

OPTIMISATION MONO ET MULTI-OBJECTIF DE L'USINAGE DU POLYAMIDE (PA66-GF30%) EN UTILISANT LA METHODE TAGUCHI-DEAR BASEE SUR LE RAPPORT SIGNAL/BRUIT

Sabrina HAOUES¹, Mohamed Athmane YALLESE¹, Salim BELHADI¹, Alper UYSAL² & Salim CHHAOUI¹

Les matériaux composites à base polymérique, sont de plus en plus utilisés dans de nombreuses applications de l'ingénierie en raison de leur rentabilité, durabilité, faible poids, bonnes propriétés mécaniques. Dans ce travail, des essais d'usinage ont été réalisés suivant le plan de Taguchi (L_9), lors du tournage à sec du polyamide composite (PA66-GF30%). Le but est de réaliser une étude d'optimisation mono et multi-objectif des facteurs (V_c , f et a_p) en utilisant l'analyse de Taguchi et la méthode DEAR. L'objectif est de minimiser les paramètres de performance tels que ; (R_a , P_c et F_z) et maximiser le (DCE).

Mots clés : PA66-GF30%, tournage, optimisation, Taguchi, DEAR.

1. Introduction

Les composites à matrice polyamides avec renforcement fibreux en verre (GF30%) sont des matériaux thermoplastiques largement utilisés dans divers domaines de l'ingénierie telle que : l'aéronautique, la robotique, la sécurité et l'automobile, en raison de leurs bonnes propriétés [1-2]. Les fibres de verre sont ajoutées aux polymères non renforcés pour améliorer les propriétés mécaniques et thermiques [3-4]. Le polyamide renforcé en fibres de verre 30% présente des difficultés lors de l'usinage à cause de ses caractéristiques distinguées comme le faible module d'élasticité, le taux d'absorption d'humidité et le coefficient de dilatation thermique élevé [5].

L'usinage du polyamide PA66-GF30% a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Parmi eux, V.N Gaitoude et al [6] ont étudié l'effet de condition de coupes (V_c et f) sur les paramètres de performances (R_a , F_c et P_c) lors du micro tournage de PA66-GF30% en utilisant un outil de coupe (PCD). J. Paulo Davim et al [7] ont comparé l'usinabilité du polyamide PA 66 avec et sans renforcement de fibres de verre lors du tournage en utilisant quatre outils de coupe (CVDD, PCD,

¹ Département de Génie Mécanique, Université 8 mai 1945, Guelma, Algérie.

E-mail : haouessabrina40@gmail.com

² Université technique de Yildiz, Département de génie mécanique, Beşiktaş, Istanbul, 34349, Turquie. E-mail : auysal@yildiz.edu.tr

K15, K15-KF). Les effets des paramètres du processus (vitesse de coupe et avance par tour) sur les caractéristiques d'usinabilité (critère de rugosité, efforts de coupe et effort spécifique) ont été étudiés. Y.H çelik et al [8], V.N Gaitoude et al [9] ont appliqué l'approche de Taguchi afin de déterminer le régime de coupe optimal de chaque réponse lors du tournage de GFRP.

La méthode DEAR (classification basée sur l'analyse d'enveloppe de donnée) compte parmi les méthodes d'optimisation appliquée dans plusieurs domaines des sciences et particulièrement de la fabrication mécanique. Cette technique a prouvé son efficacité dans la détermination des conditions de coupe optimales en usinage [10-11]. T.Muthuramalingam et al [12] ont appliqué la méthode (Taguchi -DEAR) lors l'usinage par jet d'eau d'un alliage de titane, afin d'obtenir une combinaison optimale des facteurs opératoires de coupe sur les paramètres (Ra et MRR). Dans les années récemment les auteurs PH, Nguyen Huu et al, et V, Vikram Reddy [13,14], ont réalisé des travaux sur l'usinage par l'électroérosion, afin de résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectifs en utilisant la méthode DEAR.

L'examen de la littérature montre que très peu de recherche ont été réalisées en utilisant l'analyse de Taguchi basée sur le rapport (Signal/bruit), couplée avec la méthode DEAR lors d'usinage du PA66-GF30% et en examinant plusieurs paramètres technologiques de sortie en même temps. Le but de ce travail est de proposer une optimisation Mono et multi-objectifs afin de maximiser la productivité et de minimiser la consommation d'énergie, l'effort de coupe et la rugosité de surface lors tournage du polyamide composite PA66-GF30%.

2. Procédure expérimentale

Le polymère utilisé dans cette étude est le polyamide renforcé de 30% en fibres de verre (PA66-GF30%) sous forme d'une barre pleine avec les dimensions suivantes : $\varnothing = 80$ (mm), $L = 280$ (mm). Les propriétés mécaniques et thermiques de ce matériau sont indiquées dans le tableau 1 [15]. Les essais d'usinage ont été réalisés à sec sur un tour modèle (SN40C) avec une puissance ($P_m = 6$ kW). Les plaquettes utilisées pour l'usinage sont en carbure métallique avec la désignation SPGR 12 03 08, elles sont fixées sur un porte-outil du type SDPN 25 25 M12.

Tableau 1

Propriétés mécaniques et thermiques du polyamide PA66 GF30

Propriétés	Valeurs
Densité	1,35 g/cm ³
Plage Allongement à la rupture en traction	8 %
Dureté : encoche à la bille H358/30	240 N / mm ²
Module d'élasticité en traction	4 800 N / mm ²
Température de fusion	+ 255 °C
Conductivité thermique	0,27 W / (m · K)
Plage de température d'utilisation	-30 à +150 °C

Un dynamomètre Kistler (9257B) a été utilisé pour mesurer l'effort de coupe tangentiel (F_z). Pour la mesure du critère de rugosité de surface moyenne arithmétique (R_a), un rugosimètre du type MITUTOYO (SJ-210) a été utilisé. La mesure de (R_a) a été répétée trois fois suivant un angle de rotation de l'éprouvette de 120° et la moyenne des trois mesures a été retenue. La puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau enlevé (DCE) ont été calculés respectivement à partir des équations (1) et (2).

$$P_c(W) = \frac{F_z(N) \cdot V_c(m/min)}{60} \quad (1)$$

$$DCE \left(\frac{cm^3}{min} \right) = V_c \left(\frac{m}{min} \right) \times f \left(\frac{mm}{tr} \right) \times ap(mm) \quad (2)$$

Dans cette étude, le plan orthogonal de Taguchi L_9 (3^3) a été adopté afin de minimiser le nombre des essais d'usinage. Les paramètres d'entrée et leurs niveaux sont les suivants : V_c = (80, 115 et 206) m/min, f = (0.08, 0.12 et 0.16) mm/tr et ap = (0.5, 1 et 2) mm.

3. Résultats et discussion

3.1 Résultats des essais expérimentaux

Le tableau 2 présente les résultats expérimentaux de (R_a), (F_z), (P_c) et (DCE), correspondant aux différentes combinaisons des paramètres de coupe (V_c , f et ap) suivant le plan de Taguchi L_9 . On remarque que la rugosité (R_a) varie de (1.24 à 2.07) μm , l'effort (F_z) varie de (16.48 à 65.76) N, (P_c) varie de (21.973 à 122.021) W et le (DCE) varie de (3.20 à 32.96) cm^3/min .

Tableau 2

Résultats des essais expérimentaux

N°	Facteurs d'entrée			Réponses			
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	R_a (μm)	F_z (N)	P_c (W)	DCE (cm^3/min)
1	80	0.08	0.5	1.4	16.48	21.973	3.20
2	80	0.12	1	1.69	33.92	45.227	9.60
3	80	0.16	2	2.07	65.76	87.680	25.60
4	115	0.08	1	1.41	30.62	58.688	9.20
5	115	0.12	2	1.56	58.06	111.282	27.60
6	115	0.16	0.5	1.78	26.66	51.098	9.20
7	206	0.08	2	1.24	35.37	121.437	32.96
8	206	0.12	0.5	1.27	20.18	69.285	12.36
9	206	0.16	1	1.56	35.54	122.021	32.96

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques [16-17]. Elle permet le choix

des conditions de coupe optimales afin de satisfaire l'objectif désiré. Cela induit un impact direct sur la productivité, la qualité et le coût d'un produit [18-19].

Dans ce travail, deux méthodes d'optimisation ont été proposées. La méthode de Taguchi pour l'optimisation mono-objectif des paramètres de sortie et la méthode DEAR pour l'optimisation multi-objectif en se basant sur le rapport signal-bruit (S/N).

3.2. Optimisation mono objective de Taguchi

La méthode d'optimisation mono-objective de Taguchi est basée sur le rapport signal/bruit (S/N) qui est utilisé pour analyser les résultats de l'expérience. Ici, (S) est le facteur de signal qui indique la valeur réelle du système et (N) est le facteur de bruit qui montre un facteur non inclus dans la conception de l'expérience [20-21-22]. Le rapport (S/N) est calculé par les équations (3 et 4) selon les objectifs souhaités, « le plus grand est le meilleur » et « le plus petit est le meilleur » respectivement.

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

Où n : Le nombre des essais ; y_i : Les données observées, Avec : $i = 1, 2, \dots, n$

Dans notre cas, le logiciel Minitab17 a été utilisé pour l'optimisation mono-objective. L'équation (4) a été utilisée pour le calcul de rapport (S/N) afin de minimiser les paramètres de sortie (Ra , Fz et Pc) individuellement, tandis que l'équation (3) a été utilisée pour maximiser le (DCE). Les résultats des calculs sont indiqués dans le Tableau 3.

Tableau 3

Résultats du rapport (S/N) pour (Ra , Fz , Pc et DCE)

N°	Résultats (S/N)			
	Ra (dB)	Fz (dB)	Pc (dB)	DCE (dB)
1	-2.92	-24.3391	-26.84	10.1
2	-4.56	-30.6091	-33.11	19.65
3	-6.32	-36.3592	-38.86	28.17
4	-2.98	-29.7201	-35.37	19.28
5	-3.86	-35.2775	-40.93	28.81
6	-5.01	-28.5172	-34.17	19.28
7	-1.87	-30.9727	-41.69	30.36
8	-2.08	-26.0984	-36.81	21.84
9	-3.86	-31.0143	-41.73	30.36

Le tableau 4 et la figure 1 (a, b, c et d), résument les résultats de l'optimisation mono-objectif basés sur le rapport (S/N) et les valeurs de delta (Δ) de chaque niveau qui représente la différence entre les valeurs les plus élevées et les plus faibles ($\Delta = \text{max-min}$) pour les paramètres de sortie (Ra , Fz , Pc et DCE). Pour la rugosité (Ra), le régime optimal est (V_{c3} , f_1 et ap_1), ce qui coïncide avec la plus grande vitesse de coupe ($V_c = 206$ m/min), l'avance la plus petite ($f = 0.08$ mm/tr) et une profondeur de passe ($ap = 0.5$ mm). De la même manière, le régime optimal pour l'effort (Fz) est obtenu avec les niveaux des paramètres de coupe ($V_{c3} = 206$ m/min, $f_1 = 0.08$ mm/tr et $ap_1 = 0.5$ mm). Quant aux conditions optimales pour minimiser la puissance de coupe (Pc), elles sont données par la combinaison des niveaux (V_{c1} , f_1 , ap_1), qui correspond à ($V_c = 80$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $ap = 0.5$ mm). Enfin, le régime optimal sélectionné afin de maximiser le débit de copeau enlevé (DCE), il est donné par la combinaison (V_{c3} , f_3 , ap_3), qui correspond aux valeurs les plus élevées des paramètres de coupe ($V_c = 206$ m/min, $f = 0.16$ mm/tr, et $ap = 2$ mm). Les régimes optimaux pour chaque objectif ont été mis en évidence par des points verts dans la figure 1.

Tableau 4

Réponses de (S/N) pour (Ra, Fz, Pc et DCE)					
Combinaisons	Niveaux			Delta (Δ)	Rang
	1	2	3		
Ra					
Vc	-4.600	-3.952	-2.602	1.998	2
f	-2.592	-3.499	-5.063	2.472	1
ap	-3.336	-3.802	-4.017	0.681	3
Fz					
Vc	-30.44	-31.17	-29.36	1.81	3
f	-28.34	-30.66	-31.96	3.62	2
ap	-26.32	-30.45	-34.20	7.88	1
Pc					
Vc	-32.93	-36.82	-40.08	7.14	2
f	-34.63	-36.95	-40.49	3.62	3
ap	-32.61	-36.74	-40.49	7.89	1
DCE					
Vc	19.30	22.46	27.52	8.22	2
f	19.91	23.43	25.93	6.02	3
ap	17.07	23.09	29.11	12.04	1

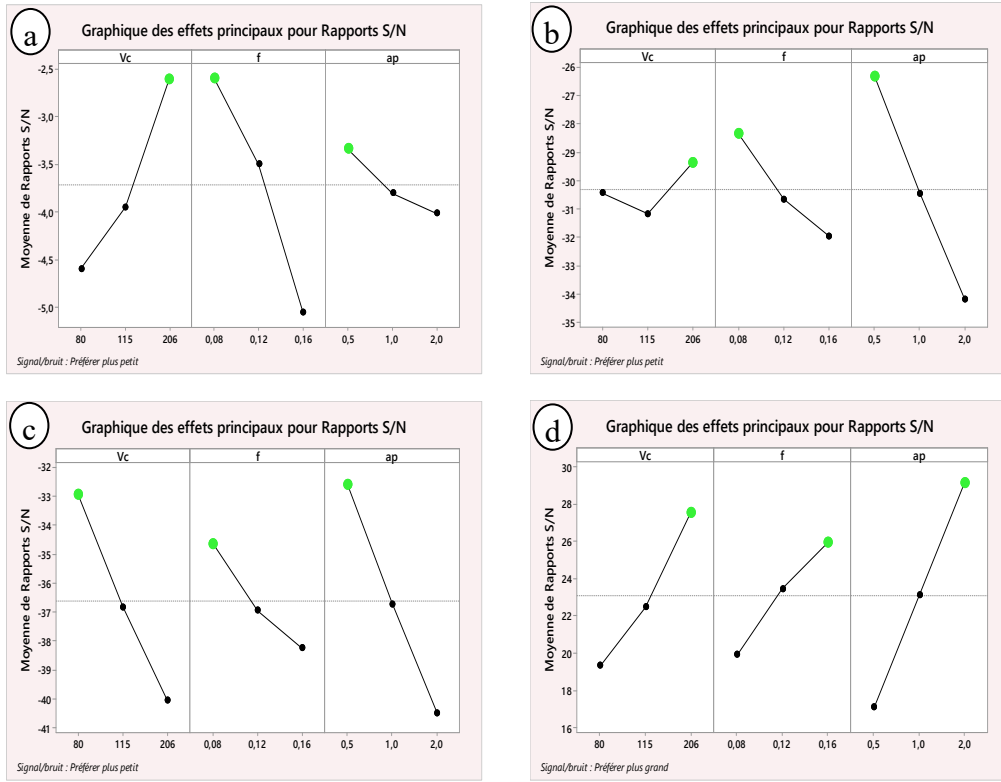


Fig. 1. Graphiques des effets principaux pour S/N de : a) *Ra*, b) *Fz*, c) *Pc* et d) *DCE*

Le tableau 5 récapitule les combinaisons optimales trouvées ainsi que les valeurs des réponses correspondantes. Les valeurs P du S/N des différents paramètres ont été prédites par l'équation 5 [23].

$$P = M_G + \sum_{j=1}^n [(M_{ij}) - M_G] \quad (5)$$

Où

M_G : moyen général pour chacun des paramètres de sortie,

M_{ij} : moyenne de la réponse au niveau optimal,

n : nombre de paramètres d'usinage. Dans ce cas, $n=3$ (*Vc*, *f* et *ap*).

À partir des valeurs du S/N prédites (P), les valeurs réelles (V_r) des différentes réponses (*Ra*, *Fz*, *Pc* et *DCE*) ont été obtenues par les équations (6) et (7), pour le cas de minimisation et maximisation, respectivement.

$$Vr = \sqrt{10^{\left(\frac{-P}{10}\right)}} \quad (6)$$

$$Vr = \frac{1}{\sqrt{10^{\left(\frac{-P}{10}\right)}}} \quad (7)$$

On remarque, que les régimes optimaux trouvés pour les paramètres technologiques (Ra et Fz) ne figurent pas au tableau 2, par contre le régime optimal pour (Pc) ($Vc_1-f_1-ap_1$) existe et le paramètre (DCE) est calculé. À cet effet, des tests de confirmation avec le régime optimal ($Vc_3-f_1-ap_1$) afin de trouver les résultats expérimentaux de (Ra et Fz) ont été réalisés et comparés avec les valeurs prédites et l'erreur relative a été calculée. Tous les résultats sont consignés au tableau 5.

Tableau 5

Récapitulative des régimes optimaux trouvés par la méthode de Taguchi

Objectifs	Combinaisons optimales	Valeurs correspondantes			Réponses réelles	Résultats Expérimentaux de confirmation	Erreur %
Minimisation de Ra	$Vc_3-f_1-ap_1$	206	0.08	0.5	1.134	1,119	1,3404
Minimisation de Fz	$Vc_3-f_1-ap_1$	206	0.08	0.5	14.753	14,73	0,156
Minimisation de Pc	$Vc_1-f_1-ap_1$	80	0.08	0.5	22.26	Existe au tableau 2	/
Maximisation de DCE	$Vc_3-f_3-ap_3$	206	0.16	2	65.92	Calculé	/

3.3. Méthode de classification basée sur l'analyse d'enveloppe de données (DEAR)

La méthode (DEAR) utilisée dans ce cas, est une approche d'optimisation multi-objectif des paramètres de sortie simultanément. Elle a été couplée avec la méthode de Taguchi en se basant sur le rapport (S/N) pour trouver la combinaison optimale des conditions de coupe lors de l'usinage du polyamide PA66-GF30%, en utilisant l'indice de performance à réponse multiple (MRPI) [24]. Les étapes de la méthode DEAR sont exposées dans la figure 2.

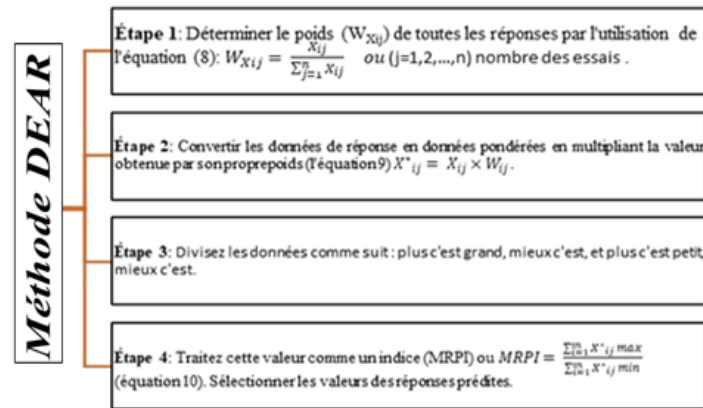


Fig.2. Etapes de la méthode DEAR

Dans ce travail, deux cas d'optimisation multi-objectifs ont été traités. Le 1^{er} cas consiste à l'amélioration de la qualité de surface par la minimisation de (Ra) ainsi que minimiser la consommation de l'énergie par la réduction de (Fz et Pc), tandis que le 2^{ème} cas est consacré à l'optimisation combinée, entre la minimisation des paramètres de sortie (Ra , Fz et Pc) et la maximisation de productivité (DCE). Selon la méthode de Taguchi, afin de trouver les paramètres d'usinage optimaux, le rapport (S/N) de chaque niveau de paramètre d'usinage doit être évalué pour chaque paramètre de sortie. Le S/N le plus élevé des niveaux de paramètres d'usinage considérés indique un niveau optimal. A partir des résultats du rapport signal/bruit (S/N) présentés dans tableau 3, le poids (W_{xij}) et le ($MRPI$) de chaque expérience ont été calculés suivant les équations (8 à 10) de la figure 2, leurs valeurs sont consignées dans le tableau 6.

Tableau 6

Poids et MRPI de chaque expérience pour les deux cas d'optimisation

N°	Poids				MRPI	
	Ra	Fz	Pc	DCE	1 ^{er} cas	2 ^{ème} cas
1	0.087	0.090	0.081	0.049	-4.612	-4.121
2	0.136	0.112	0.100	0.095	-7.381	-5.524
3	0.189	0.133	0.118	0.136	-10.620	-6.803
4	0.089	0.109	0.107	0.093	-7.300	-5.512
5	0.115	0.129	0.124	0.139	-10.090	-6.094
6	0.150	0.104	0.104	0.093	-7.273	-5.485
7	0.056	0.113	0.127	0.146	-8.894	-4.459
8	0.062	0.096	0.112	0.105	-6.737	-4.442
9	0.115	0.114	0.127	0.146	-9.255	-4.820

En appliquant l'analyse de Taguchi sur les résultats de l'indice (MRPI) (tableau 6), les régimes de coupe optimaux (pour les deux cas d'optimisation), sont présentés dans le tableau 7. D'après ce tableau, l'analyse des résultats du 1^{er}

cas de l'optimisation qui concerne la minimisation de (Ra , Fz et Pc), donne le régime optimal suivant : $Vc= 80$ (m/min), $f= 0.08$ (mm/tr), $ap= 0.5$ (mm) respectivement, ce qui correspond aux paramètres de sortie optimisés suivants : $Ra= 1.4$ (μm), $Fz= 16.480$ (N) et $Pc= 21.97$ (W). Aussi, le régime optimal obtenue par la méthode DEAR pour le 2^{ème} cas, qui concerne la minimisation de (Ra , Fz et Pc) ainsi que la maximisation de (DCE) simultanément se présente comme suit : $Vc= 206$ (m/min), $f= 0.08$ (mm/tr) et $ap= 0.5$ (mm), ce qui permet d'aboutir aux paramètres de sortie suivants : $Ra= 1.134$ (μm), $Fz= 14.753$ (N), $Pc= 50.653$ (W) et $DCE= 8.240$ (cm^3/min). Les régimes optimaux pour l'indice (MRPI) ont été mis en évidence par des points verts dans la figure 3.

Puisque, les réponses de ce régime optimal trouvé ne figurent dans le tableau 3. Pour cela, l'application de l'équation de prédiction (équation 5) est utilisée afin de trouver les réponses prédites.

D'après les résultats de l'optimisation pour les deux cas, on constate que l'avance (f) et (ap) restent les mêmes mais (Vc) varie. En effet, on remarque que dans le cas où le (DCE) n'est pas pris en considération, (Vc) est limitée à 80 (m/min), ce régime conduit à un faible effort de coupe et une consommation d'énergie faible. Lorsque le (DCE) est considéré dans l'optimisation, (Vc) passe à une valeur de 206 (m/min), cela conduit à une faible rugosité et un faible effort de coupe par contre (Pc) est à un niveau élevé.

Le tableau 8 résume les combinaisons optimales trouvées ainsi que les valeurs des sorties réelles pour les deux cas d'optimisation multi-objectifs. Notons ici, que les valeurs des indices (MRPI) calculées selon l'équation de prédiction (5), sont plus grandes par rapport aux valeurs présentées dans le tableau 6. Concernant le 1^{er} cas d'optimisation avec la méthode (DEAR), le régime de coupe trouvé ($Vc=80$ m/min, $f= 0,08$ mm/tr et $ap= 0,5$ mm) existe parmi les essais réalisés, (tableau 2 ; Essai 1). Par contre, le régime de coupe trouvé pour le 2^{ème} cas ($Vc= 206$ m/min, $f= 0,08$ mm/tr et $ap= 0,5$ mm) n'existe pas dans le tableau 2. Pour cela, trois essais expérimentaux ont été réalisés et la moyenne des résultats est retenue, afin de calculer les erreurs relatives entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Ra , Fz et Pc). Le tableau 9 présente les résultats trouvés pour (Ra , Fz et Pc) et les erreurs calculées sont (1,3404%, 0.156% et 0.158%) respectivement. On peut clairement voir que l'erreur calculée est très faible.

Tableau 7

Réponses pour les valeurs totales de L'MRPI

Cas		Niveaux			Delta	Rang
		1	2	3		
1 ^{er} cas	Vc	-7.538	-8.221	-8.295	0.758	3
	f	-6.935	-8.069	-9.049	2.114	2
	ap	-6.207	-7.978	-9.868	3.661	1
2 ^{ème} cas	Vc	-5.483	-5.697	-4.574	1.123	1
	f	-4.697	-5.353	-5.703	1.006	3
	ap	-4.683	-5.285	-5.785	1.103	2

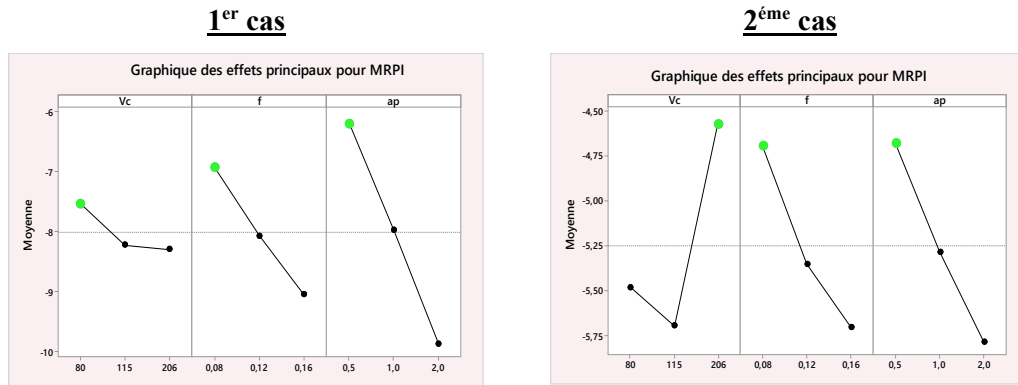


Fig. 3. Graphiques des effets principaux pour les deux cas de MRPI

Tableau 8

Récapitulative des régimes optimaux et l'indice (MRPI)

Cas	Combinaisons optimales			Valeurs correspondantes			Réponses réelles				MRPI
							Ra	Fz	Pc	DCE	
1 ^{er}	Vc ₁	f ₁	ap ₁	80	0.08	0.5	1.4	16.480	21.97	-	-4.12
2 ^{ème}	Vc ₃	f ₁	ap ₁	206	0.08	0.5	1.134	14.753	50.653	8.240	-3.45

Tableau 9

Résultats du test de confirmation

Cas	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Résultats Expérimental	Résultats prédits	Erreur %
Ra						
2 ^{ème}	206	0,08	0,5	1,119	1,134	1,3404
Fz						
2 ^{ème}	206	0,08	0,5	14,73	14,753	0,156
Pc						
2 ^{ème}	206	0,08	0,5	50,573	50.653	0.158

4. Conclusions

Cette étude concerne l'usinage du polyamide renforcé en fibre de verre 30% (PA66 GF30) lors de tournage à sec en utilisant un outil en carbure métallique. Deux méthodes d'optimisation (Taguchi et DEAR) ont été appliquées afin de déterminer les conditions de coupe optimales. Les résultats de l'optimisation mono-objective de Taguchi basée sur le rapport (S/N) pour réduire chacun des

paramètres (Ra), (Fz) et (Pc), sont : ($Vc= 206$ m/min, $f= 0,08$ mm/tr et $ap= 0,5$ mm) ; ($Vc= 206$ m/min, $f= 0,08$ mm/tr et $ap= 0,5$ mm) ; ($Vc= 80$ m/min, $f= 0,08$ mm/tr et $ap= 0,5$ mm) respectivement. La combinaison optimale pour la maximisation du DCE est : ($Vc= 206$ m/min, $f= 0,16$ mm/tr et $ap= 2$ mm).

L'optimisation multi-objective en utilisant la méthode DEAR a été appliquée avec succès suivant deux cas souhaités. Le régime de coupe pour le 1^{er} cas concernant la minimisation de (Ra , Fz et Pc) est : ($Vc= 80$ m/min, $f= 0,08$ mm/tr, $ap= 0,5$ mm). Par contre, pour le 2^{ème} cas, qui s'intéresse à la minimisation de (Ra , Fz et Pc) avec la maximisation du DCE en même temps est : ($Vc= 206$ m/min, $f= 0,08$ mm/tr et $ap= 0,5$ mm). Les essais de confirmation avec le régime optimal trouvé pour le 2^{ème} cas montrent que les erreurs relatives sont de (1,3404%, 0,156% et 0.158%) pour (Ra , Fz et Pc) respectivement. Les méthodes d'optimisation mono et multi-objectives proposées dans cette étude peuvent être appliquées facilement pour d'autres matériaux et dans des conditions de coupe différentes. Contrairement aux méthodes heuristiques, ces méthodes appliquées n'ont pas besoin d'un modèle mathématique pour l'optimisation des conditions de coupe, il suffit seulement d'un plan d'expérience.

REFERENCES

- [1]. Çelik, Yahya Hışman et Türkan, Cihat. Investigation of mechanical characteristics of GFRP composites produced from chopped glass fiber and application of Taguchi methods to turning operations. SN Applied Sciences, 2020, vol. 2, no 5, p. 1-12.
- [2]. Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Rubio, Juan Carlos Campos, et al. Experimental studies on hole quality and machinability characteristics in drilling of unreinforced and reinforced polyamides. Journal of Composite Materials, 2014, vol. 48, no 1, p. 21-36.
- [3]. Ryu, J. B. et Lyu, M.-Y. A study on the mechanical property and 3D fiber distribution in injection molded glass fiber reinforced PA66. International Polymer Processing, 2014, vol. 29, no 3, p. 389-40.
- [4]. Tang, Wei, Cao, Yanfang, Qian, Lijun, et al. Synergistic Charring Flame-Retardant Behavior of Polyimide and Melamine Polyphosphate in Glass Fiber-Reinforced Polyamide 66. Polymers, 2019, vol. 11, no 11, p. 1851.
- [5]. Caggiano, Alessandra. Machining of fiber reinforced plastic composite materials. Materials, 2018, vol. 11, no 3, p. 442.
- [6]. Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Silva, L. R., et al. Machinability study in microturning of PA66 GF30 polyamide with a PCD tool. Materials and Manufacturing Processes, 2009, vol. 24, no 12, p. 1290-1296.
- [7]. Davim, J. Paulo, Silva, Leonardo R., Festas, António, et al. Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing. Materials & Design, 2009, vol. 30, no 2, p. 228-234.
- [8]. Çelik, Yahya Hışman et Türkan, Cihat. Investigation of mechanical characteristics of GFRP composites produced from chopped glass fiber and application of Taguchi methods to turning operations. SN Applied Sciences, 2020, vol. 2, no 5, p. 1-12.
- [9]. Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Mata, Francisco, et al. Taguchi approach for achieving better machinability in unreinforced and reinforced polyamides. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2008, vol. 27, no 9, p. 909-924.

- [10]. *Do Duc, Trung, Nguyen, Nhu-Tung, Tien, Dung Hoang, et al.* A Research on Multi-Objective Optimization of the Grinding Process Using Segmented Grinding Wheel by Taguchi-DEAR Method. *EUREKA: Physics and Engineering*, (1), 2021, p. 67-77.
- [11]. *Hong, S. Nguyen et Vo Thi Nhu, U.* Multi-objective Optimization in Turning Operation of AISI 1055 Steel Using DEAR Method. *Tribology in Industry*, 2021, vol. **43**, no 1.
- [12]. *Muthuramalingam, T., vasanth, S., Vinothkumar, P., et al.* Multi criteria decision making of abrasive flow oriented process parameters in abrasive water jet machining using Taguchi-DEAR methodology. *Silicon*, 2018, vol. **10**, no 5, p. 2015-2021.
- [13]. *Vaddi, Vikram Reddy, CH, Sridhar Reddy, Pogaku, Vamshi Krishna, et al.* Optimization of electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4 V) using Taguchi-DEAR method. *SAE Technical Paper*, 2018.
- [14]. *Phan, Nguyen Huu et Muthuramalingam, T.* Multi criteria decision making of vibration assisted EDM process parameters on machining silicon steel using Taguchi-DEAR methodology. *Silicon*, 2021, vol. **13**, no 6, p. 1879-1885.
- [15]. https://groupe.mb.scene7.com/is/content/groupe/mb/ft_EURO76_FTP14_PA6.6_GF30.pdf
- [16]. *Tyagi, Mohit, Sachdeva, Anish, et Sharma, Vishal.* Optimization Methods in Engineering: Select Proceedings of CPIE 2019. Springer, 2020.
- [17]. *Wan, Renxia, Zhu, Lijun, Liu, Kai, et al.* Particle SWARM optimization based on weighted aggregation degree and adaptive decision. *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin-Series A-Applied mathematics and Physics*, 2020, vol. **82**, no 1.
- [18]. *Safi, Khaoula, Yallese, Mohammed A., Belhadi, Salim, et al.* 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. Sci. Bull., Series D*, 2021, Vol. **83**, Iss. 1.
- [19]. *Chihaoui, Salim, Yallese, Mohamed Athmane, BELHADI, Salim, et al.* Coated CBN cutting tool performance in green turning of gray cast iron EN-GJL-250: modeling and optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. **113**, no 11, p. 3643-3665.
- [20]. *Belhadi, S., Kaddeche, M., Chaoui, K., et al.* Machining optimization of HDPE pipe using the Taguchi method and Grey relational analysis. *International Polymer Processing*, 2016, vol. **31**, no 4, p. 491-502.
- [21]. *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.
- [22]. *Liao, Hung-Chang et Chen, Yan-Kwang.* Optimizing multi-response problem in the Taguchi method by DEA based ranking method. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2002.
- [23]. *Tran, Quang-Phuoc, Huang, Shyh-Chour, et al.* Multi-objective optimization of carbon fiber-reinforced polymer drilling process based on grey fuzzy reasoning grade analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, p. 1-11.
- [24]. *Chate, Ganesh R., GC, Manjunath Patel, Harsha, H. M., et al.* Sustainable machining: Modelling and optimization using Taguchi, MOORA and DEAR methods. *Materials Today: Proceedings*, 2021.