

MODELISATION ET OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE EN TOURNAGE DUR PAR LA TECHNIQUE DE TAGUCHI EN UTILISANT LA MSR

Mohamed ELBAH^{1,3}, Brahim FNIDES², Hamdi LAOUICI^{1,3} & Mohamed Athmane YALLESE³

The objective of this study is to define the optimal cutting regime and the mathematical models for the machining of AISI4140. This is why our work is to evaluate the impact of five cutting parameters such as major cutting edge angle(χ_r), cutting speed (V_c), feed rate (f), depth of cut (ap) and tool nose radius (r) on radial force (Fr) and surface roughness(Ra) in dry hard turning 42CrMo4 steel with mixed ceramic tool (CC650). Analysis of variance (ANOVA) and response surface methodology (RSM) were used for Taguchi plan L_{18} . Mathematical models found enabled us to identify the significant factors of this cutting regime variables (χ_r , V_c , f , ap and r) on studied technological parameters (Fr and Ra).

L'objectif de cette étude est de définir le régime de coupe optimal et les modèles mathématiques relatif à l'usinage de l'acier 42CrMo4. C'est pour cette raison que notre travail consiste à évaluer l'effet de cinq variables de coupe telles que l'angle de direction principal (χ_r), la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), la profondeur de passe (ap) et le rayon du bec de la plaquette(r)sur l'effort radial(Fr) et la rugosité de surface (Ra) en tournage dur à sec de l'acier 42CrMo4 avec la céramique mixte (CC650). Les méthodes ANOVA et MSR ont été utilisées pour un plan de Taguchi L_{18} . Les modèles trouvés ont une grande importance économique dans le milieu industriel car ils permettent d'optimiser le processus de coupe. Les degrés d'influence des éléments du régime de coupe (χ_r , V_c , f , ap et r) sur les paramètres technologiques étudiés (force et rugosité) ont été déterminés.

Keywords : Tournage, Taguchi, Force, Rugosité, ANOVA, RSM

1. Introduction

Les essais de chariotage effectués sur l'acier 42CrMo4 usiné par la céramique mixte (CC650), ont été menés en se limitant sur cinq variables d'entrée telles que l'angle de direction principal (χ_r), la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f),

^{1,3}Dr., Dépt GMP, Ecole Nationale Supérieure de Technologique (ENST), Dergana, Bordj-Elkifane, Alger, Algérie, et Laboratoire de Mécanique & Structures (LMS)Université de Guelma, Algérie , e-mail: elbah_med@yahoo.fr

²Dr., Dépt CMP, FGM&GP, USTHB, Bab-Ezzouar, Alger, Algérie, e-mail :fbrahim@yahoo.fr

^{1,3}Pr., Dépt GMP, Ecole Nationale Supérieure de Technologique (ENST), Dergana, Bordj-Elkifane, Alger, Algérie, et Laboratoire de Mécanique & Structures (LMS) Université de Guelma, Algérie , e-mail: hamdi.aouici@enst.dz

³Pr., Laboratoire de Mécanique & Structures (LMS), Dépt GM, Université de Guelma, Algérie, e-mail : yallese.m@gmail.com

la profondeur de passe (ap) et le rayon du bec de la plaquette (r). Les résultats présentés dans ce travail concernent l'influence de ces cinq paramètres de coupe sur l'effort radial (F_r) et la rugosité de surface (R_a).

Le tournage dur de l'acier AISI O1 usiné par une plaquette de carbure revêtu (PVD Ti-AlN) effectué par [1] montre que l'augmentation de l'avance par tour dégrade l'état de surface des pièces usinées par contre l'augmentation de la vitesse de coupe améliore la qualité de surface que ce soit pour le tournage dur à sec ou lubrifié. Singh et al [2] ont usiné l'alliage de titane (Ti-Cr-Mo) par une plaquette de carbure revêtu (TiC) selon la table de Taguchi L20 qui correspond pour trois variables (V_c , f et ap) à trois niveaux. Ils ont trouvé que le régime de coupe adéquat est obtenu pour : $V_c = 280$ tr/min, $f = 0,5$ mm/tr et $ap = 0,59$ mm.

L'étude expérimentale faite par [3], concernant le tournage de finition à sec des aciers durcis AISI 52100 (66HRC), AISI 4140 (61HRC) et AISI 1045 (39HRC) par la céramique mixte CC650 a abouti à des résultats qu'à partir de l'analyse ANOVA, il a été observé que l'avance est le paramètre le plus significatif sur la rugosité de surface, suivi par la profondeur de passe puis l'interaction de ces deux paramètres pour les aciers AISI 52100 et AISI 4140. Pour la vibration radiale, la vitesse de coupe est le paramètre le plus significatif. Les hautes fréquences de rotation engendrent plus de vibrations sur le système usinant, ce qui influence les vibrations spécifiques de la coupe et influence négativement sur la corrélation entre la rugosité de surface et la vibration de coupe. La modélisation de la rugosité de surface à partir des vibrations de coupe nécessite un filtrage des vibrations parasites. Pour améliorer la qualité de surface, il est indispensable de réduire l'avance et la profondeur et aussi optimiser la vitesse de coupe à un niveau où les vibrations du système tournant seront à leur niveau minimal. On déduit que la céramique mixte CC650 est plus recommandée pour l'usinage dur de l'acier AISI 1045 (39HRC) qui donnera des résultats avantageux en précision et qualité de surface.

L'étude expérimentale de l'usinage de l'acier AISI D3 avec un outil en carbure à triple revêtement CVD (Al₂O₃/TiC/TiCN) réalisée par [4] a permis d'identifier l'influence des paramètres de coupe r , V_c , f et ap sur certains paramètres technologiques d'usinage. L'étude débouche sur les conclusions suivantes : L'analyse de la variance pour la rugosité (R_a), 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 (F_z), 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 la puissance de coupe (P_c) montre que (ap) est le facteur le plus influent sur (P_c) avec une contribution de 60,88%, suivie par (V_c) et (f) avec des contributions de (17,67 et 17,55)% respectivement.

Liu et al. [5] ont appliqué la méthode Taguchi pour optimiser les paramètres de processus en utilisant le matériau SS304 pour une meilleure durée de vie de l'outil et moins de temps de production. La vitesse d'avance, la vitesse de coupe et

la profondeur de coupe sont les paramètres d'usinage utilisés en tenant compte de la durée de vie de l'outil et du temps de production pour l'application de la méthode Taguchi, analyse de la variance (ANOVA). D'autres chercheurs se sont basés sur la méthode de surface de réponse pour développer les modèles d'usinabilité [6, 7, 8]. L'objectif de cette étude est la mise en évidence de l'influence des paramètres de coupe sur l'effort de coupe et la rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier 42 CrMo4 avec un outil en céramique mixte (CC650) de trois rayons déférents (0,8, 1,2 et 1,6 mm) et de deux angles d'inclinaisons χ_r (45 et 75°).

2. Procédure expérimentale

2. 1. Equipements utilisés

L'usinage a été effectué sur un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40 C de puissance sur la broche égale à 6,6 KW. Les éprouvettes choisies sont en acier faiblement allié de nuance 42CrMo4 (contenant 0,42% de carbone ; 1% de chrome et quelques traces de molybdène) d'une dureté de 60HRC. L'outil de coupe est une plaquette en céramique mixte ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$: CC650) d'une géométrie (SNGA120408T01020) [9].

L'acquisition de l'effort radial (Fr) est obtenue par un dynamomètre Kistler (9257 B). Pour la mesure du critère de rugosité (Ra), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) Surftest 201 (Mitutoyo). Ce dernier est constitué d'un palpeur en diamant, avec un rayon de pointe de 5 μm se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la force radiale (Fr) et la rugosité (Ra) a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce. La figure 1 présente le dispositif de mesure des deux paramètres technologiques.

Le plan de Taguchi vient pour enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires. Il a pour but de simplifier le protocole expérimental afin de mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. Il se distingue par une réduction importante du nombre d'essais, tout en gardant une bonne précision. Le nombre d'essais à réaliser pour trois facteurs à trois niveaux est de 27 ($3^3 = 27$), la table orthogonale de Taguchi L_9 se limite à 9 essais. Cinq facteurs à 3 niveaux donnent 243 essais ($3^5 = 243$), tandis que la table orthogonale de Taguchi L_{18} propose 18 essais. Six facteurs à cinq niveaux donnent 15625 essais ($5^6 = 15625$), alors que la table orthogonale de Taguchi L_{25} propose 25 essais. Le plan de Taguchi place le modèle comme un élément clef de la stratégie du plan d'expériences [10-12].

Les niveaux (supérieurs, inférieurs et centraux) des éléments du régime de coupe sont définis comme suit :

2. 2. Plan de Taguchi

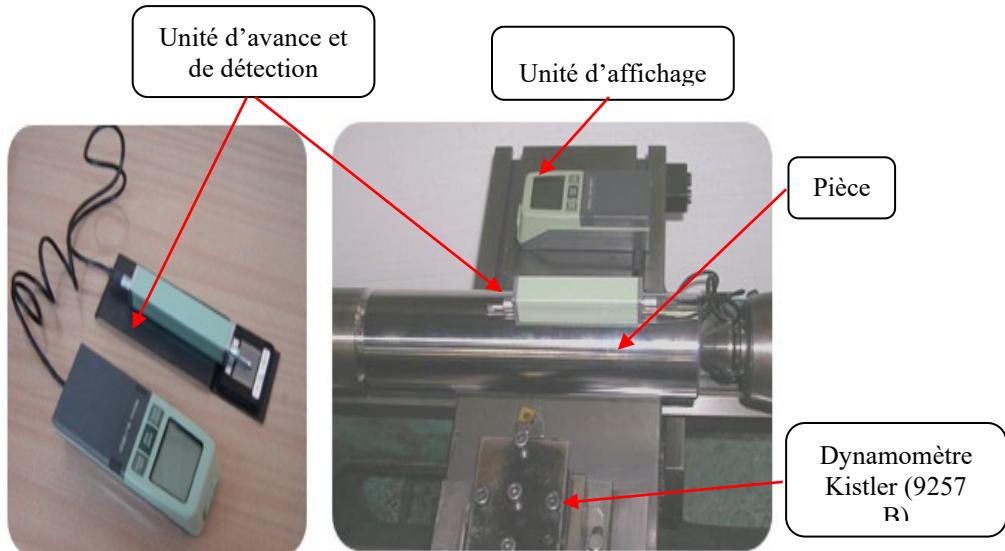


Fig. 1. Dispositif de mesure de Fr et Ra

- ✓ Angle de direction principal : 45° et 75°
- ✓ Vitesse de coupe : 100 m/min ; 150 m/min et 200 m/min
- ✓ Avance par tour : 0,08 mm/tr ; 0,12 mm/tr et 0,16 mm/tr
- ✓ Profondeur de passe : 0,1 mm ; 0,2 mm et 0,3 mm
- ✓ Rayon du bec de l'outil : 0,8 mm ; 1,2 mm et 1,6 mm.

3. Résultats et discussion

3. 1. Résultats expérimentaux

Les valeurs expérimentales de la composante de l'effort de coupe (Fr) et du critère de la rugosité arithmétique (Ra) sont illustrées dans le tableau 1. 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 L_{18}). Le matériau de coupe utilisé dans ce plan est la céramique mixte non revêtue (CC650).

On constate que l'effort radial augmente en fonction de la profondeur de passe et diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe pour différents angles de directions principaux. Avec l'augmentation de la profondeur de passe on assiste à un accroissement important de (Fr) (l'épaisseur du copeau devient importante). Donc, avec la diminution de l'angle de direction principal la composante de l'effort de coupe (Fr) augmente légèrement et cela presque pour tous les régimes de coupe du plan.

On peut déduire après l'analyse des résultats que les états de surfaces générés par l'angle de direction principal ($\chi_r = 45^\circ$) sont bien meilleurs que ceux générés par

l'angle de direction ($\chi_r = 75^\circ$). Ceci peut être justifié par l'augmentation de la longueur de contact ($\chi_r = 45^\circ$) entre l'outil et la pièce, réduisant ainsi la pression de coupe, ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur de la zone de coupe. Par contre l'élévation de la température dans la zone de coupe entraîne une mauvaise évacuation de la chaleur, suite à la concentration des contraintes dans la zone de coupe après la diminution de la longueur de contact ($\chi_r = 75^\circ$).

On remarque aussi que, l'amélioration de la rugosité de surface (Ra) obtenue par un rayon du bec de la plaquette $r = 1,6$ mm est plus importante par rapport à $r = 1,2$ mm et $r = 0,8$ mm. Ceci est justifié par le plus grand rayon du bec de l'outil qui participe à la dissipation de la chaleur dans la zone de coupe, supportant des contraintes d'usinage dues à la dureté du matériau usiné. Le grand rayon du bec écrase les aspérités laissées par l'usinage, et de cette façon il contribue à diminuer la rugosité et améliorer l'état de surface.

L'analyse des résultats montre que l'effort radial a été obtenu dans la gamme de 45,29-158,81 N. La composante de l'effort radial (Fr) est influencée principalement par la profondeur de passe et l'avance.

Tableau 1
Plan de Taguchi L₁₈

Run	N° exp	χ_r , deg	V_c , m/min	f , mm/tr	ap , mm	r , mm	Fr , N	Ra, μ m
1	1	75	100	0,08	0,1	0,8	45,29	0,52
2	4	75	100	0,12	0,2	1,2	79,27	0,58
3	7	75	100	0,16	0,3	1,6	143,92	0,57
4	5	75	150	0,08	0,1	1,2	49,54	0,41
5	8	75	150	0,12	0,2	1,6	109,48	0,3
6	2	75	150	0,16	0,3	0,8	158,81	0,88
7	3	75	200	0,08	0,2	0,8	102,57	0,46
8	6	75	200	0,12	0,3	1,2	137,26	0,47
9	9	75	200	0,16	0,1	1,6	83,32	0,51
10	10	45	100	0,08	0,3	1,6	112,86	0,45
11	13	45	100	0,12	0,1	0,8	88,93	1,49
12	16	45	100	0,16	0,2	1,2	88,49	0,94
13	11	45	150	0,08	0,2	1,6	117,45	0,32
14	14	45	150	0,12	0,3	0,8	149,83	1,5
15	17	45	150	0,16	0,1	1,2	85,81	0,95
16	18	45	200	0,08	0,3	1,2	119,73	0,53
17	12	45	200	0,12	0,1	1,6	76,87	0,42
18	15	45	200	0,16	0,2	0,8	153,27	1,99

3.2. ANOVA pour (Fr)

La méthode des moindres carrés est employée pour l'analyse de la variance (ANOVA) à l'aide du logiciel « MINITAB 19 ». Les résultats de cette technique statistique sont présentés dans le tableau 2. Le tableau de l'analyse ANOVA est généralement effectué sur les paramètres mesurés en vue d'évaluer les effets principaux des facteurs sur les réponses étudiées. Le "F-valeur" du modèle est calculé à partir de la moyenne de la somme des carrés du modèle divisé par la moyenne de la somme des carrés des résidus. En outre, si "P-valeur" du modèle est très petit (inférieur à 0,05) alors les limites dans le modèle a un effet significatif sur la réponse. Le pourcentage est utilisé pour évaluer l'importance relative de chaque facteur.

On remarque que la vitesse de coupe, l'angle de direction et le rayon de la plaquette n'ont aucun effet significatif sur l'effort radial (*Fr*). Les résultats du "F-valeur" indiquent clairement que la profondeur de passe est le facteur le plus significatif qui affecte l'effort radial (*Fr*) avec une contribution de 76,12%, et que l'avance est le second facteur significatif avec une contribution de 13,64%. Mais la vitesse de coupe, l'angle de direction et le rayon de l'outil ont de faibles contributions successives de (6,45 ; 2,31 et 1,48)%.

Tableau 2

ANOVA pour (Fr)								
Source	ddl	SCE	SC-ADJ	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
Modèle	5	16877,3	16877,3	3375,5	14,3245	1,05E-04		
χ_r	1	389,9	389,9	389,9	1,6548	0,222567	2,31	insignifiant
Vc	1	1087,9	1087,9	1087,9	4,6169	0,052765	6,45	insignifiant
f	1	2301,3	2301,3	2301,3	9,7661	8,77E-03	13,64	signifiant
ap	1	12847,8	12847,8	12847,8	54,5226	8,00E-06	76,12	signifiant
r	1	250,3	250,3	250,3	1,062	0,323083	1,48	insignifiant
Résiduel	12	2827,7	2827,7	235,6				
Total	17	19705						

3.3. ANOVA pour (Ra)

L'analyse ANOVA présentée sur le tableau 3, montre que les termes f , χ et r ont un effet significatif sur le critère de la rugosité (*Ra*).

Le facteur le plus déterminant sur la rugosité (*Ra*) est le rayon du bec de l'outil (r) avec une contribution de 46 %, vient en deuxième position l'avance (f) avec un taux de 27,77%, et l'angle de direction principal (χ_r) de 26,04%, la vitesse de coupe (Vc) de 0,104% et la profondeur de coupe (ap) de 0,15%. Il ressort d'après cette analyse que l'effet de la vitesse de coupe (Vc) et de la profondeur de coupe (ap) sur la rugosité est très faible.

La meilleure rugosité de surface (*Ra*) est réalisée avec la combinaison de la plus basse avance ; $f = 0,08$ mm/tr, le plus grand angle de direction $\chi_r = 75^\circ$ et le plus grand rayon du bec de l'outil $r = 1,6$ mm. La rugosité de surface (*Ra*) diminue

avec l'augmentation du rayon du bec de l'outil et l'angle de direction (autrement dit les caractéristiques géométriques de l'outil). Des résultats similaires ont été obtenus par [13-15].

Tableau 3

ANOVA pour (<i>Ra</i>)								
Source	ddl	SCE	SC-ADJ	CM	F-value	Prob.	Cont. %	Remarque
Modèle	5	3,19582	3,19582	0,63916	11,7347	2,78E-04		
χ_r	1	0,83205	0,83205	0,83205	15,2761	2,08E-03	26,04	signifiant
V_c	1	3,33E-03	3,33E-03	3,33E-03	0,0612	0,808794	0,104	insignifiant
f	1	0,88563	0,88563	0,88563	16,2598	1,66E-03	27,71	signifiant
ap	1	4,80E-03	4,80E-03	4,80E-03	0,0881	0,771649	0,15	insignifiant
r	1	1,47	1,47	1,47	26,9885	2,24E-04	46	signifiant
Résiduel	12	0,65361	0,65361	0,05447				
Total	17	3,84943						

3.4. Modèles de régression pour *Fr* et *Ra*

Les modèles de la régression générale ont été développés pour la composante de l'effort de coupe (*Fr*) et la rugosité de surface (*Ra*) en fonction des paramètres de coupe principaux qui sont : l'angle de direction, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le rayon de la plaquette. En conséquence, les modèles adaptés en termes de facteurs réels pour l'effort de coupe et la rugosité de surface sont donnés par les équations (1) et (2).

$$Fr = 2,47167 + 0,310296 \chi_r + 0,190433 V_c + 346,208 f + 327,208 ap - 11,4167 r \quad (1)$$

$$R^2 = 85,65\% \quad R^2 \text{ (ajust)} = 79,67\%$$

$$Ra = 1,84111 + 0,01433 \chi_r - 0,000333 V_c + 6,79167 f + 0,2ap - 0,875 r \quad (2)$$

$$R^2 = 83,02\% \quad R^2 \text{ (ajust)} = 75,95\%$$

La valeur de R^2 (coefficient de corrélation multiple) pour l'équation 1 du modèle indique que 85,65 % de toutes les variations sont expliqués par le modèle. Le R^2 ajusté est une statistique qui est ajustée à la "taille" du modèle ; c'est-à-dire, le nombre de facteurs (limites). La valeur du R^2 ajusté indique que 79,67 % de toute la variabilité sont expliqués par le modèle après avoir considéré les facteurs significatifs.

3.5. Surfaces de réponse pour *Fr* et *Ra*

L'analyse des diagrammes des surfaces (3D) de la figure 2 pour *Fr* montre que la profondeur de passe a un effet significatif très important sur l'effort radial (*Fr*). Cette tendance est observée en fixant les autres paramètres à ces valeurs ($V_c = 150$ m/min ; $\chi_r = 45^\circ$ et $r = 1,2$ mm). On remarque que l'effort radial (*Fr*) augmente aussi avec l'augmentation de l'avance par tour.

La valeur minimale de l'effort radial (*Fr*) est observée avec la profondeur de passe la plus basse (0,1 mm) et l'avance la plus faible (0,08 mm/tr), ce qui est très logique, puisqu'en ce point la section du copeau est la plus faible.

On remarque aussi que l'avance par tour a un effet important sur l'effort radial (Fr). Cette tendance est observée en fixant les autres paramètres à ces valeurs ($Vc = 150$ m/min ; $r = 1,2$ mm et $ap = 0,2$ mm). L'effort radial (Fr) augmente avec l'augmentation de l'avance et de l'angle de direction.

La valeur minimale de l'effort radial (Fr) est observée avec la plus basse avance par tour (0,08 mm/tr) et l'angle de direction de l'outil (45°).

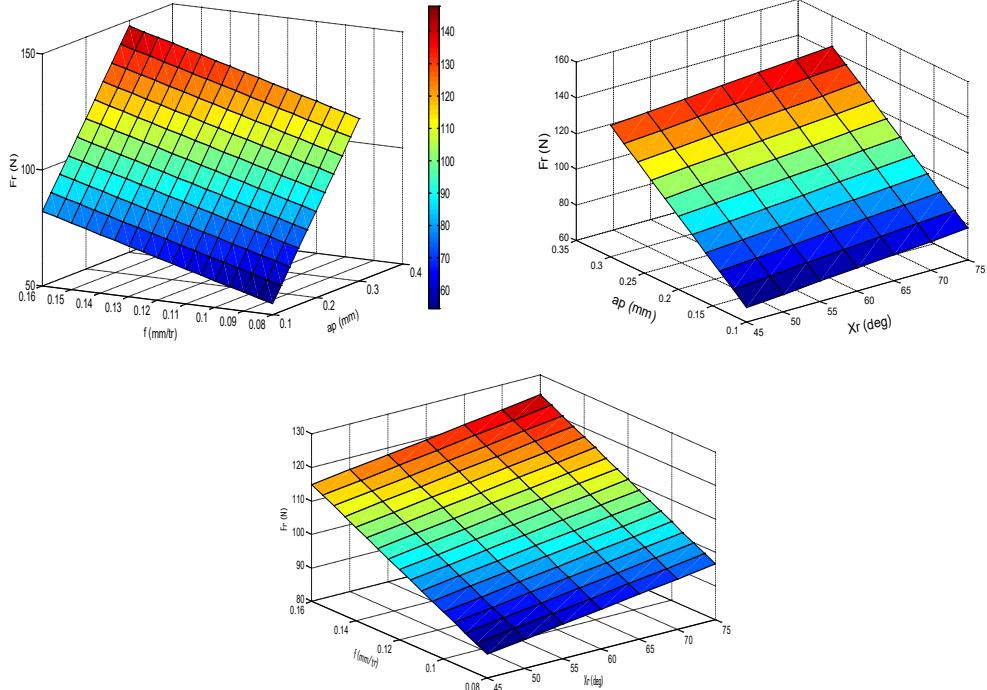


Fig. 2. Diagrammes des surfaces (3D) de Fr

L'analyse des diagrammes des surfaces (3D) de la figure 3 pour Ra montre la variation de la rugosité de la surface avec le rayon de l'outil et l'avance pour ($Vc = 150$ m/min ; $\chi_r = 45^\circ$ et $ap = 0,2$ mm). Dans cette figure, on observe que l'avance a un effet significatif sur la rugosité de la surface et sa pente est très élevée. On remarque aussi que la valeur de la rugosité de surface (Ra) diminue avec l'augmentation de rayon de l'outil et la diminution de l'avance par tour.

On remarque que pour ($Vc = 150$ m/min ; $f = 0,12$ mm/tr et $ap = 0,2$ mm), le rayon du bec de la plaquette a un impact plus significatif sur la rugosité de surface car sa pente est élevée. La rugosité de surface diminue avec l'augmentation du rayon de l'outil et la diminution de l'angle de direction principal.

Pour le régime de coupe ($Vc = 150$ m/min, $\chi_r = 45^\circ$ et $f = 0,12$ mm/tr) le rayon du bec de l'outil a un effet significatif sur la rugosité de surface. Comme il a été précédemment précisé, cette figure indique clairement qu'une meilleure

rugosité de surface peut être réalisée à n'importe quelle profondeur de passe (0,1-0,3 mm) et le plus grand rayon du bec de l'outil.

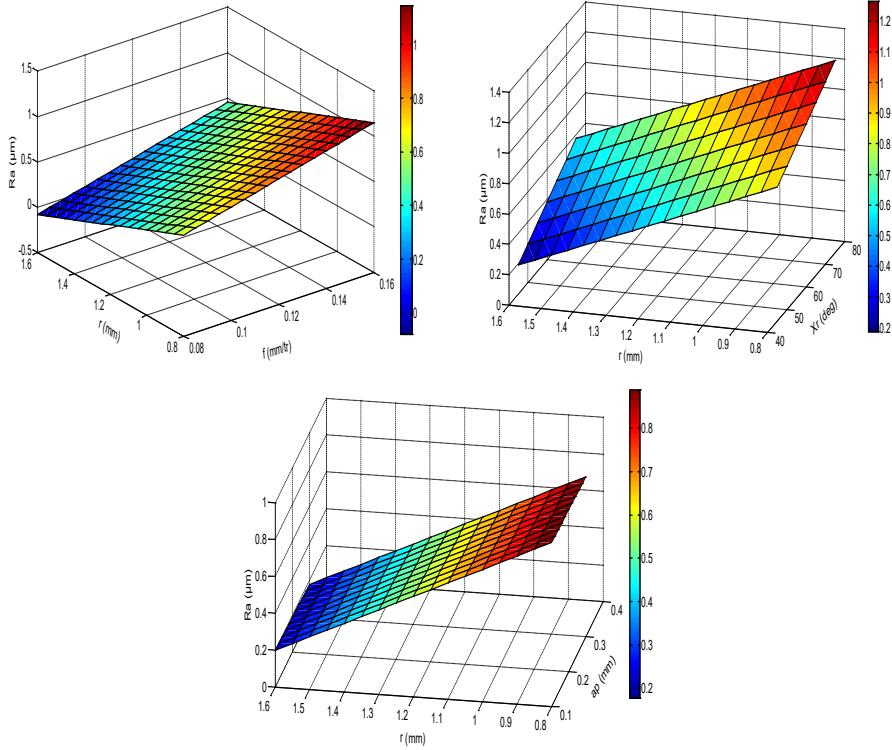


Fig. 3. Diagrammes des surfaces (3D) de R_a

3.6. Comparaison entre l'effort radial expérimental et prédict (estimé)

La comparaison entre les valeurs expérimentales de l'effort radial Fr et celles prédictes par le modèle pour le plan de Taguchi L_{18} de 18 essais obtenus par la méthodologie de surface de réponse, est présentée graphiquement dans la figure 4. Le pourcentage d'erreur est calculé de la façon suivante :

$$\% d'erreur = \frac{\text{valeur expérimentale} - \text{valeur prédictive}}{\text{valeur expérimentale}} \quad (3)$$

L'analyse des résultats montre que l'erreur minimale pour la composante Fr est de 1,25% enregistrée à l'essai N° 7. L'erreur maximale est de (-29,60%) enregistrée à l'essai N° 12. La figure 4 montre aussi que les valeurs expérimentales et estimées sont très proches. Donc, on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donnent des résultats fiables.

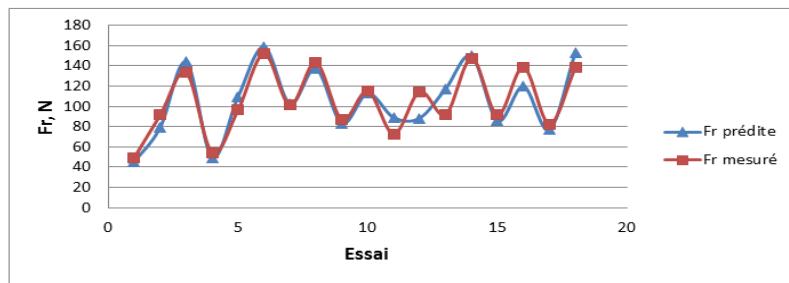


Fig. 4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédictes pour Fr

3.7. Comparaison entre Ra expérimentale et prédictive (estimée)

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédictes pour la rugosité Ra est présentée graphiquement dans la figure 5.

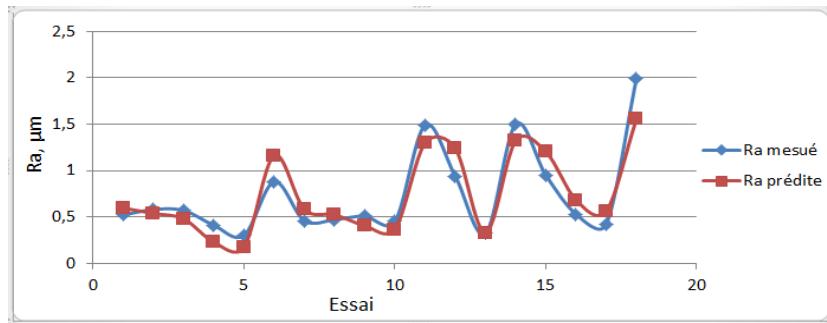
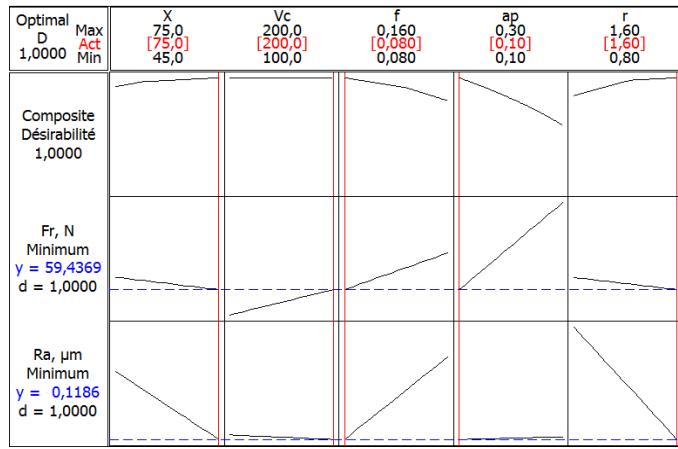


Fig. 5. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédictes pour Ra

L'analyse montre que l'erreur minimale est de -2,95%, elle est enregistrée à l'essai N°13, alors que l'erreur maximale est de 44,04 %, enregistrée à l'essai N°4. La figure 5 montre que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont proches. En effet, ces résultats prouvent la précision du modèle.

3.8. Optimisation du régime de coupe

Les résultats de l'optimisation par MSR de l'effort radial Fr et de la rugosité de surface Ra sont exposés dans la figure 6. Les paramètres de coupe optimaux obtenus sont : l'angle de direction $\chi_r = 75^\circ$, la vitesse de coupe de $Vc = 200$ m/min, l'avance $f = 0,08$ mm/tr, la profondeur de passe $ap = 0,1$ mm et le rayon du bec de l'outil de coupe $r = 1,6$ mm. L'effort radial et la rugosité de surface optimisés sont : $Fr = 59,4369$ N et $Ra = 0,1186$ µm.

Fig. 6. Régime de coupe optimal pour Fr et Ra

4. Analyse par la méthode de Taguchi

L'objectif dans l'analyse des résultats selon la méthode de Taguchi, est de minimiser le critère étudié, c'est-à-dire qu'il faut minimiser la rugosité de surface (Ra) et l'effort radial (Fr). Le but est donc d'obtenir le plus petit ratio Signal/Bruit (S/B) possible (plus petit c'est meilleur). Les valeurs de ces ratios Signal/Bruit (S/B) sont illustrées dans le tableau 4.

Tableau 4

Résultats expérimentaux de Fr et Ra et les ratios Signal/Bruit (S/B)

Ord	N° Exp	χr , deg	Vc , m/min	f , mm /tr	ap , mm	r , mm	Fr , N	S/B, dB	Ra , µm	S/B , dB
1	1	75	100	0,08	0,1	0,8	45,29	-33,1200	0,52	5,6799
2	4	75	100	0,12	0,2	1,2	79,27	-37,9822	0,58	4,7314
3	7	75	100	0,16	0,3	1,6	143,92	-43,1624	0,57	4,8825
4	5	75	150	0,08	0,1	1,2	49,54	-33,8991	0,41	7,7443
5	8	75	150	0,12	0,2	1,6	109,48	-40,7867	0,3	10,4576
6	2	75	150	0,16	0,3	0,8	158,81	-44,0176	0,88	1,1103
7	3	75	200	0,08	0,2	0,8	102,57	-40,2204	0,46	6,7448
8	6	75	200	0,12	0,3	1,2	137,26	-42,7509	0,47	6,5580
9	9	75	200	0,16	0,1	1,6	83,32	-38,4150	0,51	5,8486
10	10	45	100	0,08	0,3	1,6	112,86	-41,0508	0,45	6,9357
11	13	45	100	0,12	0,1	0,8	88,93	-38,9810	1,49	-3,4637
12	16	45	100	0,16	0,2	1,2	88,49	-38,9379	0,94	0,5374
13	11	45	150	0,08	0,2	1,6	117,45	-41,397	0,32	9,8970
14	14	45	150	0,12	0,3	0,8	149,83	-43,512	1,5	-3,5218

15	17	45	150	0,16	0,1	1,2	85,81	-38,671	0,95	0,4455
16	18	45	200	0,08	0,3	1,2	119,73	-41,564	0,53	5,5145
17	12	45	200	0,12	0,1	1,6	76,87	-37,715	0,42	7,5350
18	15	45	200	0,16	0,2	0,8	153,27	-43,939	1,99	-5,9771

4.1. Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios S/B des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des cinq principaux paramètres d'usinage (χ_r , Vc , f , ap et r). La moyenne des ratios S/B pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios S/B pour le même niveau du facteur divisé par le nombre des ratios pour le niveau du facteur [16, 17].

4.1.1. Analyse des effets principaux sur l'effort radial (Fr)

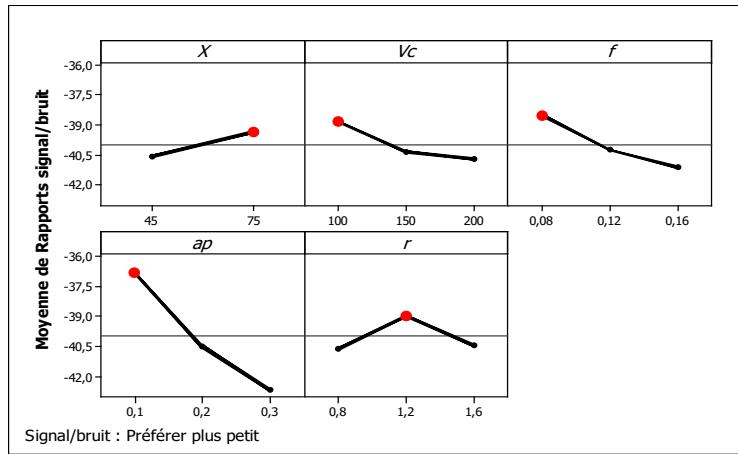
Du tableau 5 et de la figure 7, on remarque que les paramètres d'usinage (χ_r , Vc , f , ap et r) présentent des effets différents sur l'effort radial (Fr). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe (ap) avec un effet de 5,88 puis l'avance par tour avec un effet de 2,61. Les faibles influences sont celles des facteurs relatifs à la vitesse de coupe, au rayon de l'outil (r) et à l'angle de direction (χ_r) avec des effets de 1,86 ; 1,63 et 1,24 respectivement.

Tableau 5

Moyenne des ratios S/B (Fr) pour chaque niveau des facteurs

Symbole	Conditions de coupe	Moyenne Ratio S/B (Fr)			Max-Min (Δ)	Rang
		Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3		
χ_r	Angle de direction	-40,62	-39,37		1,24	5
Vc	Vitesse de coupe	-38,87	-40,38	-40,73	1,86	3
f	Avance	-38,54	-40,29	-41,15	2,61	2
ap	Profondeur de passe	-36,80	-40,51	-42,68	5,88	1
r	Rayon	-40,59	-38,97	-40,42	1,63	4

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fr) correspond aux niveaux $\chi_r 2 Vc 1 f 1 ap 1 r 2$. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de l'effort radial (Fr) sont donc l'angle de direction $\chi_r = 75^\circ$, la plus petite vitesse de coupe $Vc = 100$ m/min, la plus basse avance $f = 0,08$ mm/tr, la petite profondeur de passe, $ap = 0,1$ mm et le moyen rayon de la plaquette $r = 1,2$ mm.

Fig. 7. Graphique des effets principaux de χ_r , Vc , f , ap et r sur l'effort radial (Fr)

4.1.2. Analyse des effets principaux sur la rugosité surface (Ra)

Du tableau 6 et de la figure 8, il apparaît que les paramètres d'usinage (χ_r , Vc , f , ap et r) présentent des effets différents sur la rugosité de surface (Ra). La plus importante influence correspond au rayon de la plaquette avec un effet de 7,18814 à l'avance par tour avec un effet de 6,39704 et que l'angle de direction (χ_r) a la moindre importance avec un effet de 3,93620 puis la vitesse de coupe (Vc) avec un effet de 1,26071. La plus faible influence est celle du facteur relatif à la profondeur de passe, avec un effet de 0,94455 [18 et 19].

Tableau 6

Moyenne des ratios S/B (Ra) pour chaque niveau des facteurs

Symbole	Conditions de coupe	Moyenne Ratio S/B (Ra)			Max-Min (Δ)	Rang
		Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3		
χ_r	Angle de direction	2,06070	5,99690		3,93620	3
Vc	Vitesse de coupe	3,21722	4,39124	4,47794	1,26071	4
f	Avance	7,53826	3,40691	1,14123	6,39704	2
ap	Profondeur de passe	4,52444	3,98208	3,57988	0,94455	5
r	Rayon	0,09542	4,70742	7,28356	7,18814	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/ Bruit (S/B) représente la meilleure performance de la réponse (Ra) correspond aux niveaux $\chi_r 2 Vc 3 f 1 ap 1 r 3$ (les lettres représentent les paramètres d'usinage et les indices représentent les niveaux). Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (Ra) sont donc : le plus grand angle de direction, $\chi_r = 75^\circ$, la plus grande vitesse de coupe, $Vc = 200$ m/min, la plus basse

avance, $f = 0,08$ mm/tr, minimale profondeur de passe, $ap = 0,1$ mm et le grand rayon de l'outil $r = 1,6$ mm.

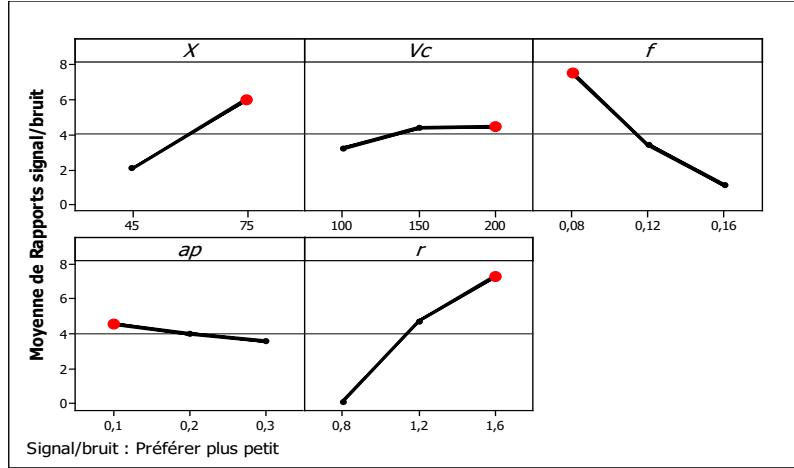


Fig. 8. Graphique des effets principaux de χ_r , Vc , f , ap et r sur ratio S/B (Ra)

4.2. Validation des résultats

L'équation de prédiction du ratio signal-bruit (S/B) prévu pour la condition optimale est obtenue en fonction des niveaux optimums des facteurs les plus significatifs. Le test de confirmation consiste à réaliser une expérience avec la condition optimale estimée, puis on calcule le ratio S/B du test de confirmation. Les résultats obtenus doivent être comparés à ceux prédits par l'équation 4.

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q \bar{\eta}_i - \eta_m \quad (4)$$

Où : $\hat{\eta}$: Valeur attendue de la réponse dans les conditions optimales

$\bar{\eta}_i$: Moyennes des observations quand les facteurs se trouvent dans les niveaux optimaux.

η_m : Moyenne de la somme de toutes les réponses des essais.

q : Nombre des facteurs significatifs.

Les valeurs des ratios signal-bruit (S/B) de l'effort radial (Fr) et la rugosité de surface (Ra) obtenues par les tests de confirmation sont montrées respectivement dans les tableaux 7 et 8.

L'erreur entre les valeurs des ratios signal-bruit (S/B) expérimentales et prévues pour l'effort radial (Fr) et la rugosité de surface (Ra) est égale à 1,28 et 1,494 respectivement.

L'amélioration des rapports signal-bruit (S/B) des conditions de coupes optimales prévues pour Fr et Ra sont de 6,473 et 6,272.

Tableau 7

Validation expérimentale pour Fr

Paramètres	Essai Initiale	Conditions Optimales	
		Estimées	Expérimentales
Niveau	$\chi_r 2Vc2f2ap2r2$	$\chi_r 2Vc1f1ap1r2$	$\chi_r 2Vc1f1ap1r2$
Effort de coupe	76,92	-----	36,51
Ratio S/B	-37,721	-32,52	-31,248
Amélioration du Ratio S/B	6,473		

Tableau 8

Validation expérimentale pour Ra

Paramètres	Essai Initial	Conditions Optimales	
		Estimées	Expérimentales
Niveau	$\chi_r 2Vc2f2ap2r2$	$\chi_r 2Vc3f1ap1r3$	$\chi_r 2Vc3f1ap1r3$
Rugosité de surface	0,35	-----	0,17
Ratio S/B	9,119	13,897	15,391
Amélioration du Ratio S/B	6,272		

5. Conclusions

Les résultats ont abouti aux conclusions suivantes :

- La profondeur de passe affecte l'effort radial Fr d'une manière considérable avec une contribution de 76,12% suivie de l'avance avec une contribution de 13,64%. Mais la vitesse de coupe, l'angle de direction et le rayon du bec de l'outil ont des faibles contributions.
- Le facteur le plus déterminant sur la rugosité Ra est le rayon du bec de l'outil (r) par une contribution de 46%, vient en deuxième position la vitesse d'avance (f) avec un taux de 27,77%, et l'angle de direction principale (χ_r) de 26,04%. Quant à l'effet de la vitesse de coupe (Vc) et de la profondeur de coupe (ap) sur la rugosité est faible.
- Le régime de coupe optimal été défini comme suit : l'angle de direction $\chi_r = 75^\circ$, la vitesse de coupe $Vc = 200$ m/min, l'avance $f = 0,08$ mm/tr, la profondeur de passe $ap = 0,1$ mm et le rayon du bec de l'outil de coupe $r = 1,6$ mm
- L'analyse des résultats montre que le modèle mathématique de Fr est le modèle le plus représentatif car son coefficient de détermination $R^2 = 85,65\%$, suivi par le modèle de Ra avec un $R^2 = 83,02\%$.

Selon l'approche de Taguchi:

- L'optimum de la réponse (Fr) correspond aux niveaux $\chi_r 2Vc1f1ap1r2$.

- L'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/ Bruit (S/B) représente la meilleure performance de la réponse (R_a) correspond aux niveaux $\chi_2Vc3f1ap1r3$.

B I B L I O G R A P H I Q U E S

- [1]. *V. Sivaraman & S. Prakash*, Optimization of cutting parameters in hard turning of AISI O1 steel using PVD TiAlN coated carbide insert. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), Vol. 10, Issue 1, p. 459–468 (2020).
- [2]. *M. Singh, G. Singh & A. Jayant*, Optimization of turning parameters of titanium chrome-molybdenum (Ti-Cr-Mo) alloy using Taguchi method. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 27, p. 776-782 (2020).
- [3]. *Y. Abidi, L. Boulanouar*, Analyse de la corrélation entre la rugosité et la vibration de coupe en usinage des aciers durs. U.P.B. Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, Vol. 79, Iss. 4, p. 157-170 (2017).
- [4]. *K. Safi, M.A. Yallese, S. Belhadi, S. Boutabba & T. Mabrouki*, Optimisation multi-objective des paramètres de coupe lors de l'usinage d'un acier pour travail à froid avec un carbure revêtu CVD (Al₂O₃/TiC/TiCN). U.P.B. Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, Vol. 83, Iss. 1, p. 149-168 (2021).
- [5]. *N.J. Rathod, M.K. Chopra, U.S. Vidhate, N.B. Gurule, U.V. Saindane*. Investigation on the turning process parameters for tool life and production time using Taguchi analysis. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.199>, (2021).
- [6]. *A. Cakan, F. Evrendilek*, Multivariate empirical modeling of interaction effects of machining variables on surface roughness in dry hard turning of AISI 4140 steel with coated CBN insert using Taguchi design. Mechanika, 23(5), 756-761, (2017).
- [7]. *Roshan R. Nikule*, Experimental investigation of turning process parameters of nimonic-80 using Taguchi's design of experiment. IJISRT, 2(4), (2017).
- [8]. *M. Ozdemir*, Optimization with Taguchi method of influences on surface roughness of cutting parameters in CNC turning processing. Mechanika, 25(5), 397-405, (2019).
- [9]. *Sandvik Coromant*, Catalogue général, Outils de coupe Sandvik Coromant, Tournage-Fraisage-Perçage-Alésage-Attachements, (2009).
- [10]. *P. Kumar and P. K. Karsh*, Fuzzy modeling of surface roughness during wet turning of AISI D3 tool steel. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1120 012026 (2021).
- [11]. *A. Tzotzis, C. García-Hernández, J-L. Huertas-Talón and P. Kyratsis*, Influence of the nose radius on the machining forces induced during AISI-4140 hard turning: A CAD-based and 3D FEM approach. Micromachines, 11 798, (2020).
- [12]. *R. Tiwari, N. Ghanghas*, Surface roughness analysis and green performance of suppliers through hybrid multi criteria decision-making. International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR), 5, 8, (2020).
- [13]. *M. M. Reddy, N. S. Reddy and J. N. Evan*, Experimental evaluation in dry machining of inconel 718 using coated carbides. Journal of Engineering Research and Reports, 18(4): 1-11, (2020).
- [14]. *N. Manikanda Prabu, P. Maniarasan, S. Nallusamy and S. Jeevanantham*, Influence of boron nitride nano additives in cutting fluid for improving surface roughness with MRR. Int. J. Nanomanufacturing, Vol. 16, No. 1, (2020).
- [15]. *Matheus S. Polly, Amália Mayrhofer André J. Souza*, Performance of ISO P and ISO S carbide tools in hard turning of AISI 4140 under dry and MQL conditions. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, vol. 28, Nº 1, p. 95-105 (2020).
- [16]. *O. Luyen, A. Sahinoglu, M. Ozdemir, V. Yilmaz*, Optimization of the Effect of Cutting Parameters on the Cutting Force in the Gradual Turning Process by Taguchi Method. Mechanical Engineering, vol. 10, Nº3, (2020).
- [17]. *A. Mohd Asyraf Mahboob & A. Azwan Iskandar & K. Ahmad Nabil Mohd & L. Kean Wei* Experimental study on minimal nanolubrication with surfactant in the turning of titanium alloys Int J Adv Manuf Technol vol 92, p 117–127(2017)
- [18]. *S. Bhattacharya, P.P. Das, P. Chaterjee and S. Chakraborty*. Prediction of Reponses in a Sustainable Dry Turning Operation: A Comparative Analysis. Hindawi, Mathematical Problems in Engineering, (2021).
- [19]. *S.S. Sarjanaa , I. Bencheikhb , M. Nouarib, A. Gintinga*, Study on cutting performance of cermet tool in turning of hardened alloy steel, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials Vol 91, 105255, (2020).