

Contribution à l'amélioration de la qualité de surface en optimisant les paramètres de coupe par la méthodologie de surface de réponse en fraisage à sec

Contribution to improving the surface quality by optimizing the cutting parameters using the response surface methodology in dry milling.

Fatiha Khettabi*¹, Ahmed Lagred² & Amel Bouchareb²

¹Laboratoire de Mécanique Industrielle (LMI), Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar, BP.12, Annaba, 23000, Algérie

³Laboratoire de Recherche des Technologies Avancées en Production Mécanique (LRTAPM), Département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar, BP.12, Annaba, 23000, Algérie

Soumis le :08/06/2015

Révisé le :10/04/2016

Accepté le :12/04/2016

ملخص

تتمحور هذه الدراسة التطبيقية حول مدى تأثير عوامل ل القطع في عملية التفريز على حالة خشونة أسطح القطع المصنعة. أجريت التجارب على معدن الفولاذ من نوع (C45) باستعمال أداة القطع من نوع (P25), الهدف هو التحسين من عوامل القطع وتحليل خشونة السطح (Ra), باستعمال طريقة استجابة السطح, التي تسمح بإبراز نماذج رياضية لخشونة السطح. تأثير التداخل في عوامل القطع على معامل خشونة السطح درس بالاستعانة بمعالجة إحصائية والتي تعتمد على التحليل المتباين (ANOVA). النتائج المتحصل عليها أثبتت أن عامل انتقال طاولة التفريز هو العامل الأكثر تأثيراً على حالة السطح. الدراسة أيضاً بينت أنه للحصول على جودة عالية لخشونة سطح الفولاذ C45 لابد من توفر عوامل القطع التالية: سرعة القطع 180 م/د وانتقال طاولة التفريز ب 0,10 مم/السن وعند عمق القطع 0,25 مم.

الكلمات المفتاحية: تفريز - خشونة السطح - عوامل القطع - أنوفا - تحسين.

Résumé

Cette étude expérimentale porte sur l'effet des paramètres de coupe en fraisage à sec sur l'état de surface des pièces usinées. Les essais sont réalisés sur l'acier C45, en utilisant des outils de coupe en carbure métallique P25. L'objectif est d'optimiser les paramètres de coupe ainsi que l'analyse de la rugosité de surface (Ra), en utilisant la méthode de surface de réponse, qui a permis de présenter les modèles mathématiques de la rugosité. L'effet des interactions sur le critère de rugosité a été étudié à l'aide d'un traitement statistique basé sur l'analyse de la variance (ANOVA). Les résultats enregistrés montrent que l'avance a l'effet le plus significatif sur l'état de surface. Cette optimisation déduit que la meilleure rugosité de surface des pièces usinées en acier non allié C45 est obtenue lorsque la vitesse de coupe est de 180 m/min, l'avance par dent est de 0,10 mm/dent et la profondeur de passe est de 0,25 mm.

Mots clés : fraisage - rugosité - conditions de coupe - anova - optimisation.

Abstract

This experimental study examined the effect of dry milling cutting parameters on the surface quality of machined parts. The tests were performed on C45 steel, using cutting tools P25 carbide. The aim is to optimize the cutting parameters and the analysis of the surface roughness (Ra) using the response surface method, which allowed to present the mathematical models of the roughness. The effect of interactions on the roughness criterion was studied using statistical processing based on the analysis of variance (ANOVA). The results show that the feed has the most significant effect on the surface condition. This optimization deduced that the best surface roughness of machined parts in carbon steel C45 is obtained when the cutting speed is 180 m / min, feed per tooth is 0,10 mm / tooth and depth of cut is 0,25 mm.

Keys-words: milling- roughness- cutting conditions- anova- optimization.

* Auteur Correspondant : widedskikda@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

L'usinage tient une importance économique dans l'industrie. C'est un des procédés les plus répandus. A ce titre, la maîtrise du procédé de fraisage, est devenu un enjeu majeur dans le secteur industriel [1, 2, 3]. Ainsi, l'optimisation des procédés d'usinage afin d'augmenter la productivité et la qualité devient une priorité au regard de l'industrie et de la recherche [4]. La qualité des états de surface est l'un des aspects les plus pertinents des opérations d'usinage [5]. Les travaux de recherche rapportés dans les références [6] et [7] ont montré que la méthode de surface de réponse est nécessaire pour la modélisation et l'optimisation du processus de fraisage. K. Kadirgama et al [8] ont montré que la méthode de surface de réponse (RSM) est efficace pour analyser les tendances de la rugosité de surface par rapport à différentes combinaisons de variables de conception (vitesse de coupe, avance, profondeur axiale et radiale). P. Michalik et al [9] ont étudié la rugosité de l'acier C45 en fraisage et ont développé un modèle mathématique pour déterminer la rugosité de surface. M. Lobontiu et al [10] ont montré l'importance de l'inclinaison des angles de la fraise sur l'état de surface de l'acier C45. Ces auteurs ont conclu que l'angle 60 degré donne la meilleure rugosité. Ainsi il faut éviter l'angle 45 qui dégrade la qualité de surface. M. Aguiar et al [11] ont étudié la rugosité de surface en fraisage, et ont déduit que la qualité n'a pas augmenté de manière significative avec le temps de coupe dans la plupart des conditions testées. F. Dweiri et al [12] ont étudié l'effet des paramètres d'usinage (la vitesse de coupe, l'avance par dent, la profondeur de passe et le nombre de dent) sur la rugosité de surface. Leur étude a montré que l'utilisation d'une fraise à quatre dents donne la valeur minimale de Ra (0,224 μm). L'utilisation d'une fraise à deux dents engendre une rugosité égale à 0,327 μm . Mohamad Al-Ahmad et al [13] étudiant les paramètres pertinents en fraisage axial, montrent que le pas radial est un facteur nécessaire pour évaluer la qualité des pièces. Par ailleurs, l'augmentation du pas radial fait intervenir l'augmentation de la hauteur de crête et la diminution du temps de coupe. Khairi Yusuf et al [14] ont étudié les paramètres de coupe (vitesse de coupe, l'avance, la profondeur et le type de l'outil) en utilisant la méthode de Taguchi afin d'optimiser la rugosité de surface.

Ils montrent que les facteurs les plus significatifs sur la qualité des surfaces étaient principalement la vitesse de la broche, puis le type de l'outil, et après l'avance suivie par la profondeur de passe choisie. L'objectif de cette étude est d'obtenir un régime optimal afin de minimiser le critère de rugosité (Ra) et d'identifier le paramètre le plus influent sur l'état de surface.

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les essais d'usinage ont été menés au niveau du complexe Arcelor Mittal Annaba-Algérie sur une fraiseuse à commande numérique (TNC 355 de HEIDENHAIN) de marque DX, d'une puissance de 12,2 KW, d'une vitesse maximale de 2000 tr/min et avec rotation de la table de 360°. Les pièces utilisées dans les expériences sont de type rectangulaires d'un acier non allié (C45) de 150 mm de longueur, de 100 mm de largeur et de 100 mm d'hauteur, en utilisant des outils de coupe en carbure P25. Pour les mesures de la rugosité, on a utilisé un appareil compact de mesure rapide et pratique de rugosité Ra et Rz de type TR100. La mesure est effectuée par un micro-capteur en forme de diamant se déplaçant sur une longueur de 6 mm sur la surface du matériau testé, ayant une vitesse de déplacement de 1 mm/sec et doté d'un système à palpeur inductif. L'étendue de mesure pour Ra est de 0,05 jusqu'à 15 μm et pour Rz est de 0,1 jusqu'à 50 μm . L'usinage à sec est utilisé dans l'industrie manufacturière pour réduire les frais généraux et la protection de l'environnement. Par conséquent, les essais de fraisage ont été réalisés dans des conditions de coupe différentes. La figure 1 représente le schéma du montage expérimental.

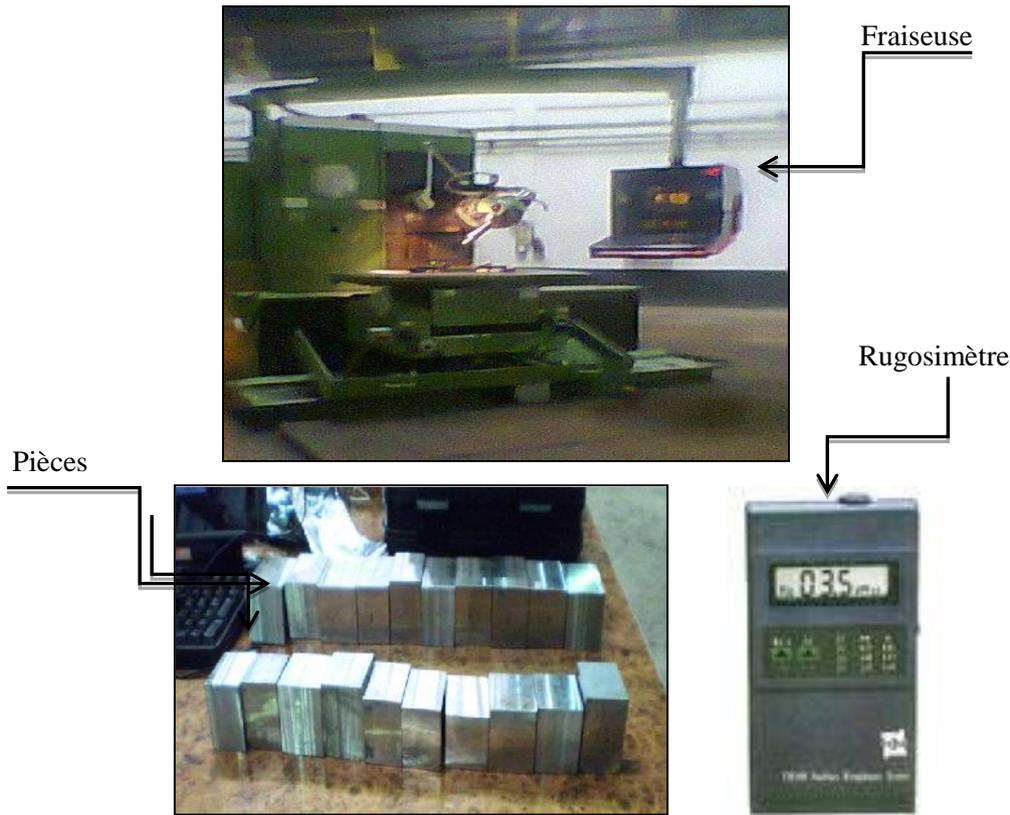


Figure 1. Schéma du montage expérimental.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés dans le tableau 1. Ces résultats vont servir à la détermination des modèles mathématiques qui expriment la relation entre

les paramètres d'entrée (V_c , f , a_p) et le paramètre de sortie (R_a). L'intérêt de cette modélisation est surtout de tenter faire des prédictions.

Tableau 1. Plan d'expérience du critère de rugosité.

	N° Essai	V_c (m/mn)	f_z (mm/dent)	a_p (mm)	R_a (μm)
Ebauchage	1	100	0,3	3	0,31
	2	100	0,3	4	2,43
	3	100	0,4	3	0,65
	4	150	0,3	3	0,82
Finition	5	180	0,1	0,25	0,43
	6	180	0,1	0,5	0,26
	7	180	0,15	0,5	0,36
	8	200	0,1	0,5	0,33

3.1 La méthode de surface de réponse (RSM).

La méthodologie de surface de réponse (MSR) permet d'optimiser une ou plusieurs variables des réponses [15]. Le principe est de faire une modélisation de la surface de réponse

expérimentale [16]. Elle est utilisée pour déterminer la relation entre les paramètres indépendants du processus d'usinage (V_c , f , a_p) avec la réponse souhaitée (R_a), ce qui permet d'explorer l'effet de ces paramètres sur les réponses considérées. Dans cette étude, la relation entre les conditions de coupe et les

paramètres technologiques d'usinage est donnée par l'équation (1) :

$$Y = f(Vc, fz, ap) \tag{1}$$

Y est la réponse désirée et f, la fonction de réponse.

L'approximation de Y est proposée à l'aide d'un modèle mathématique non linéaire, qui convient pour l'étude des effets des interactions des paramètres de régime de coupe sur les caractéristiques d'usinabilité. Dans le présent travail, le modèle mathématique linéaire avec interaction basée sur MSR est donné par l'équation (2)

$$Y = a_0 + a_1Vc + a_2fz + a_3ap + a_{12}Vc \times fz + a_{13}Vc \times ap + a_{23}fz \times ap \tag{2}$$

Y est la réponse désirée de la rugosité de surface(Ra) et a₀, a₁, a₂, a₃, a₁₂ et a₁₃, a₂₃, sont les coefficients de régression à déterminer pour chaque réponse.

3.2 Analyse de la variance pour les critères de rugosité Ra

Les résultats présentés dans le tableau 2 sont analysés par le logiciel Minitab.16 en appliquant l'analyse de variance (ANOVA). L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence des paramètres d'entrée sur la

rugosité à partir d'une série d'expérience [17]. Cette analyse a été effectuée pour un niveau de signification de 5 % et pour un niveau de confiance de 95 %. Dans ce tableau sont indiquées les valeurs des degrés de liberté (DF), la somme des carrés des écarts (SS), les carrés moyens (MS), la propriété statistique (F) et la contribution en pourcentage (PC %) de chaque facteur, ainsi que les différentes interactions indiquant le degré d'influence sur les résultats. Plus le pourcentage de contribution (PC %) est grand, plus le facteur a un effet sur les paramètres étudiés [18]. La formule de calcul du pourcentage de contribution est donnée par l'équation (3) :

$$PC\% = \frac{ss}{ss\ Total} \times 100 \tag{3}$$

D'après les résultats du tableau 2, le facteur de l'avance a une grande influence sur la rugosité de surface Ra avec une contribution de 46,17 %. Ensuite vient la vitesse de coupe avec une contribution de 28,07 %, et en dernier lieu l'interaction fz × ap qui a une contribution de 9,80 %. Des résultats similaires ont été rapportés dans la référence [20]. La méthode Taguchi utilisée pour minimiser la rugosité de surface conclut que l'avance par dent est le paramètre le plus influent sur la rugosité.

Tableau 2. Analyse de variance pour Ra.

Source	DF	SS	MS	F	PC %
Modèle	6	3,60307	0,600511	7,71644	97,885
Vc	1	1,03355	0,013773	0,17699	28,078
ap	1	0,01572	0,240207	3,08661	0,427
fz	1	1,69960	0,000065	0,00084	46,173
Vc × ap	1	0,25068	0,006586	0,08462	6,810
Vc × fz	1	0,24268	0,003764	0,04837	6,592
Ap × fz	1	0,36084	0,360838	4,63670	9,803
Erreur (ε)	1	0,07782	0,077822		
Total	7	3,68089			

La figure 2 illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité de Ra. D'après cette figure on remarque que l'avance par dent a un effet significatif sur la rugosité. Plus l'avance augmente plus l'état de surface

augmente. L'augmentation de la vitesse de coupe diminue de la valeur de la rugosité. Cependant la profondeur de passe ne présente pas un effet important sur la rugosité de surface.

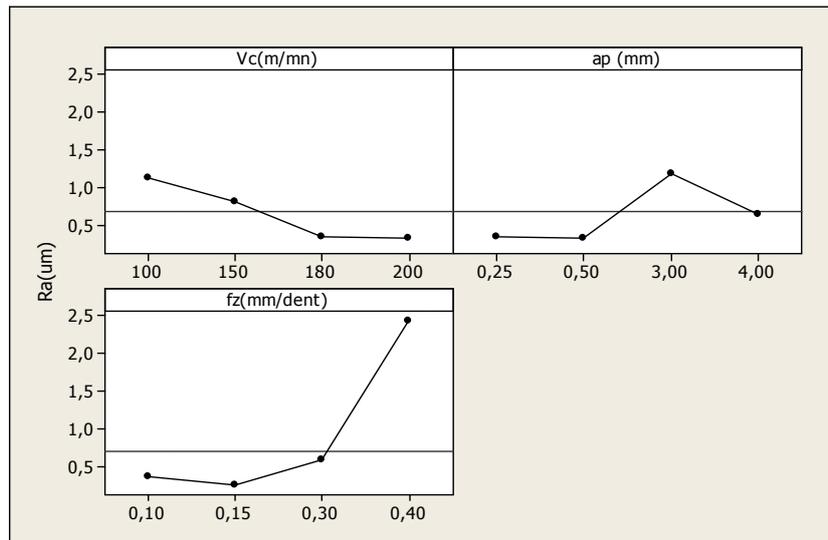


Figure 2. Les effets moyens de Ra.

3.3. Analyse de régression du Ra

L'analyse de régression de la rugosité (Ra) en fonction du régime de coupe (V_c , f , a_p) donne l'équation du modèle complet (5). R^2 est un coefficient de détermination multiple des réponses mesurées [19]. La valeur de R^2 varie entre 0 et 1. Si elle est proche de 1 le modèle est bon et significatif. Le coefficient de détermination de la régression R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (4) :

$$R^2 = 1 - \frac{ss\ Erreur}{ss\ Total} \quad (4)$$

L'équation (5) exprime le modèle linéaire avec interaction de la rugosité de surface Ra.

$$Ra (\mu m) = -0,3028 + 0,0087 V_c - 2,3196 a_p - 0,5038 f_z + 0,0024 V_c * a_p - 0,0233 V_c * f_z + 7,6490 a_p * f_z \quad (5)$$

Le coefficient de corrélation est égal à 0,98.

Cela nous donne que 97,89 % des variations des rugosités sont expliquées par le modèle et que 2,11 % restent par conséquent inexpliquées. Cette valeur du coefficient de détermination montre que les mesures des rugosités obtenues sont modélisées de façon très satisfaisante par le modèle obtenu.

3.4 Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées

Pour valider le modèle, il est nécessaire d'étudier la comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) du critère de rugosité et celles estimées (prévues) par le modèle mathématique obtenu. D'après la figure 3, les valeurs expérimentales et les valeurs prévues sont très proches avec un intervalle de confiance de 95 %. Il apparaît que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donne des résultats satisfaisants.

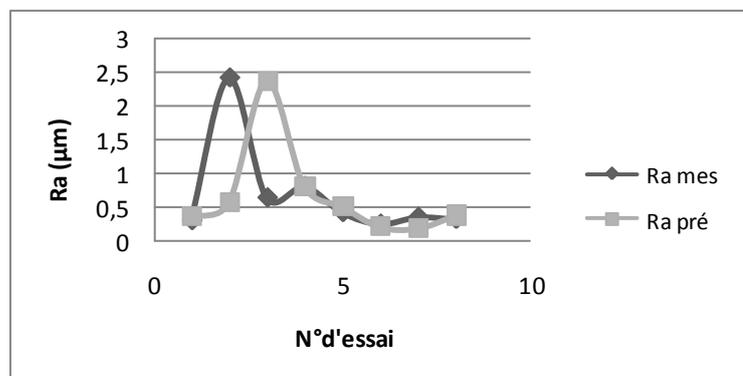


Figure 3. Comparaison entre Ra mesurées et Ra prévues.

Tableau 3. L'erreur pour les huit essais réalisés.

N° Essais	Ra mesurées	Ra prédites	Erreur (ϵ)
1	0,31	0,36	0,05
2	2,43	0,57	1,86
3	0,65	2,37	1,72
4	0,82	0,80	0,02
5	0,43	0,51	0,08
6	0,26	0,23	0,03
7	0,36	0,18	0,18
8	0,33	0,38	0,05

3.4 Analyse des surfaces de réponses pour Ra

La représentation tridimensionnelle des surfaces des réponses est résumée dans les figures 4, 5 et 6. La figure 4 représente l'influence de la vitesse de coupe et la

profondeur de passe sur la rugosité arithmétique Ra. D'après cette représentation la combinaison de la profondeur de passe la plus petite et la vitesse de coupe la plus grande donne la meilleure rugosité.

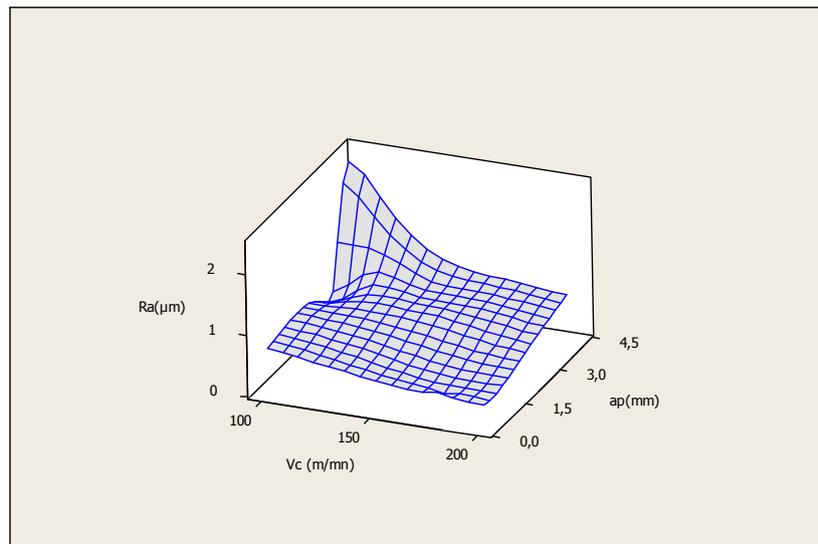


Figure 4. Surface de réponse (ap, Vc).

La figure 5 représente l'influence de l'avance par dent et la profondeur de passe sur la rugosité. Il apparaît que les avances et les

profondeurs les plus petites donnent des rugosités très petites.

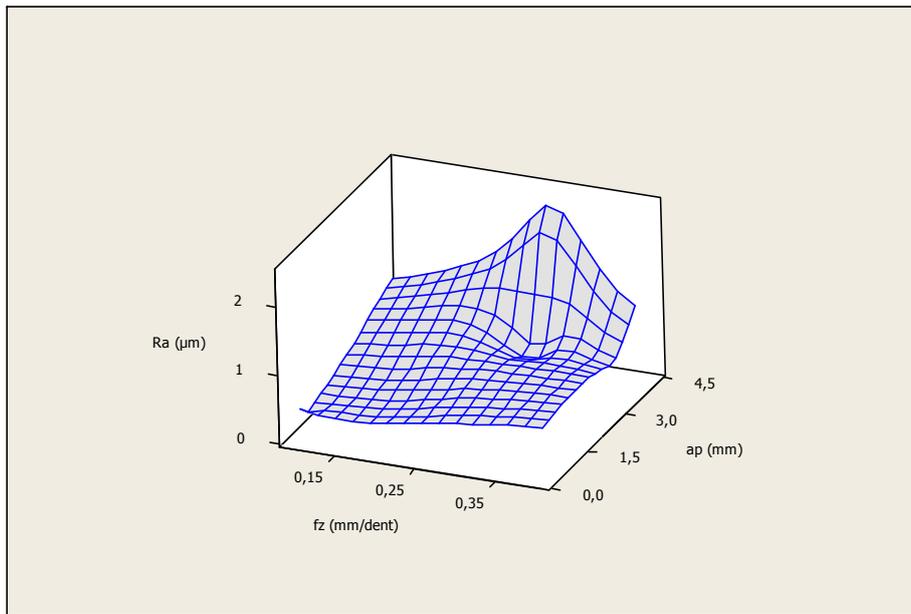


Figure 5. Surface de réponse (fz, ap).

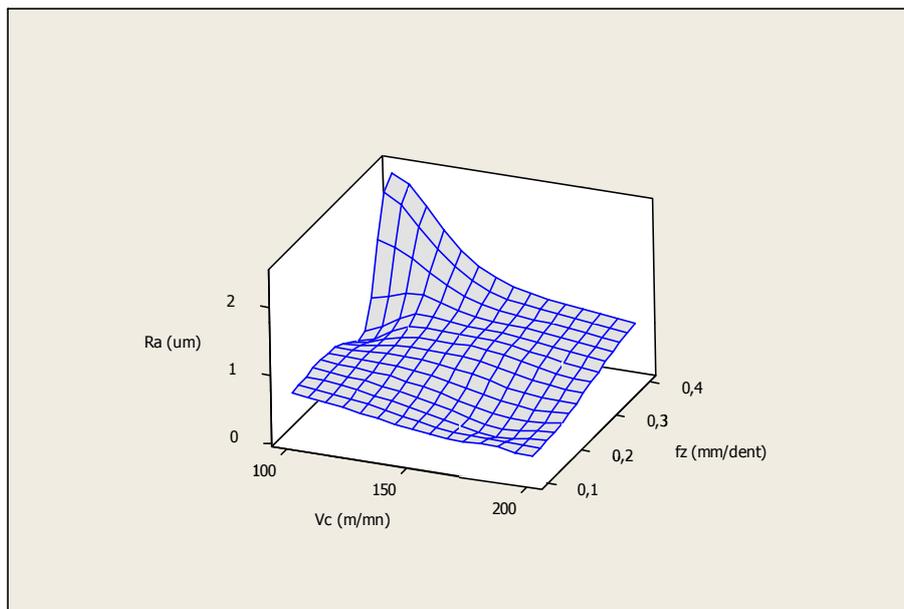


Figure 6. Surface de réponse (fz, Vc).

La figure 6 représente l'influence de l'avance fz et la vitesse de coupe Vc sur la réponse. Cette représentation montre que les rugosités sont minimums lorsque les vitesses sont plus grandes et les avances sont plus petites.

4. OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE POUR LA RUGOSITE DE SURFACE Ra.

Le tableau 4 présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe lors du fraisage de l'acier C45 avec un outil de coupe P25, pour la rugosité de surface.

Tableau 4. Conditions d'optimisation.

Conditions	Objectifs	Limite inférieur	Limite supérieur
Vc (m/min)	Gamme	100	200
fz (mm/dent)	Gamme	0,1	0,4
ap (mm)	Gamme	0,25	4
Ra (µm)	Mini	0,26	2,43

Le tableau 5 présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) de la rugosité Ra. Les paramètres de coupe optimaux obtenus s'avèrent : la vitesse de coupe est égale à 180 m/min, l'avance : 0,10 mm/dent et la profondeur de passe : 0,25 mm, la valeur minimale de la rugosité est : Ra = 0,36 μ m.

Tableau 5. Optimisation par MSR de la rugosité.

Vc (m/min)	fz (mm/dent)	ap (mm)	Ra (μ m)	Désirabilité
180	0,10	0,25	0,36	1

5. CONCLUSION

L'application de la méthodologie de surface de réponse MSR en fraisage de l'acier non allié C45 avec les carbures métalliques a permis d'obtenir des modèles mathématiques pour le critère de la rugosité de surface Ra en fonction des paramètres d'usinage. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- L'avance a une plus grande influence sur la rugosité de surface (46,17 %). Ensuite vient la vitesse de coupe (28,078 %).
- Les meilleures rugosités de surface ont été obtenues pour les faibles valeurs des avances et de grandes valeurs des vitesses de coupe.
- En comparant les valeurs expérimentales et prédites du critère de rugosité, on remarque qu'ils sont en bonne corrélation.
- L'optimisation par MSR des conditions de coupe les mieux adaptées pour une rugosité de surface Ra = 0,36 μ m, nous a donné : Vc = 180 m/min, fz = 0,10 mm/dent et ap = 0,25 mm.

REFERENCES

[1] Delahaye N., 2015. Contribution à l'évaluation des efforts de coupe avec applications au fraisage de finition. Thèse de doctorat en Génie Mécanique, université d'Artois, France, 104p.

[2] Benghersallah M., 2010. Recherche sur le fraisage des matériaux durs avec les matières de coupe modernes : application à L'UGV des superalliages. Thèse de doctorat en Génie Mécanique, Université de Badji Mokhtar, Annaba, Algérie. 132p.

[3] Bouzid W., Zghal A., Saï L., 2003, Optimisation de la rugosité des surfaces fraisées. *Revue de Mécanique Appliquée et Théorique*, Vol. 1, 5, pp. 341-356.

[4] Martinez L. R.C., 2006. Identification des sources de vibration en usinage : étude expérimentale et numérique.

Thèse de doctorat de l'université Paul Verlaine, Metz, France, 175p.

[5] Bloul B., Aour B., Bourdim A., Harhout R., 2015, Modélisation de l'état de surface d'une pièce rectifiée en utilisant ANN. 1^{er} Congrès International CMEEE 2015-Marrakech, Maroc.

[6] Soleymani Yazdi M.R., Khorram A., 2010, Modeling and optimization of milling process by using RSM and ANN methods, *Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, (5), pp. 1793-8236.

[7] Marimuthu P., Chandrasekaran K., 2011, Experimental study on stainless steel for optimal setting of machining parameters using Taguchi and neural network, *Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, (10), pp. 1819-6608.

[8] Kadrigama K., Noor M. M., Rahman M. M., Rejab M. R. M., Haron C. H. C., Abou-El-Hossein K. A., 2009, Surface Roughness Prediction Model of 6061-T6 Aluminium Alloy Machining Using Statistical Method, *Scientific Research*, Vol. 25, (2), 1450-216X.

[9] Michalik P., Zajac J., Hatala M., Mital D. & Fecova V., 2014, Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling, *Measurement*, Vol. 58, pp. 416-428.

[10] Lobontiu M., Pascal I., 2010. Influence of tool axis inclination angle on the surface roughness in ball end milling of OLC45 (C45) material, *Proceedings in Manufacturing Systems*, Vol. 5, (1), 2067-9238.

[11] Aguiar M.M., Diniz A.E., Pederiva R., 2013, Correlating surface roughness, tool wear and tool vibration in the milling process of hardened steel using long slender tool, *Machine Tooling and Manufacturing*, Vol. 68.

[12] Dweiri F., Al-Jarrah M., Al-Wedyan H., 2003, Fuzzy surface roughness modeling of CNC down milling of Aluminic-79, *Materials Processing Technology*, Vol. 133, pp. 266-275.

[13] Al-Ahmad M., D'Acunto A., Martin P., 2007. Influence de différentes stratégies de tréfilage sur la qualité de surface et la productivité, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, France.

[14] Yusuf K., Nukman Y., Yusuf T. M., Dawal S. Z., Qin Yang H., Mahlia T. M. I., K. F. Tamrin K. F., 2010. Effect of cutting parameters on the surface roughness of titanium alloys using end milling process, *Scientific Research and Essays*, Vol.5, (10), pp.1992-2248.

[15] Rabier F. 2007. Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire. Thèse de doctorat en matériaux et structures mécaniques, Toulouse, France, 238p

[16] Chibane H, Serra R, Morandea A, Leroy R. 2011. Selection of machining conditions for aeronautic composite by vibratory analysis. *Comptes Rendus des JNC 17. Poitiers 2011*, France.

[17] Bouzid L., Yaltese M.A., Chaoui K., Mabrouki T., Boulouanour L., 2015. Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology, *J. Engineering Manufacture*. Vol. 229 (1) pp. 45-61.

[18] Hessainia Z., Yallese M.A., Zerti O., 2015. Application de la méthode de régression linéaire multiple pour la détermination des modèles des efforts de coupe en tournage dur, 2^{ème} Conférence Internationale de Mécanique (ICM'15), Constantine, Algérie.

[19] Bouzid L., Boutabba. S, Yallese M/A., Belhadi S., Girardin F., 2014, Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel. *Int Jour Adv Manuf Technol*, 74, (5-8), pp. 879-891.

[20] Nizam Sadiq S., Raguraman T R., Thresh Kumar D, Rajasekaran R., Kannan T T M., 2014. Optimisation of milling parameters of ohns Steel using TiALN coated cutter by design of experiment technique, *Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol.3, (1), 2278 – 0149.