1.6	-	-	-
Vc	dans l'intervalle	180	400	-	-	-
f	dans l'intervalle	0.08	0.20	-	-	-
ap	dans l'intervalle	0.1	0.3	-	-	-
Ra	minimiser	0.273	3.142	5	1	5
Fz	minimiser	18.35	178.98	1	5	5
Pc	minimiser	55.05	800.933	1	5	5

Notons que dans le tableau 6, les valeurs d'importances sont quantifiées. Elles s'étalent d'une importance minime égale à 1 jusqu'à une très haute importance égale à 5. Il est à noter aussi que pour les trois cas d'optimisation, les solutions optimales sont rapportées dans le tableau 7.

Table 7
Solutions obtenues pour les 3 cas d'optimisation

	r	Vc	f	ap	Ra	Fz	Pc	Désirabilités
1 ^{er} cas	1.600	204.325	0.080	0.100	0.366	34.500	56.899	0.962
2 ^{ème} cas	0.842	228.956	0.080	0.100	0.463	18.345	55.045	0.994
3 ^{ème} cas	0.843	228.938	0.080	0.100	0.463	18.343	55.069	0.977

Le régime optimal obtenu dépend des besoins de l'industriel :

-Pour le premier cas, l'objectif souhaité est de favoriser la minimisation de Ra en lui donnant une importance de valeur 5. Par contre, Fz et Pc ont une importance de valeur 1. Les conditions de coupe optimales trouvées sont : r = 1,6mm, Vc = 204,325 m/min, f = 0.08mm/tr et ap = 0.1mm. La rugosité prend une valeur minimale Ra = 0.366µm, Fz = 34.5N et Pc = 56.899W, et la désirabilité = 0.962. Ce cas est appliqué lorsque le fabricant souhaite une meilleure qualité de surface et pour les opérations de finition des pièces (objectif : Qualité maximale).

-Pour le deuxième cas, l'objectif souhaité est la minimisation de Fz et Pc, l'importance de 5 est donnée aux Fz et Pc, tout en maintenant la rugosité (Ra) à son niveau le plus bas 1. Les conditions de coupe optimales sont les suivantes : r = 0.842mm, Vc = 228.956m/min, f = 0.08mm/tr et ap = 0,1mm. L'effort Fz et la puissance Pc prennent des valeurs minimales, Fz = 18.345N et Pc = 55.045W et la rugosité (Ra) = 0.463µm, la désirabilité = 0.994. Ce cas est appliqué lorsque le fabricant souhaite une consommation minimale d'énergie pour minimiser le coût.

-Le troisième cas concerne une optimisation combinée entre les trois paramètres de sorti Ra, Fz et Pc. Les conditions de coupe optimales trouvées sont les suivantes : r = 0.843mm, Vc = 228.938m/min, f = 0.08mm/tr et ap = 0.1mm. La rugosité prend une valeur, Ra = 0.463µm, Fz = 18.343N et Pc = 55.069W et la désirabilité = 0.977. Ce cas est intéressant lorsqu'on cherche en industrie, un compromis entre une bonne qualité de surface et une moindre consommation d'énergie.

En résumé, les solutions trouvées montrent qu'il n'y a pas un seul cas de conditions de coupe optimales, mais qu'il s'agit de rechercher à chaque fois des conditions de coupe correspondant à des besoins spécifiques en fonction du contexte industriel considéré.

La Figures 6 montre à titre d'exemple, le diagramme de rampe de désirabilité pour le troisième cas d'étude.

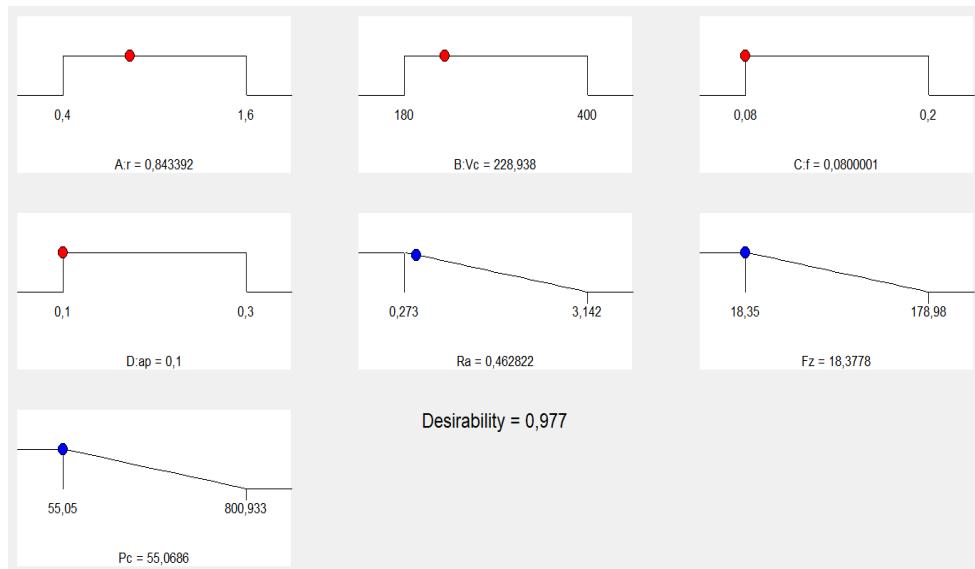
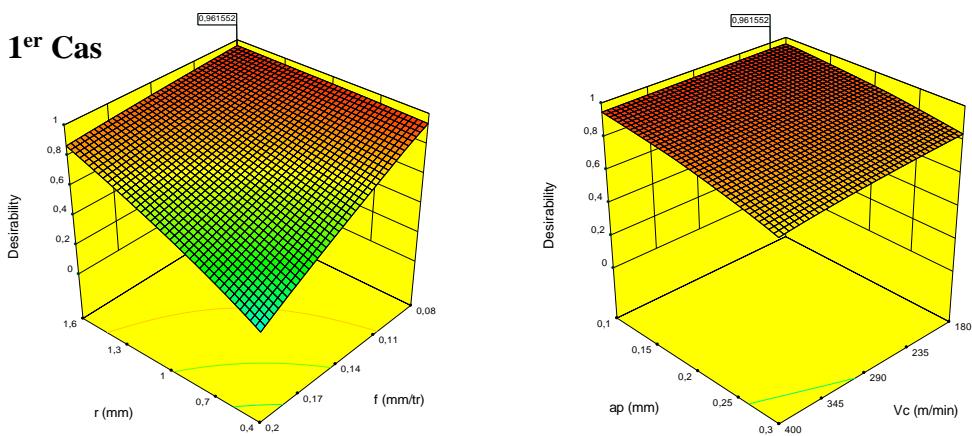


Fig. 6. Diagrammes de rampe de désirabilité pour le troisième cas d'optimisation

La Figure 7 montre la variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe pour les différents cas d'optimisation. La valeur de désirabilité la plus élevée est mentionnée pour trois cas d'optimisation : minimisation de Ra, minimisation de Fz et Pc, minimisation de Ra, Fz et Pc ensembles.



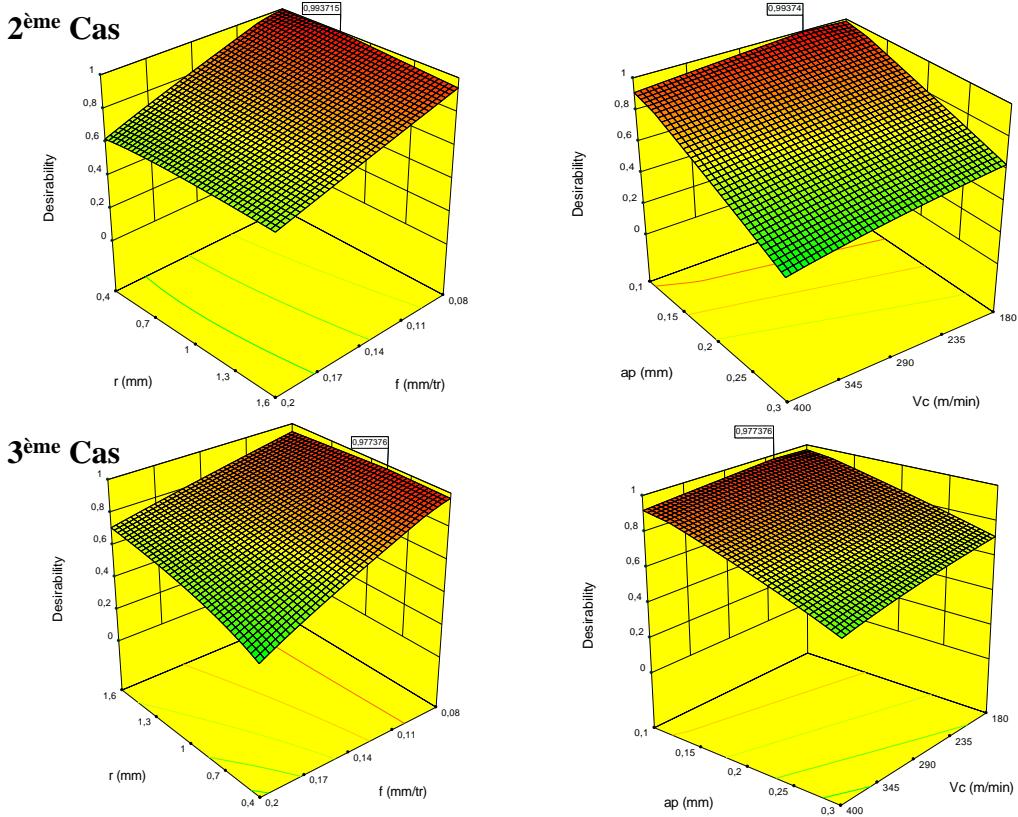


Fig. 7. Graphiques de désirabilité de trois cas d'optimisation

5. Topographie de surface 3D

La figure 8 illustre les résultats de différentes topographies de surface (3D) obtenues par quatre rayons de bec de l'outil (0.4, 0.8, 1.2 et 1.6) mm tout en conservant les valeurs à $V_c=330$ m/min, $f=0.08$ mm/tr, et $ap=0.15$ mm constantes. L'analyse des résultats des topographies de surface (3D) montre que l'augmentation du rayon (r) conduit à une diminution de R_a de 0.58 μm à 0.30 μm ce qui représente une diminution de 48%. Avec un rayon $r=0.4$ mm, on remarque que les sommets des différents profils sont élevés, alors que pour un rayon de $r=1.6$ mm, les sommets des profils ont une hauteur moins élevée. Ceci s'explique par l'augmentation de la zone de contact lorsque le rayon de bec de l'outil augmente. Cela engendre un écrasement des aspérités et un affaissement des crêtes ce qui en gendre une amélioration de l'état de surface [21-22]. Par conséquent, les valeurs des critères de rugosité R_a , R_z et R_t diminuent nettement avec l'augmentation du rayon du bec (Fig. 9).

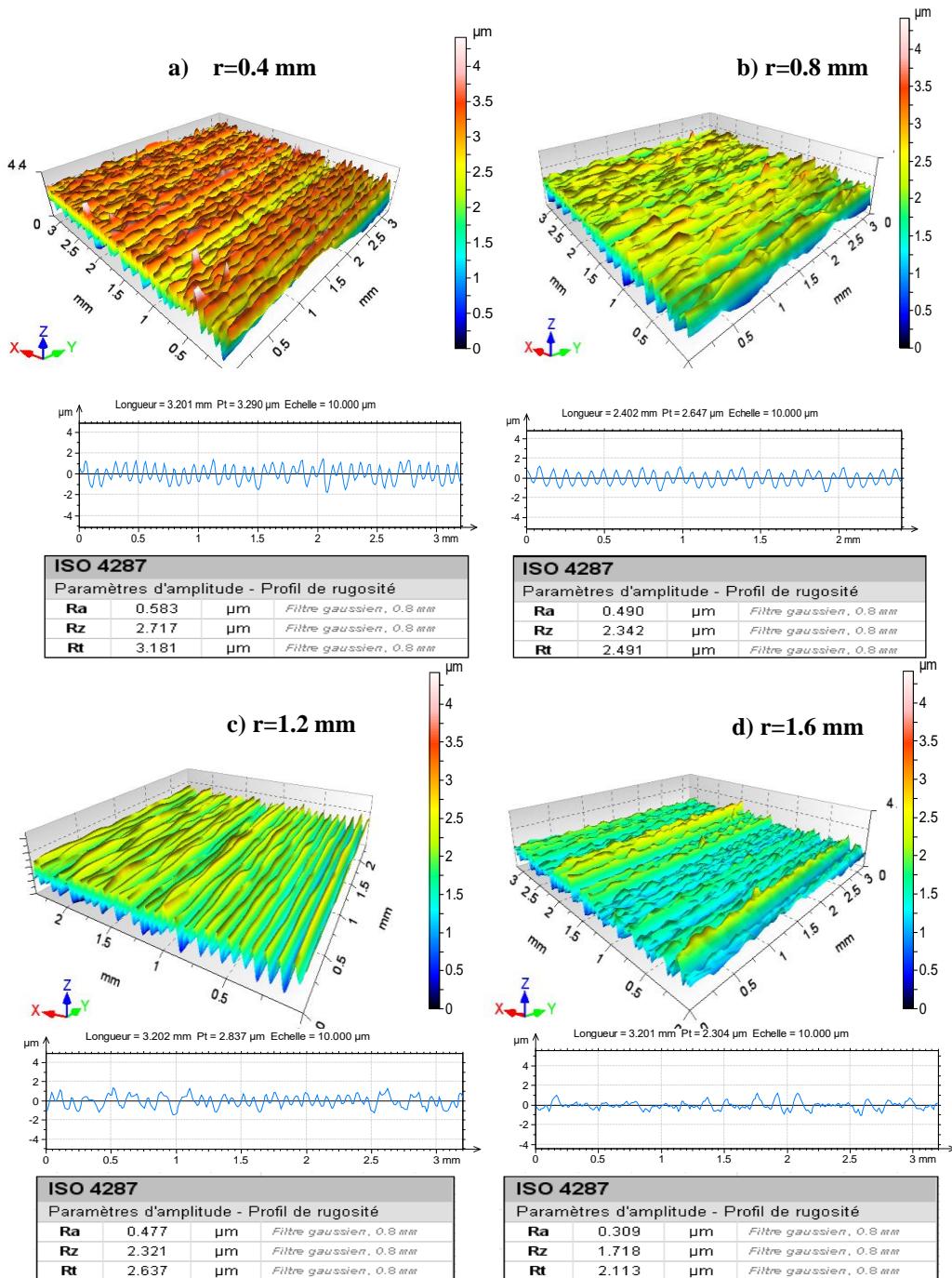


Fig. 8. Topographié d'une surface usinée avec quatre différents rayons de bec de l'outil :
a) $r=0.4$ b) $r=0.8$ c) $r=1.2$ d) $r=1.6$

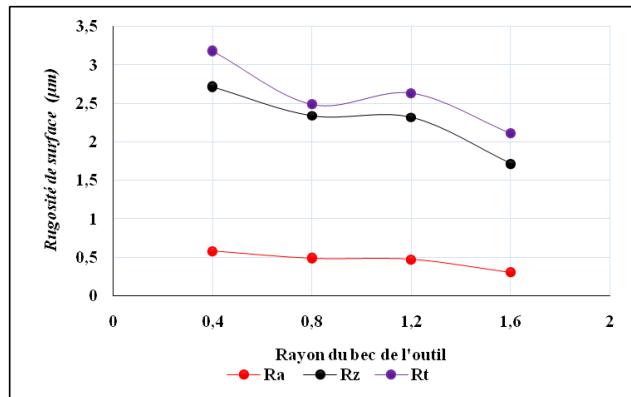


Fig. 9. Critères de rugosité Ra, Rz et Rt en fonction du rayon du bec de l'outil

6. Conclusions

L'étude expérimentale de l'usinage de l'acier AISI D3 avec un outil en carbure à triple revêtement CVD ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{TiCN}$) nous a permis d'identifier l'influence des paramètres de coupe r , V_c , f et a_p sur certains paramètres technologiques d'usinage. L'étude débouche sur les conclusions suivantes :

- L'analyse de la variance pour la rugosité (Ra), montre que (f) et (r) sont les paramètres qui ont le plus grand effet avec des contributions respectives de (42.55 et 36.83) %.
- L'analyse de la variance pour l'effort (Fz), montre que (ap) et (f) sont les paramètres qui ont le plus grand effet avec des contributions respectives de (67.55 et 22.15) %.
- L'analyse de la variance pour (Pc) montre que (ap) est le facteur le plus influent sur (Pc) avec une contribution de 60.88%, suivie par (Vc) et (f) avec des contributions de (17.67 et 17.55)% respectivement.
- Les modèles mathématiques obtenus sont en bons accords avec les données expérimentales. Ces modèles devraient représenter un intérêt industriel important pour les constructeurs, puisqu'ils permettent de faire des prévisions, ce qui présente un gain important en temps et en matériaux.
- L'application de la fonction de désirabilité (DF) pour les optimisations multi-objectifs des paramètres de sortie montre qu'il n'existe pas de solution optimale unique. La solution optimale pour le cas considéré dépendrait des exigences requises par la situation industrielle considérée. Les résultats des trois cas d'optimisation ont donné :
 - 1^{er}cas** : l'objectif souhaité est la minimisation du Ra, pour les opérations de finition.
 - 2^{ème}cas** : l'objectif souhaité est la minimisation de Fz et Pc, pour réduire la consommation d'énergie.

-3ème cas : l'objectif souhaité est la minimisation des trois paramètres de sorti Ra, Fz et Pc. Ce cas est intéressant pour une bonne qualité de surface usinée et une consommation d'énergie réduite en même temps.

- La rugosité (3D) réalisée par la plateforme de métrologie optique (*AltiSurf*) présente un intérêt important, pour afficher les aspérités de la surface usinée et pour le développement des cartes topographiques tridimensionnelles. Ce qui a permis de mettre en évidence l'effet du rayon du bec sur la rugosité de surface.

Remerciements

Le présent travail de recherche est réalisé par des membres de l'équipe coupe des métaux du laboratoire de mécanique et structures (LMS) de l'université du 8 mai 1945 de Guelma, dans le cadre du projet de recherche A11N01UN240120190001. Les auteurs tiennent à remercier la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Développement Technologique (DGRSDT) pour leur contribution et soutien pour mener à bien ce travail.

R E F E R E N C E S

- [1]. Zerti, Oussama, Yallese, Mohamed Athmane, Khettabi, Riad, et al. Design optimization for minimum technological parameters when dry turning of AISI D3 steel using Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. **89**, no 5-8, p. 1915-1934.
- [2]. Bouzid, Lakhdar, Yallese, Mohamed Athmane, Belhadi, Salim, et al. RMS-based optimisation of surface roughness when turning AISI 420 stainless steel. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2014, vol. **49**, no 4, p. 224-251.
- [3]. Kumar, Ramanuj, Sahoo, Ashok Kumar, Mishra, Purna Chandra, et al. ANN modeling of cutting performances in spray cooling assisted hard turning. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. **5**, no 9, p. 18482-18488.
- [4]. Kebblouti, O., Boulanouar, L., et Azizi, R. Bouziane MW. Impact du revêtement et des condition de coupe sur le comportement à l'usure des outils et sur la rugosité de la surface usinée. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2017, **79**(3):90-102.
- [5]. Abidi, Youcef et Boulanouar, Lakhdar. Analyse de la corrélation entre la rugosité et la vibration de coups en usinage des aciers durcis. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 2017, **79**(4).
- [6]. Yallese, M. A., Rigal, J. F., Chaoui, K., et al. The effects of cutting conditions on mixed ceramic and cubic boron nitride tool wear and on surface roughness during machining of X200Cr12 steel (60 HRC). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2005, vol. **219**, no 1, p. 35-55.
- [7]. Aouici, H., Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., et al. Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. **73**, no 9-12, p. 1775-1788.
- [8]. Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., Mabrouki, Tarek, et al. Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). *Machining Science and Technology*, 2010, vol. **14**, no 4, p. 471-501.

- [9]. *Nouioua, Mourad, Yallese, Mohamed Athmane, Khettabi, Riad, et al.* Comparative assessment of cooling conditions, including MQL technology on machining factors in an environmentally friendly approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. **91**, no 9-12, p. 3079-3094.
- [10]. *Dureja, J. S., Singh, Rupinder, et Bhatti, Manpreet S.* Optimizing flank wear and surface roughness during hard turning of AISI D3 steel by Taguchi and RSM methods. *Production & Manufacturing Research*, 2014, vol. **2**, no 1, p. 767-783.
- [11]. *Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Figueira, Luis, et al.* Analysis of machinability during hard turning of cold work tool steel (type: AISI D2). *Materials and Manufacturing Processes*, 2009, vol. **24**, no 12, p. 1373-1382.
- [12]. *Nouioua, Mourad, Yallese, Mohamed Athmane, Khettabi, Riad, et al.* Investigation of the performance of the MQL, dry, and wet turning by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. **93**, no 5-8, p. 2485-2504.
- [13]. *Chabbi, A., Yallese, M. A., Nouioua, M., et al.* Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. **91**, no 5-8, p. 2267-2290.
- [14]. *Sen, Binayak, Mia, Mozammel, Mandal, Uttam Kumar, et al.* GEP-and ANN-based tool wear monitoring: a virtually sensing predictive platform for MQL-assisted milling of Inconel 690. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. **105**, no 1-4, p. 395-410.
- [15]. *Davim, J. Paulo et Figueira, L.* Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2007, vol. **221**, no 4, p. 625-633.
- [16]. *Neşeli, Sileyman, Yaldız, Süleyman, et Türkeş, Erol.* Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology. *Measurement*, 2011, vol. **44**, no 3, p. 580-587.
- [17]. *Kumar, Ravinder et Chauhan, Santram.* Study on surface roughness measurement for turning of Al 7075/10/SiCp and Al 7075 hybrid composites by using response surface methodology (RSM) and artificial neural networking (ANN). *Measurement*, 2015, vol. **65**, p. 166-180.
- [18]. *Bhushan, Rajesh Kumar.* Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites. *Journal of cleaner production*, 2013, vol. **39**, p. 242-254.
- [19]. *Nouioua, M., Yallese, M. A., Khettabi, R., et al.* Optimization of Machining Process During Turning of X210Cr12 Steel Under MQL Cooling as a Key Factor in Clean Production. In : *International Conference Design and Modeling of Mechanical Systems*. Springer, Cham, 2017. p. 855-863.
- [20]. *Zerti, Abderrahmen, Yallese, Mohamed Athmane, Meddour, Ikhlas, et al.* Modeling and multi-objective optimization for minimizing surface roughness, cutting force, and power, and maximizing productivity for tempered stainless steel AISI 420 in turning operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. **102**, no 1-4, p. 135-157.

- [21]. *Laouissi, A., Yallese, M. A., Belbah, A., et al.* Comparative study of the performance of coated and uncoated silicon nitride (Si_3N_4) ceramics when machining EN-GJL-250 cast iron using the RSM method and 2D and 3D roughness functional parameters. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, vol. **41**, no 5, p. 205.
- [22]. *Waikar, R. A. et Guo, Y. B.* A comprehensive characterization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding. *Journal of materials processing technology*, 2008, vol. **197**, no 1-3, p. 189-199.