

Université 8 Mai 1945 - Guelma -
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : NOUASRIA Abderrahim

Évaluation des paramètres de performances lors de l'usinage d'un polymère composite renforcé de fibres de verre

Sous la Direction de :

Pr. BENSOUILAH Hamza

Pr. YALLESE Mohamed Athmane

Année universitaire 2024/2025

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à :

Mes chers parents

Pour votre amour, vos sacrifices, votre soutien moral et matériel tout au long de mon parcours. Ce travail est le fruit de vos prières et de votre patience. Je vous en serai éternellement reconnaissant.

Ma chère sœur

Ta présence, ton affection et tes encouragements ont été une véritable source de force pour moi. Merci d'avoir toujours été là, dans les bons comme dans les moments plus difficiles.

Mes amis fidèles

Pour les moments de partage, d'entraide et de bonne humeur, qui ont rendu cette aventure plus légère et enrichissante.

Je vous dédie ce mémoire avec tout mon respect et ma reconnaissance.

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur, pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Je remercie énormément mes encadreurs, **Pr. YALLESE Mohammed Athmane** et **Pr. BENSOUILAH Hamza**, à qui je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour toute la confiance qu'ils m'ont témoignée, les encouragements, les conseils et l'aide qu'ils n'ont cessé de me prodiguer tout au long de cette période.

J'adresse aussi mes vifs remerciements au **Pr. BELHADI Salim** pour m'avoir aidé, encouragé et accepté d'examiner mon travail.

Enfin, je remercie tout le personnel technique et administratif du département de Génie Mécanique de l'université de Guelma. Je remercie tous ceux qui ont de loin ou de près contribué à l'aboutissement de ce travail.

ملخص

توفر البوليمرات جزءًا كبيرًا من الهيكل المادي للعالم الذي نعيش فيه بعض المواد البوليميرية تتمتع بخصائص فيزيائية استثنائية تجعلها مفيدة بشكل خاص في الحياة اليومية، وخاصةً PEEK GF 30% الذي يتمتع بصلابته ممتازة، مقاومة عالية للتآكل، واستقرار أبعادي ملحوظ حتى في درجات الحرارة المرتفعة.

يتعلق هذا العمل بدراسة تجريبية عن عملية الخراطة للبولى إيثر إيثر كيتون المدعم بـ 30% من ألياف الزجاج (PEEK GF 30%) باستخدام أداة قطع من كربيد المعادن وفقا لمخطط تاجوشي (L₁₆). ينقسم هذا العمل إلى ثلاثة أجزاء. في البداية، تتعلق الأولى بدراسة إحصائية تعتمد على تحليل التباين، وتهدف إلى دراسة تأثير ظروف القطع على مختلف المخرجات. أما الجزء الثاني، فهو مخصص لنمذجة معايير الإخراج، وهي: خشونة السطح (Ra)، مركبة قوة القطع (Fz)، قدرة القطع (Pc)، ودرجة حرارة القطع (°T)، ويهدف هذا الجزء إلى اقتراح نماذج رياضية تمكن من إجراء تنبؤات مستقبلية. وأخيرًا، تم إجراء عملية تحسين متعددة الأهداف لظروف القطع باستخدام ثلاث طرق مختلفة، وهي: منهجية استجابة السطح بالتحليل التحسيني (DF)، التحليل الرمادي العلاقي (GRA)، وتحليل غلاف البيانات (DEAR). تم تقييم النتائج المستخلصة ومقارنتها. يهتم هذا العمل الباحثين المهتمين بتشغيل البوليمرات المركبة وكذلك تقييم أداء طرق التحسين.

الكلمات المفتاحية : التشغيل، PEEK GF 30 %، مخططات التجارب، ANOVA، العملية التحسينية، Taguchi، DEAR، DF، MSR.

Résumé

Les polymères constituent une part importante de la structure physique de notre environnement. Certains, comme le PEEK renforcé à 30 % de fibres de verre (PEEK GF 30 %), possèdent des propriétés exceptionnelles qui les rendent particulièrement adaptés à de nombreuses applications quotidiennes, notamment une rigidité remarquable, une grande résistance à l'usure et une stabilité dimensionnelle impressionnante, même à des températures élevées.

Le présent travail concerne une étude expérimentale portant sur le tournage du polyétheréthercétone renforcé à 30 % de fibres de verre (PEEK GF 30 %) à l'aide d'un outil de coupe en carbure revêtu selon un plan de Taguchi L_{16} . Ce travail est divisé en trois parties. La première concerne une étude statistique basée sur l'analyse de la variance, elle a pour but l'étude de l'influence des conditions de coupe (V_c , f et a_p) sur les différentes sorties. La seconde partie est réservée à la modélisation des paramètres de sortie : critères de rugosité de surface (R_a), composante de l'effort de coupe (F_z), puissance de coupe (P_c) et la température de coupe (T°), le but est de proposer des modèles mathématiques pour d'éventuelles prédictions. Finalement, une optimisation multi-objective des conditions de coupe a été réalisée en utilisant trois méthodes différentes à savoir ; la fonction de désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (GRA) et l'analyse d'enveloppement des données (DEAR). Les résultats trouvés ont été évalués et comparés. Ce travail intéresse les chercheurs travaillant sur l'usinage des polymères composites ainsi que l'évaluation des performances des méthodes d'optimisation.

Mots clés : Usinage, PEEK GF 30 %, Plans d'expérience, ANOVA, optimisation, Taguchi, MSR, DF, GRA et DEAR.

Abstract

Polymers provide a large part of the physical structure of the world in which we live. Some polymeric materials have extraordinary physical properties that make them particularly useful in everyday life, especially PEEK GF 30%, which has excellent rigidity, high wear resistance, and remarkable dimensional stability even at high temperatures.

The present work focuses on an experimental study of the turning process of 30% glass fiber-reinforced polyetheretherketone (PEEK GF 30%), using a coated carbide cutting tool according to a Taguchi L_{16} experimental design. This work is divided into three parts. The first part involves a statistical study based on analysis of variance, aiming to examine the influence of cutting conditions (V_c , f and a_p) on the different outputs. The second part is dedicated to modeling the output parameters: surface roughness criteria (R_a), cutting force component (F_z), cutting power (P_c), and cutting temperature (T°). The goal is to propose mathematical models for potential predictions. Finally, a multi-objective optimization of the cutting conditions was carried out using three different methods: the desirability function (DF), grey relational analysis (GRA) and data envelopment analysis (DEAR). The results obtained were evaluated and compared. This work is of interest to researchers working on the machining of composite polymers as well as the evaluation of the performance of optimization methods.

Keywords: Machining, PEEK GF 30%, Design of experiments, ANOVA, optimization, Taguchi, MSR, DF, GRA and DEAR.

Index des figures

Fig.I.1	Choix des paramètres de coupe	5
Fig.I.2	Paramètres de coupe	6
Fig.I.3	Paramètres de coupe dans le cas de tournage	6
Fig.I.4	Vitesse de coupe (V_c)	7
Fig.I.5	Vitesse d'avance V_f et l'avance par tour f	7
Fig.I.6	Profondeur de passe (a_p)	8
Fig.I.7	Section de copeau lors d'un chariotage	8
Fig.I.8	Hauteur de profil total R_t	11
Fig.I.9	Hauteur de profil maximum R_z	11
Fig.I.10	Rugosité moyenne du profil R_a	11
Fig.I.11	Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur	12
Fig.I.12	Structure des polymères	13
Fig.I.13	Famille des polymères	14
Fig.I.14	Principales familles de thermoplastiques	16
Fig.I.15	Illustration des différents états de la matière	17
Fig.I.16	Structure d'un polymère semi-cristallin	18
Fig.I.17	Géométrie type d'un outil de tournage	18
Fig.I.18	Températures T_g et T_f	19
Fig.I.19	Principaux matériaux de renfort	21
Fig.I.20	Formule chimique du PEEK	22
Fig.I.21	Porte-outils utilisés dans les expériences pour les deux cas (PCD) et (K20)	23
Fig.I.22	Puissance de coupe (P_c) en fonction de (V_c) et (f) pour les deux outils	24
Fig.I.23	Mesure des forces de coupe (F_c , F_f et F_d) avec un dynamomètre piézoélectrique Kistler 9121	26
Fig.I.24	Architecture des réseaux de neurones artificiels ; vitesse de coupe (C_s), vitesse d'avance (F_r), outil de coupe (C_t) et type de matériau TM , force (F)	27

Fig.I.25	Comparaison des résultats expérimentaux et tests de la force de coupe du modèle de réseau neuronal artificiel	28
Fig.I.26	Comparaison des résultats expérimentaux et tests de la force de coupe du modèle d'inférence floue adaptif-neuronale	28
Fig.I.27	Courbes charge-profondeur (P-h) pour : (a) PEEK (CF/PEEK) et (b) PEEK (GF/PEEK)	29
Fig.I.28	Taux d'enlèvement de matière du PEEK pur et des fibres renforcées	29
Fig.I.29	Analyse comparative sur la rugosité de surface des types de fibres : (a) La rugosité de surface du PEEK pur, CF10/PEEK et GF10/PEEK, (b) la rugosité de surface du PEEK pur, CF30/PEEK et GF30/PEEK	30
Fig.I.30	Mesure des efforts de coupe avec un dynamomètre piézoélectrique Kistler 9121	31
Fig.I.31	Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la puissance (P)	32
Fig.I.32	Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la pression spécifique (Ks)	32
Fig.II.1	Tour parallèle modèle SN40C	34
Fig.II.2	Éprouvette utilisée pour les essais	36
Fig.II.3	Plaquette de coupe utilisée	36
Fig.II.4	Plaquette et porte-outil utilisées	36
Fig.II.5	Dynamomètre (KISTLER9257 B)	37
Fig.II.6	Montage du dynamomètre sur la table de la machine	37
Fig.II.7	Capteur d'effort de coupe KISTLER	38
Fig.II.8	Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE »	38
Fig.II.9	Chaîne de mesure des efforts de coupe	39
Fig.II.10	Mesure de rugosité de la pièce	40
Fig.II.11	Caméra thermographie infrarouge	40
Fig.II.12	Microscope digital numérique	41
Fig.III.1	Organigramme de la MSR	45
Fig.III.2	Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur Fz	48
Fig.III.3	Graphique des effets principaux pour Fz	49
Fig.III.4	Courbe de normalité pour Fz	50
Fig.III.5	Surface de réponse en 3D pour Fz	51
Fig.III.6	Graphe de contour en 2D pour Fz	51

Fig.III.7	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Fz	52
Fig.III.8	Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur Ra	53
Fig.III.9	Effet de conditions de coupe sur Ra	54
Fig.III.10	Courbe de normalité pour Ra	55
Fig.III.11	Surface de réponse en 3D pour Ra	56
Fig.III.12	Graphe de contour en 2D pour Ra	56
Fig.III.13	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra	57
Fig.III.14	Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur T°	58
Fig.III.15	Effet de conditions de coupe sur T°	59
Fig.III.16	Thermographies infrarouges des températures de coupe avec un outil en carbure revêtu sous divers régimes	60
Fig.III.17	Courbe de normalité pour T°	61
Fig.III.18	Surface de réponse en 3D pour T°	62
Fig.III.19	Graphe de contour en 2D pour T°	62
Fig.III.20	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de T°	63
Fig.III.21	Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur Pc	64
Fig.III.22	Effet de conditions de coupe sur Pc	65
Fig.III.23	Courbe de normalité pour Pc	66
Fig.III.24	Surface de réponse en 3D pour Pc	67
Fig.III.25	Graphe de contour en 2D pour Pc	67
Fig.III.26	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Pc	68
Fig.III.27	Classification des formes de copeaux selon la norme ISO 3685	70
Fig.III.28	Forme des copeaux macroscopiques obtenue	71
Fig.III.29	Forme des copeaux microscopiques	72
Fig.IV.1	Diagramme des rampes pour le premier cas d'optimisation	76
Fig.IV.2	Barres de désirabilité analogique pour le premier cas d'optimisation	77
Fig.IV.3	Surface de réponse en 3D pour le premier cas d'optimisation (avec $a_p = 0.4$ mm)	78
Fig.IV.4	Graphe de contour en 2D pour le premier cas d'optimisation (avec $a_p = 0.4$ mm)	78
Fig.IV.5	Diagramme des rampes pour le deuxième cas d'optimisation	79

Fig.IV.6	Barres de désirabilité analogique pour le deuxième cas d'optimisation	80
Fig.IV.7	Surface de réponse en 3D pour le deuxième cas d'optimisation (avec $ap = 0.693$ mm)	81
Fig.IV.8	Graphique de contour en 2D pour le deuxième cas d'optimisation (avec $ap = 0.693$ mm)	82
Fig.IV.9	Qualité Relationnelle Grise (GRG)	85
Fig.IV.10	Graphique des effets principaux pour la méthode GRA	85
Fig.IV.11	L'indice de performance multi réponses (MRPI)	87
Fig.IV.12	Graphique des effets principaux pour la méthode DEAR	88
Fig.IV.13	Valeurs optimales de Ra , T° , Pc et MRR pour les différentes méthodes	90

Index des tableaux

Tableau I.1	Caractéristiques mécaniques des fibres de base	21
Tableau I.2	ANOVA pour la rugosité de surface (Ra) des deux matériaux	25
Tableau I.3	Propriétés mécaniques et thermiques du matériau composite PEEK et PEEK (GF30) provenant de la société ERTA	25
Tableau I.4	Valeurs statistiques de la force de coupe des modèles conçus pour les réseaux neuronaux artificiels (ANN) et le système d'inférence floue adaptative-neuronale (ANFIS)	28
Tableau I.5	Plan expérimental factoriel complet	31
Tableau I.6	Valeurs calculées de (Pc) selon le plan expérimental (L ₁₂)	31
Tableau I.7	Valeurs calculées de (Ks) selon le plan expérimental (L ₁₂)	31
Tableau II.1	les propriétés techniques du PEEK GF30	35
Tableau II.2	Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité	41
Tableau II.3	Matrice de codification et planification pour un plan de 16 essais	42
Tableau III.1	Valeurs expérimentales de Fz, Ra, T, Pc et MRR en fonction de Vc, f et ap	47
Tableau III.2	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort (Fz)	48
Tableau III.3	Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra	53
Tableau III.4	Analyse de la variance (ANOVA) pour T°	58
Tableau III.5	Analyse de la variance (ANOVA) pour Pc	64
Tableau III.6	Résultats des expériences de confirmation	69
Tableau VI.1	Objectifs de l'optimisation et l'intervalle de variation des paramètres de coupe	75
Tableau IV.2	Résultats trouvés pour les deux cas d'optimisation	82
Tableau IV.3	Résultats de l'optimisation par la méthode GRA	84
Tableau IV.4	Résultats de l'optimisation par la méthode DEAR	87
Tableau IV.5	Régimes et réponses optimaux	88
Tableau IV.6	Comparaison entre les résultats	90

Nomenclature

Vc	Vitesse de coupe (m/min)
f	Avance (mm/tr)
ap	Profondeur de passe (mm)
Fx	Effort axiale de coupe (N)
Fy	Effort radiale de coupe (N)
Fz	Effort tangentielle de coupe (N)
ANOVA	Analyse de variance
ANN	Réseaux de neurones artificiels
MSR	Méthodologie de surface de réponse
DF	Fonction de désirabilité
GRA	Analyse relationnelle grise
DEAR	Méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données
Ra	Rugosité moyenne arithmétique (μm)
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité (μm)
Rq	Moyenne quadratique (μm).
Rt	hauteur totale du profil de rugosité (μm)
Pc	Puissance de coupe (W)
MRR	Débit de copeau enlevé (cm^3/min)
T°	Température de coupe ($^{\circ}\text{C}$)
T_f	Température de fusion d'un polymère ($^{\circ}\text{C}$)
T_g	Température de transition vitreuse ($^{\circ}\text{C}$)
R²	Coefficient de détermination
Cont %	Pourcentage de contribution (%)
MCDM	Analyse décisionnelle multicritère

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur la coupe des métaux.....	3
I.2.1. Définition de l'usinabilité	4
I.2.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité	4
I.2.3. Paramètres de performance en usinage.....	5
I.2.4. Paramètres de coupe	6
I.2.5. Évaluation des paramètres de sortie.....	9
I.2.6. Rugosité de surface.....	10
I.2.7. Température de coupe.....	12
I.3. Généralités sur les polymères	12
I.3.1. Définition	12
I.3.2. Classification des polymères.....	13
I.3.3. Comportement des polymères en usinage.....	14
I.3.4. Point de vue thermomécanique	16
I.3.5. Point de vue de la structure physique.....	18
I.3.6. Comportement mécanique des polymères	19
I.4. Polymères composites.....	20
I.4.1. Définition d'un composite	20
I.4.2. Renforts.....	20
I.4.3. Fibres de verre	21
I.4.4. Matrice	21
I.4.5. Polyétheréthercétone GF 30 (PEEK GF 30).....	22
I.5. Travaux de recherches concernant l'usinage de Polyétheréthercétone GF 30 (PEEK GF 30) ..	23
I.6. Conclusion	33

Chapitre II : Procédure expérimentale

II.1. Introduction	34
II.2. Matériels utilisés.....	34
II.2.1. Machine-outil	34
II.2.2. Matériau et éprouvette utilisés.....	34
II.2.3. Plaquette et porte-outils utilisés.....	36
II.2.4. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	37

II.2.5. Chaîne de mesure et caractéristiques	38
II.2.6. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	39
II.2.7. Caméra thermographie IR pour la mesure de la température	40
II.2.8. Microscope	41
II.2.9. Autres équipements	41
II.3. Conditions de coupe	41
II.4. Planification des expériences.....	41
II.4.1. Méthode de planification des expériences	42
II.5. Conclusion	42

Chapitre III : Analyse statistique et Modélisation des performances

III.1. Introduction	43
III.2. Analyse de la variance (ANOVA) et MSR	43
III.2.1. L'ANOVA.....	43
III.2.2. Méthodologie des surfaces de réponses	44
III.3. Résultat d'expériences.....	46
III.3.1. ANOVA et Modélisation des différents paramètres F_z , R_a , T° et P_c	47
III.3.1.1. Analyse des résultats de l'effort de coupe (F_z) en fonction de V_c , f et a_p	47
III.3.1.2. Analyse des résultats de la rugosité (R_a) en fonction de V_c , f et a_p	53
III.3.1.3. Analyse des résultats de la température (T°) en fonction de V_c , f et a_p	58
III.3.1.4. Analyse des résultats de la puissance de coupe (P_c) en fonction de V_c , f et a_p	64
III.4. Confirmation des essais.....	68
III.5. Formation des copeaux.....	69
III.6. Conclusion.....	73

Chapitre IV : Optimisation multi-objective des paramètres de sortie

IV.1.Introduction	74
IV.2. Fonction de désirabilité.....	74
VI.3. Méthode MCDM.....	83
VI.4. Tests de confirmation.....	88
VI.5. Récapitulatif des résultats	89
IV.6. Conclusion	90
Conclusion générale	92
Référence bibliographique	94

Introduction générale

Depuis toujours, les matériaux ont constitué un indicateur clé du niveau de développement des civilisations humaines. En effet, les avancées techniques dépendent généralement de la découverte ou de l'amélioration de matériaux aux performances accrues. Dans cette dynamique, les polymères occupent une place prépondérante.

La compréhension du comportement des matériaux polymères thermoplastiques demeure un enjeu scientifique complexe et une préoccupation majeure pour l'industrie. Elle s'inscrit dans le besoin constant d'adaptation aux exigences des technologies modernes, notamment en matière de respect de l'environnement et de développement durable.

Dans notre cas, on a choisi le polymère polyétheréthercétone renforcé à 30 % de fibres de verre (PEEK GF 30 %), il est utilisé dans de multiples domaines tels que : l'industrie automobile, le secteur mécanique, l'électrique, l'électronique et l'industrie médicale.

Le PEEK GF 30 % présente des propriétés mécaniques et thermiques remarquables, notamment une grande rigidité, une excellente résistance à l'usure et une bonne stabilité dimensionnelle, même à haute température. Toutefois, l'usinage de ce matériau renforcé reste un défi, en raison de sa dureté accrue liée à la présence de fibres de verre, ce qui entraîne une usure prématurée des outils, des efforts de coupe élevés et une qualité de surface difficile à maîtriser. Ainsi, la complexité de son usinage et la nécessité d'optimiser les performances de production poussent à approfondir la modélisation des paramètres technologiques et l'optimisation des conditions de coupe. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude.

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le **premier chapitre** est consacré à l'étude bibliographique. Au premier lieu on présente des notions de base sur la coupe des métaux tels que : généralité sur la coupe des métaux, l'usinabilité, les paramètres technologiques d'usinage. En deuxième lieu, nous présentons, une étude sur les polymères et particulièrement le PEEK GF 30 %. Finalement, une présentation des travaux de recherche relatifs au tournage des différents types de polymères.

Le **deuxième chapitre** est consacré à la présentation des équipements nécessaires à la réalisation des essais et à la planification des expériences, ainsi que les conditions de coupe. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont aussi présentés d'une façon précise avec les parties essentielles pour une étude expérimentale de la coupe.

Le **troisième chapitre** est fondé sur l'exposition des résultats de l'usinage du PEEK GF 30 % pour définir les conditions de coupe adéquates pour optimiser le processus de coupe relatif à ce polymère. On a présenté des résultats de l'étude de l'influence des

paramètres de coupe sur les critères de la rugosité de surface (R_a), la composante de l'effort de coupe (F_z), la température de coupe (T°), la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau enlevé (MRR) et cela en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et a_p). Aussi, nous présentons une étude statistique (analyse de variance ANOVA et modélisation) basée sur la méthodologie de surface de réponse (MSR). En outre, la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse ont été réalisées par l'utilisation du logiciel de statistique «Design-Expert 10». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés, et de proposer des modèles mathématiques pour chaque paramètre étudié.

Dans le **quatrième chapitre** considéré comme le dernier chapitre, nous avons exposé les résultats d'une étude d'optimisation des paramètres de sortie (R_a , T° , P_c et MRR) afin de déterminer le régime optimal. L'étude est réalisée suivant l'optimisation multi-objective, en utilisant différentes méthodes à savoir : la fonction de désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (GRA) et la méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (DEAR) pour optimiser la productivité et la qualité de surface simultanément. Une étude comparative entre les performances de chaque méthode a été aussi réalisée.

Finalement, nous avons terminé notre mémoire par une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1. Introduction

Les polymères fournissent une grande partie de la structure physique du monde dans lequel nous vivons. En raison de leur légèreté et de leur résistance mécanique élevée, de nombreux polymères sont largement utilisés dans des applications industrielles. Grâce à des propriétés mécaniques uniques, comme leurs capacités à alterner entre glissement et adhérence, certains polymères jouent un rôle clé dans des applications quotidiennes [1].

Les polymères présentent l'avantage d'être mis en œuvre plus facilement lors de la production par moulage ou par extrusion. Cependant, après moulage, les pièces polymériques risquent de subir une cristallisation progressive, particulièrement en surface, pouvant entraîner des déformations dimensionnelles hors tolérances de conception, et ce dès les premiers jours suivant leur fabrication. Par conséquent, les procédés de mise en forme et de fabrication doivent être rigoureusement adaptés aux propriétés intrinsèques du polymère afin de garantir la conformité aux exigences de l'application finale.

On distingue parmi ces polymères : le polymère PEEK, existe en couleur beige opaque, l'avantage particulier du polymère PEEK est la très bonne résistance au fluage, la très grande rigidité et la bonne résistance chimique. Le PEEK est l'un des meilleurs matériaux thermoplastiques résistant à la chaleur. Même lorsqu'il est utilisé à 260°C pendant 5000 heures, ses performances, excellentes en stabilité thermique, sont quasiment identiques qu'à son état initial [2].

Dans le cadre de cette recherche bibliographique, nous présentons dans ce chapitre une synthèse des travaux relatifs à la coupe des métaux. Ensuite, nous exposons les définitions de quelques phénomènes intervenants dans le processus d'usinabilité, généralités sur les grandes familles des polymères ainsi que leurs domaines d'utilisation. A la fin de ce chapitre, les travaux de recherche sur l'usinage du polymère PEEK GF 30 sont aussi exposés.

I.2. Généralités sur la coupe des métaux

L'industrie mécanique a progressé grâce à des technologies multifonctionnelles pour la production de pièces et de composants pour l'ensemble et les sous-ensembles mécaniques. Parmi les principaux procédés de fabrication mécanique, il est essentiel de mentionner les techniques de fonderies qui sont les moyens les plus répandus pour des composants semi-finis ou simples en termes de manœuvre et de coût. Toutefois, ces techniques ne sont pas en mesure de satisfaire les besoins mécaniques en pièces et composants spécifiques et compliqués ; par contre, l'usinage est le processus le plus fiable adapté à la fabrication et à la finition de pièces de précision ou de formes compliquées. Il est indispensable de définir clairement le domaine de la coupe des métaux et celui de l'étude de l'usinabilité. L'objectif de la coupe des métaux est d'étudier l'influence des différents facteurs intervenant dans le processus de coupe (vitesse de coupe, profondeur de coupe, l'avance, liquide de refroidissement, etc....) sur le comportement d'un matériau en utilisant des outils de différentes compositions (acier rapide, nitrure de bore cubique CBN, carbure, céramique et le

diamant), ainsi que les différentes géométries. Au contraire, l'étude de l'usinabilité vise à comparer le comportement de différents matériaux en appliquant la même méthode d'usinage (par exemple, le tournage) selon des conditions de coupe identiques, en utilisant le même outil en termes de leurs (géométries, composition chimique ainsi que les traitements thermiques subis) [3].

I.2.1. Définition de l'usinabilité

L'usinabilité est la capacité d'un matériau $M1$ à être usiné par un matériau usinant $M2$. Il existe de nombreux critères pour juger l'usinabilité d'un matériau, qui varient non seulement en fonction du genre d'opération, mais aussi de la finalité visée par l'usineur.

L'usinabilité est donc déterminée par un critère sélectionné par l'usineur, tout en étant constamment associée à la fabrication à moindre coût et/ou à l'optimisation de la qualité de la pièce [4]. D'après les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux, l'usinabilité peut également être définie de différentes manières :

- D'après A. Czaplicki [5], l'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée.
- D'après B. Gruber [6], l'usinabilité ou l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et des formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage. Il ne s'agit pas d'une propriété simple de la matière, elle n'est pas une grandeur mesurable, l'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité, plus ou moins grande, d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux à une forme et à des côtes fixes.

I.2.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité

Il existe de nombreux critères pour juger de l'usinabilité à être usiné d'un matériau, qui dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cependant, ce concept d'usinabilité demeure toujours associé à la production à moindre coût.

Lors de la caractérisation de l'usinabilité, les paramètres principaux considérés sont :

- La durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps.
- Les conditions de coupe.
- Les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe.
- Le fractionnement du copeau.
- L'état de surface obtenu de la pièce, dont la rugosité.
- La productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités facteurs influençant l'usinabilité [5,6].

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit régler les paramètres de coupe ; où, il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de coupe, comme le montre la *figure I.1*:

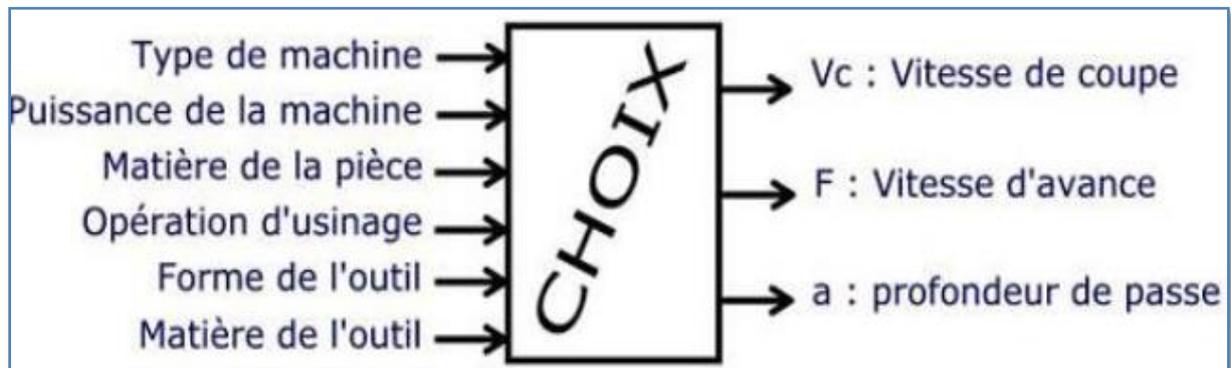


Fig.I.1: Choix des paramètres de coupe [7].

I.2.3. Paramètres de performance en usinage

Il existe de nombreux indicateurs de performance (IP) en usinage qui varient non seulement selon le type d'opération, mais aussi en fonction du choix de l'usinier entre la production à moindres coûts et/ou la meilleure qualité de la pièce. Il s'agit notamment des conditions de coupe (V_c , f et a_p), de l'état de surface (rugosité), de la durée de vie de l'outil, l'usure de l'outil, les efforts de coupe et la consommation d'énergie et la productivité [8], [9] et [10].

Selon le compromis de choix de l'usineur entre bon état de la surface usinée, vitesse d'usinage et coût de l'opération, (...), plusieurs critères peuvent définir les paramètres de coupe souhaités comme suit (*figure I.2*) :

- Caractéristiques de la machine
 - ✓ Type de machine.
 - ✓ Puissance.
 - ✓ ...
- Caractéristiques de la pièce
 - ✓ Matière
 - ✓ Dimension
 - ✓ Dureté
 - ✓ Température de fusion
 - ✓ ...
- Caractéristiques des outils
 - ✓ Matière de l'outil
 - ✓ Géométrie de l'outil
 - ✓ ...etc.

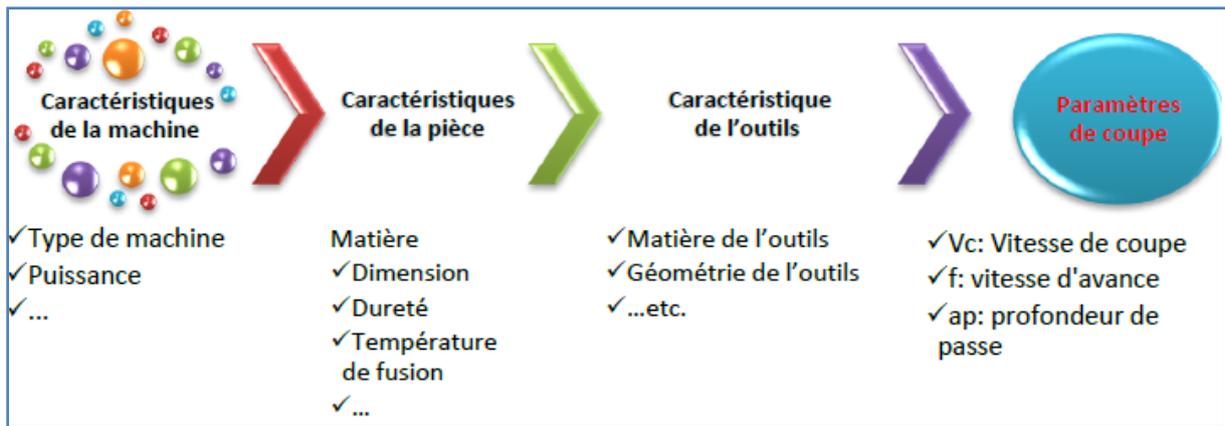


Fig.I.2: Paramètres de coupe [11].

I.2.4. Paramètres de coupe

La détermination des paramètres de coupe joue un rôle très important dans la production industrielle, ils sont subdivisés en deux catégories (*figure I.3*) [12 – 13] :

- Paramètres cinématiques : les grandeurs qui caractérisent les mouvements de l'outil et de la pièce tels que (V_c , V_f , V_a) et l'avance f .
- Paramètres géométriques : les dimensions de coupe comme la section de coupe ($a \times h$).

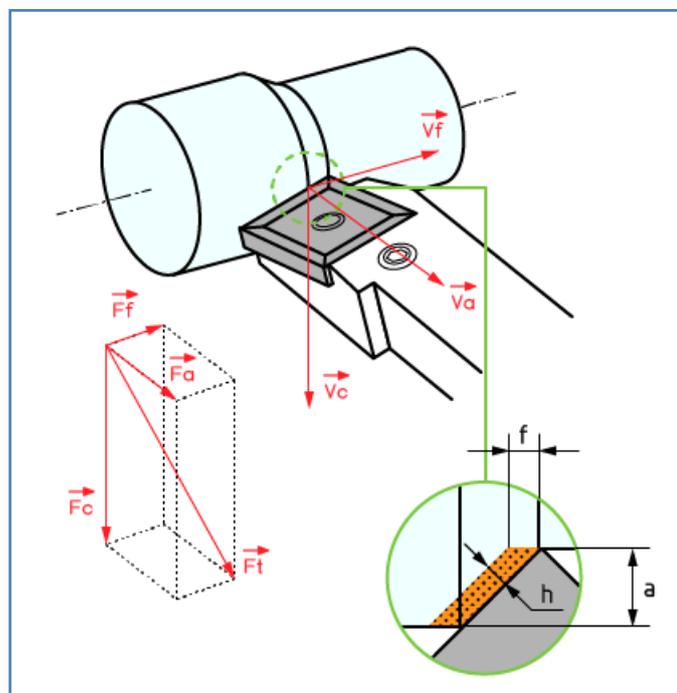


Fig.I.3: Paramètres de coupe dans le cas de tournage [14].

✓ Vitesse de coupe (V_c)

Pour le tournage, la vitesse est le chemin circonférentiel (ou périmètre) parcouru par un point situé sur le diamètre extérieur de la pièce pendant une minute. Elle dépend de la

matière usinée, du type d'opération, de l'outil de coupe, de l'état de surface souhaitée, etc... Elle est exprimée en (m/min), est régie par la formule (Eq I.1).

La vitesse linéaire en mètre par minute V_c (m/min) *figure I.4*, on aura :

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \text{ [m/min]} \quad (\text{I.1})$$

D : Diamètre en [mm] ;

N : Vitesse de rotation en tour par minute [tr/min].

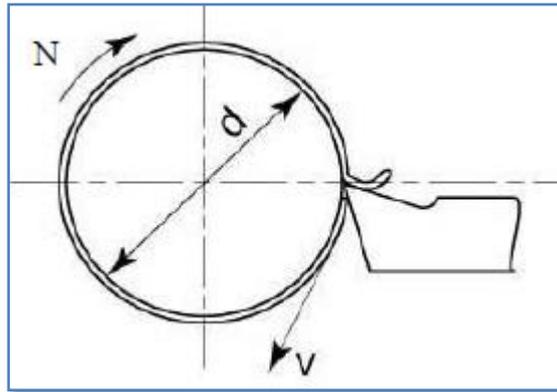


Fig.I.4: Vitesse de coupe (V_c) [15].

✓ Vitesse d'avance (V_f)

La vitesse d'avance est la vitesse de déplacement de l'outil par rapport au bâti lorsque la pièce a effectué une révolution, elle s'exprime par V_f (mm/min), est régie par la formule (Eq I.2). C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée (*figure I.5*).

$$V_f = f \times N \text{ [mm/min]} \quad (\text{I.2})$$

f : l'avance par tour en [mm/tr].

N : Fréquence ou vitesse de rotation [tr / min].

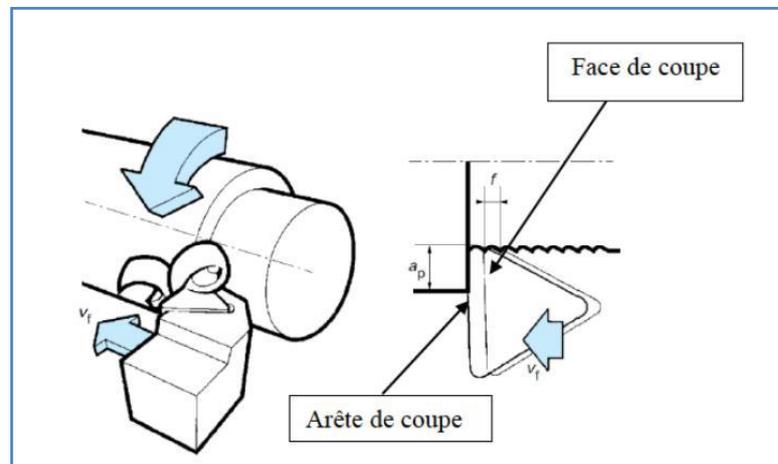


Fig.I.5: Vitesse d'avance V_f et l'avance par tour f [15].

✓ **Profondeur de passe (a_p)**

La profondeur de passe est le volume de matière enlevé par l'outil lors d'un usinage sur un tour (*figure I.6*). Les limites de choix de la profondeur de passe sont en fonction de la surépaisseur de métal à enlever ; pour une limite maximum, le choix se fait en considérant (puissance de la machine, nature du matériau à usiner, rigidité de la pièce et de l'outil), et pour une limite minimum signifiée taille de copeau minimum, on prend en considération la forme du bec de l'outil, la finesse de l'arête tranchante, la nature du matériau et l'état de la machine.

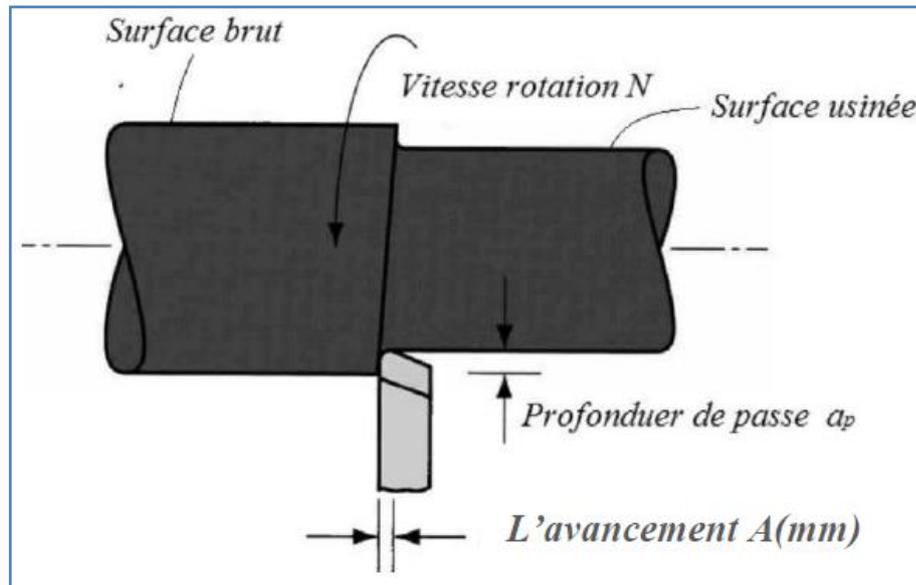


Fig.I.6: Profondeur de passe (a_p) [11].

✓ **Section de copeaux**

On peut définir la section de copeau S comme le produit de la profondeur de passe (a_p) par l'avancement (A) sur un plan (P_r) perpendiculaire à la vitesse de coupe (V_c) au point considéré O , (*figure I.7*).

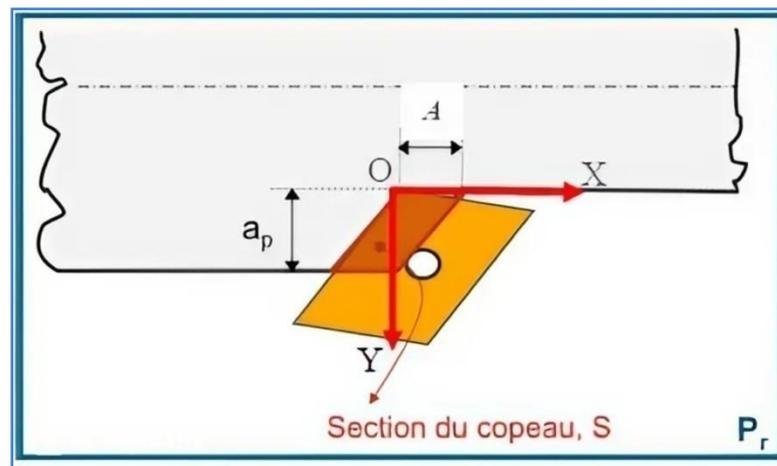


Fig.I.7: Section de copeau lors d'un chariotage [11].

I.2.5. Évaluation des paramètres de sortie

- **Efforts de coupe**

L'évaluation des efforts de coupe est intéressante en usinage, notamment pour le choix de l'outil et des éléments de la machine-outil (porte-pièce, etc.), ainsi que l'évaluation de la puissance de coupe qui permet le choix rationnel de la machine [16].

Dans le cas du chariotage, l'effort radial (F_r) est nul (pas d'avance radiale). De plus, la vitesse d'avance (V_f) est en général 1000 fois plus petite que la vitesse de coupe (V_c) [17].

- ✓ F_x ou F_a : Effort axial en tournage, mesuré dans le sens de l'avance.
- ✓ F_y ou F_r : Effort de refoulement ou effort radial.
- ✓ F_z ou F_t : Effort tangentiel dans le sens de vitesse de coupe.
- ✓ La force résultante de coupe $F_{rés}$ ([figure I.3](#)), est donnée par la relation (Eq I.3)

$$F_{rés} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (I.3)$$

Dans le cas de la coupe orthogonale, On peut donc négliger F_a et F_x devant F_z , l'effort de coupe sera :

$$F_{rés} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \approx F_z \quad (I.4)$$

- **Effort spécifique de coupe (pression de coupe)**

L'effort spécifique de coupe ou la pression de coupe est défini comme étant l'effort de coupe sur la section du copeau à déformer.

$$K_c = \frac{F_z}{S} \quad (I.5)$$

- ✓ F_z [N], Effort de coupe ;
- ✓ K_c [N/mm²], Pression de coupe ;
- ✓ S [mm²], Section du copeau.

$$S = a_p \times A \quad (I.6)$$

- ✓ A [mm], l'avancement de l'outil de coupe lorsque la pièce a effectué une révolution ;
- ✓ a_p [mm], profondeur de passe.

L'effort spécifique varie en fonction du matériau usiné, de l'épaisseur de coupe, de l'angle de coupe et finalement de l'usure de l'outil de coupe.

- **Puissance de coupe (P_c)**

La puissance de coupe (P_c), est principalement liée à la vitesse de coupe (V_c) et à la force de coupe tangentielle (F_c). Dans le cas de tournage et durant l'opération de chariotage nous négligeons l'effort d'avance et l'effort radial est nul, donc on aura :

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60} \quad (\text{I.7})$$

- ✓ V_c [m/min], vitesse de coupe ;
- ✓ F_z [N], force de coupe ;
- ✓ P_c [W], puissance de coupe.

- **Débit du copeau enlevé (MRR)**

Le taux d'enlèvement de matière est défini par le volume de matière enlevée divisé par le temps de coupe, mesuré en centimètres cubes par minute (cm^3/min). Le taux d'enlèvement de copeaux est un indicateur de la productivité d'une machine-outil basée sur le principe de l'efficacité de la machine, diminue lorsque le taux d'enlèvement des copeaux augmente. Il en résulte l'équation suivante :

$$MRR \text{ ou } Q = V_c \times S \quad (\text{I.8})$$

- ✓ MRR : Débit d'enlèvement de copeaux [cm^3/min] ;
- ✓ V_c [m/min], vitesse de coupe ;
- ✓ S : Section de coupe [mm^2] défini auparavant Eq. (I.6).

D'où :

$$MRR = V_c \times f \times a_p \quad (\text{I.9})$$

I.2.6. Rugosité de surface

- **Définition**

L'état de surface d'une pièce influence considérablement ses propriétés et son comportement, comme la résistance au frottement, l'adhérence ou la résistance à la fissuration. Actuellement, la caractérisation géométrique d'une surface (macro, micro ou même nano) n'est réalisée que sur un profil standard. Il s'agit de mesurer les différentes déformations géométriques du profil afin de détecter les différents défauts géométriques [11].

- **Critères de la rugosité**

La génération d'une surface usinée engendre des traces sur cette dernière par le tranchant de l'outil coupant pendant le mouvement de coupe relatif. Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage, nous définissons (*figure I.8*):

- ✓ **Rugosité totale R_t** : Représente l'écart maximum entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.

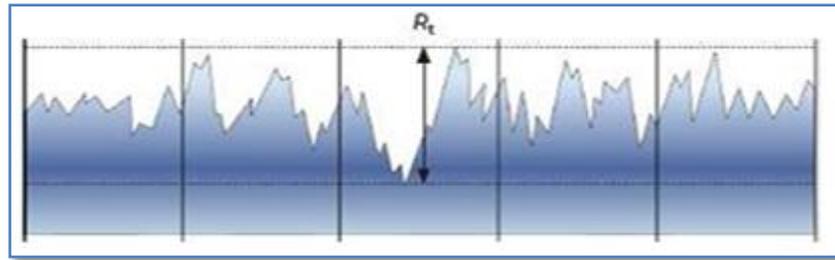


Fig.I.8: Hauteur de profil total R_t [11].

- ✓ **Rugosité R_z** : Représente la distance moyenne entre les sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5} \quad (\text{I.10})$$

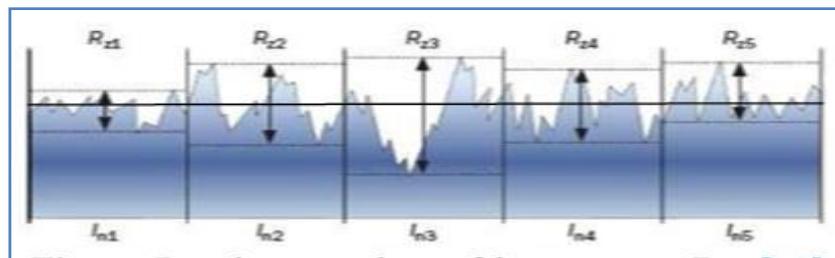


Fig.I.9: Hauteur de profil maximum R_z [11].

- ✓ **Rugosité moyenne arithmétique R_a** : Représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX, est calculée sur une longueur d'évaluation (L) (figure I.10).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L Y dx \quad (\text{I.11})$$

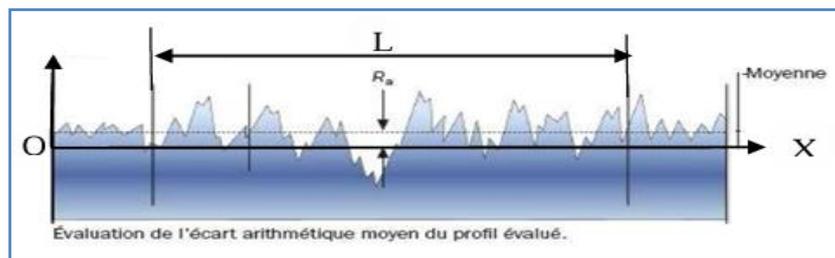


Fig.I.10: Rugosité moyenne du profil R_a [11].

- ✓ **Rugosité maximum R_{max}** : est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité R_{max} étant prise sur une saillie et un creux consécutif.
- ✓ **Rugosité R_p** : est la hauteur maximum de sillons de rugosité. R_p est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

I.2.7. Température de coupe

La température a des effets importants sur les efforts de coupe et l'usure des outils, l'aspect thermique de la coupe a donc été largement étudiée depuis de nombreuses années. Pourtant, à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu en usinage, il est très difficile de prédire l'intensité et la distribution des sources de chaleur. Les processus mécaniques et thermiques sont extrêmement couplés, en particulier parce que les propriétés des matériaux varient avec la température. On indique souvent que 90 à 100 % de l'énergie mécanique consommée est finalement convertie en énergie thermique, Les principales sources de chaleur proviennent :

- ✓ Des déformations plastiques des zones de cisaillement primaire et secondaire.
- ✓ De la dissipation du frottement générée à l'interface outil-copeau et entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée de la pièce. La chaleur ainsi créée va se répartir dans les différentes parties de l'outil, de la pièce et du copeau (*figure I.11*). Le transfert de chaleur dans le copeau et dans la pièce s'effectue majoritairement par transport, alors que dans l'outil le transfert s'effectue principalement par diffusion. De fait, la répartition des flux ne se fait pas de manière équivalente et dépend bien sûr des conditions de coupe et des propriétés thermiques des matériaux. Seul un faible pourcentage de la chaleur générée est transmis à l'outil et la pièce, la majorité étant évacuée par le copeau [18].

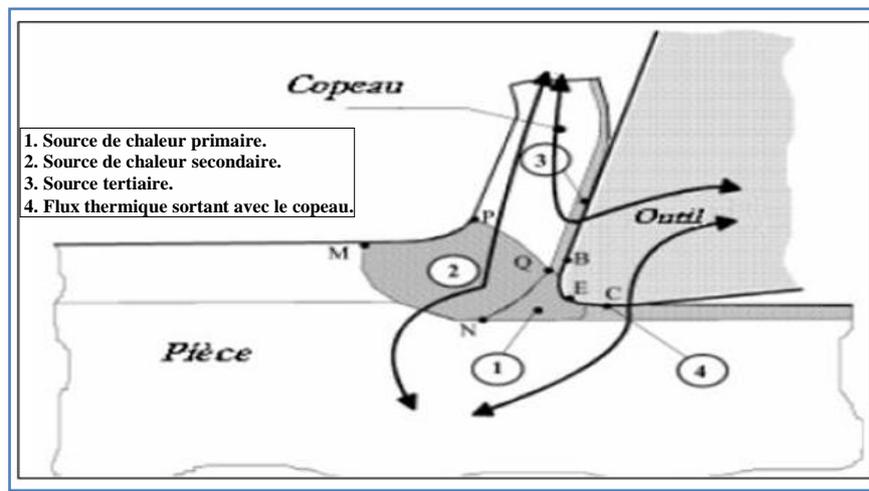


Fig.I.11: Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur.

I.3. Généralités sur les polymères

I.3.1. Définition

Un polymère est un matériau composé de longues chaînes d'unités répétitives appelées monomères. Le mot polymère vient des mots grecs **poly-**, qui signifie "beaucoup", et **-mer**, qui signifie "partie". Les polymères peuvent être naturels ou synthétiques et possèdent un large éventail de propriétés, notamment la résistance, la flexibilité et la ténacité. Les

polymères sont utilisés dans une grande variété de produits, notamment les plastiques, les textiles et dans l'industrie automobile [11].

I.3.2. Classification des polymères

Les polymères peuvent être classés selon :

- La nature chimique ;
- Tenez compte de sa structure des chaînes ;
- Le type de réaction utilisé pour les préparations et son effet sur les propriétés physiques des polymères résultants.
- Leurs usages technologiques [19].
 - ✓ **Selon la nature chimique** (Polymères minéraux - Polymères organiques – Polymères mixtes).
 - ✓ **Selon structure des chaînes** (Polymères linéaires - Polymères ramifiés- Polymères réticulés) (*figure I.12*).
 - ✓ **Selon leur origine** (Polymères naturels - Polymères synthétiques et de transformation).
 - ✓ **Selon leur comportement thermique** (Polymères thermoplastiques- Polymères thermodurcissables- Polymères thermo élastiques).
 - ✓ **Selon les usages technologiques**, on peut distinguer (Les fibres synthétiques - thermodurcissables et thermoplastiques - Les élastomères).

Une explication relative aux grandes familles des polymères selon leurs appellations standards a été résumée à la *figure I.13*.

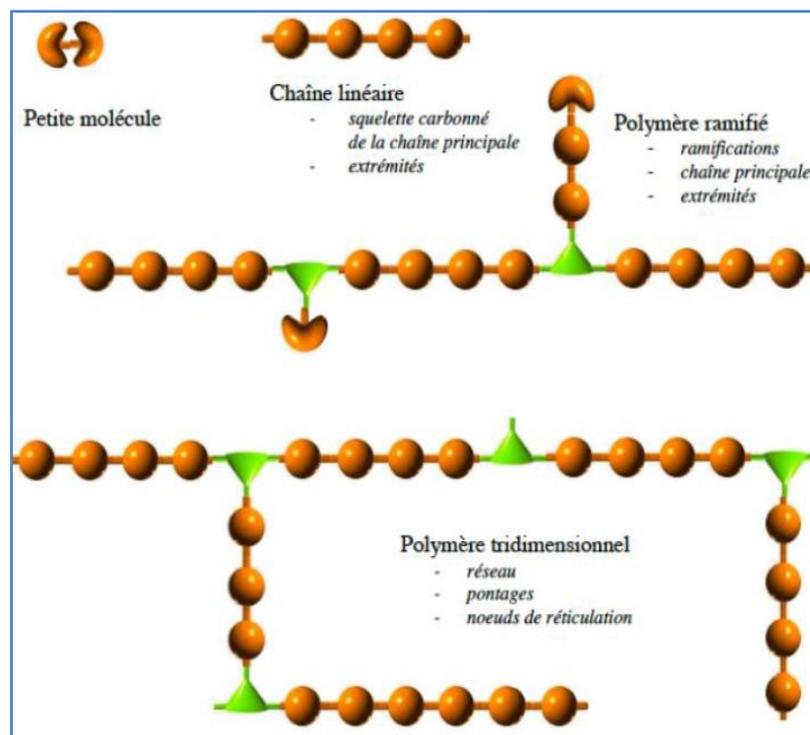


Fig.I.12: Structure des polymères [19].

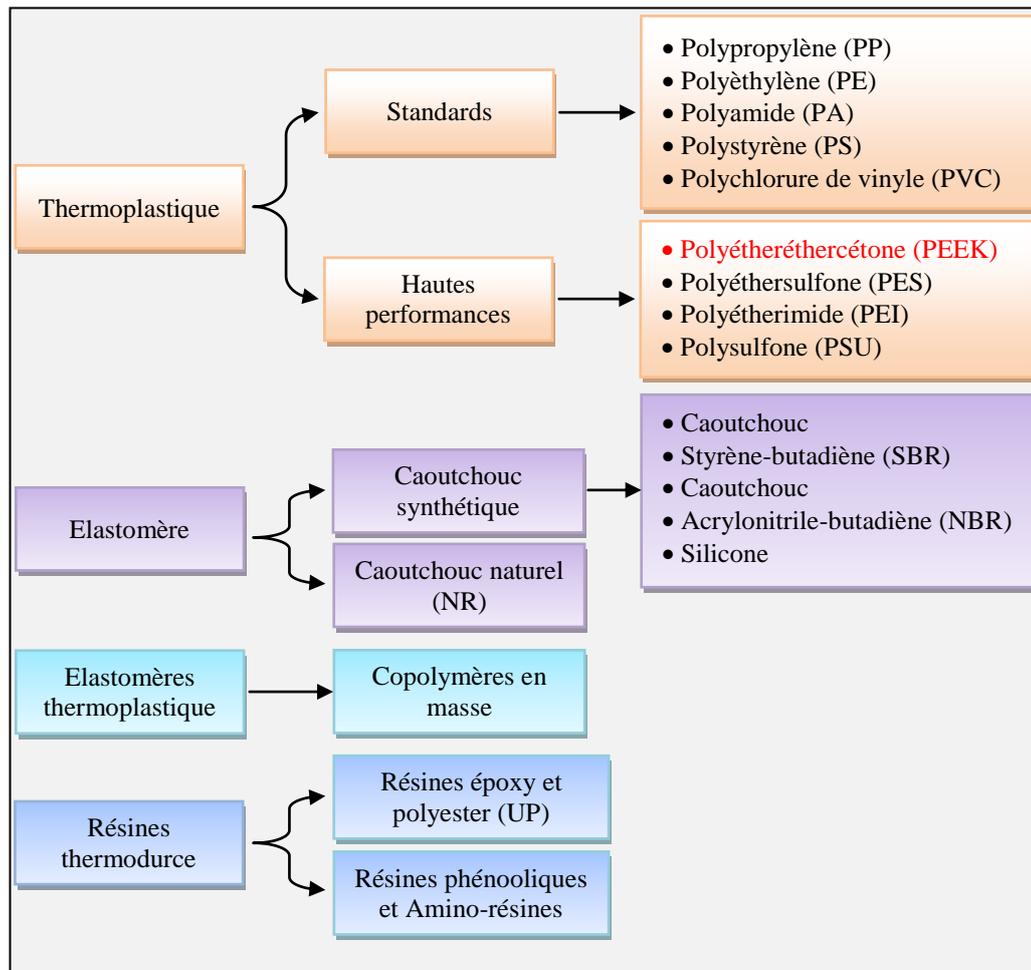


Fig.I.13: Famille des polymères.

I.3.3. Comportement des polymères en usinage

L'usinage des polymères est un processus de fabrication polyvalent à l'aide d'une machine-outil. C'est une alternative à d'autres processus de fabrication, tels que la coulée et le moulage, et il peut être utilisé pour créer des pièces aux géométries complexes qui seraient difficiles ou impossibles à produire en utilisant d'autres méthodes.

Il existe de nombreux types de processus d'usinage des polymères, chacun avec ses propres avantages et inconvénients. Certaines des méthodes les plus courantes incluent : le tournage, le fraisage, le perçage, le sciage, la découpe laser et la découpe jet d'eau.

Le choix du processus d'usinage des polymères à utiliser dépendra des exigences spécifiques du concept Couple Outil-Matière (C.O.M). Plusieurs facteurs doivent être pris en compte, tels que la taille et la géométrie de la pièce, la précision et la rugosité de surface désirée, ainsi que le coût du processus [20].

- **Outils de coupe**

Concernant l'usinage des Polymères sans renforcement, les outils en acier rapide peuvent réaliser l'usinage sans aucune difficulté. Par contre, pour les polymères renforcés, des outils en carbure métallique sont nécessaires pour obtenir la qualité de surface et la précision recherchées [21].

- **Tournage**

Les différentes opérations de tournage des polymères thermoplastiques ne présentent pas de difficulté particulière. Comme pour toutes les autres opérations d'usinage, il est important de respecter les conditions de coupes adaptées. Lors de l'usinage des thermoplastiques, les copeaux sont longs et doivent être rapidement dégagés pour éviter qu'ils s'enroulent sur les pièces. Avec les thermodurcissables, la matière s'usine plutôt avec des copeaux courts et des poussières ; dans ce cas, des installations d'aspiration sont obligatoires pour éviter des problèmes de santé pour les utilisateurs [22].

- **Fraisage**

En général, les fraiseuses utilisées habituellement pour l'usinage des métaux légers sont particulièrement adaptées à l'usinage des polymères. Pour une production d'un grand nombre de pièces, il est préférable d'utiliser des fraiseuses munies de plaquettes en carbure pour que la vitesse de coupe (V_c) puisse être augmentée.

- **Perçage**

Il est conseillé durant le perçage d'évacuer les copeaux pour éviter l'échauffement de la matière au passage du foret et de travailler par perçages successifs en dégageant régulièrement l'outil et en refroidissant par un liquide ou par un soufflage d'air comprimé. Aussi, d'utiliser des forets à âmes affûtées et de réduire la vitesse d'avance (f) en fin de coupe pour éviter la sortie brutale de l'outil, empêchant ainsi les bavures et les éclats. Les diamètres de perçage importants doivent être pré-perçés ou exécutés au moyen d'une mèche creuse ou par alésage au tour.

- **Sciage**

La plupart des plastiques peuvent être découpés à l'aide d'une scie à ruban ou d'une scie circulaire, mais les dents doivent être affûtées pour garantir une coupe parfaite.

- **Refroidissement**

Les polymères sont de mauvais thermo-conducteurs, par conséquent, pendant l'usinage, des températures trop élevées peuvent ramollir ou faire fondre les surfaces, voire endommager le polymère usiné. Le refroidissement est optimal lorsque les copeaux sont correctement évacués par les outils. Si le temps d'usinage est long, il convient d'utiliser des lubrifiants pour minimiser l'accumulation de chaleur. Parfois il est nécessaire de les refroidir, soit avec de l'eau, soit avec de l'air uniquement dans le cas de la plupart des plastiques amorphes afin d'éviter la présence des fissures dues à la contrainte interne [20].

Selon AGORA [26], la qualité du tranchant et l'évacuation efficace des copeaux priment sur le matériau de l'outil, une pointe arrondie optimisant le fini de surface. En tournage de précision, éviter la surchauffe est crucial pour limiter la dilatation thermique (jusqu'à 10 fois supérieure à l'acier), nécessitant des mesures à température ambiante ou un

refroidissement adapté (fluide, air comprimé) [27]. Les lubrifiants, bien qu'optionnels, sont utiles pour évacuer copeaux et chaleur (ex. perçage), avec une préférence pour l'eau ou l'air sur les plastiques sensibles (ex. polycarbonate). Les aciers rapides suffisent généralement, le carbure étant réservé aux cas complexes (charges minérales, tolérances serrées). La *figure I.14* définit les différents angles d'un outil de tour.

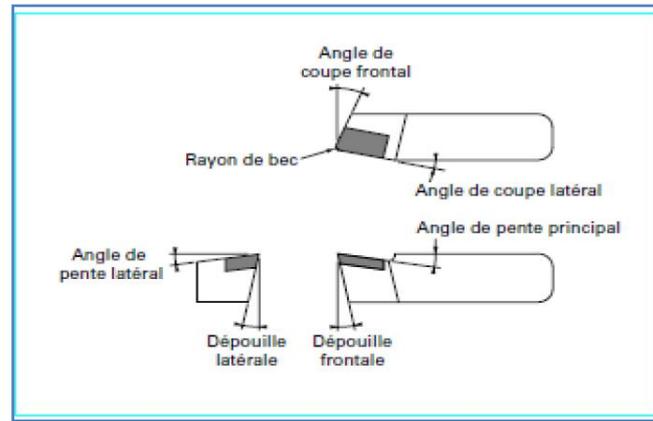


Fig.I.14: Géométrie type d'un outil de tournage [27].

I.3.4. Point de vue thermomécanique

- **Polymères thermoplastiques**

Les thermoplastiques fondent lorsqu'on les chauffe, tout comme la glace ou le beurre. C'est le cas du polyéthylène, du polypropylène, des polyamides, de certains polyesters. En revanche, l'avantage est que dans l'état fondu, on peut les mouler dans la forme que l'on veut. C'est un procédé industriel employé pour fabriquer des objets à la pièce, en discontinu. Ce procédé est bien connu également pour les métaux, mais les températures de fusion des polymères sont bien plus basses, de l'ordre de 80°C à 300°C.

Le comportement global du matériau dépend alors de la mobilité des chaînes les unes par rapport aux autres et de la rotation autour des liaisons (C – C). L'élévation de la température facilite le déplacement des chaînes les unes par rapport aux autres, le comportement d'abord vitreux devient caoutchoutique entre la température de transition vitreuse (T_g) et la température de fusion (T_f). La réversibilité de comportement permet la mise en forme de ces matières à l'état fondu ou caoutchoutique.

Ils représentent 80% des matières plastiques consommées en Europe en 2000, soit plus de 35 millions de tonnes ! Avant transformation, ils sont sous forme des granulés ou de poudres dans un état chimique stable et définitif car il n'y a pas de modification chimique lors de la mise en forme. Les granulés sont chauffés puis moulés par injection et le matériau broyé est réutilisable.

Parmi les principaux thermoplastiques, on peut citer le PE, le PP, le PS, le PVC, les polyamides, le PET [23]. La *figure 1.15* présente les principales familles des thermoplastiques:

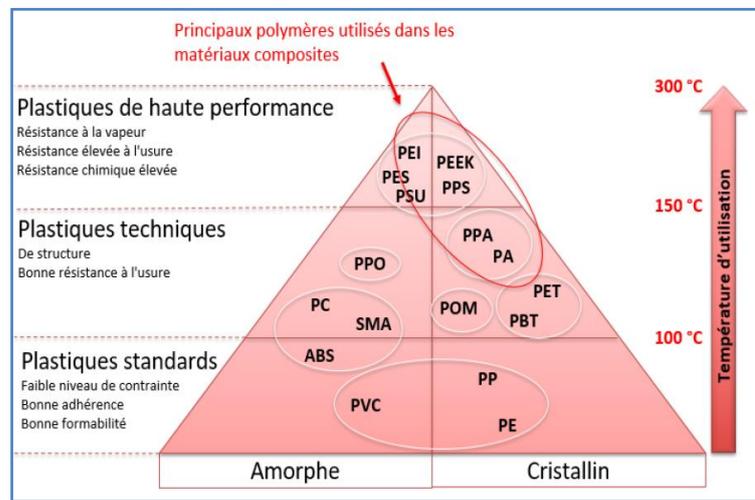


Fig.I.15: Principales familles des thermoplastiques [23].

- **Polymères thermodurcissables**

Ils sont en général des polymères en réseau tridimensionnel, formés par réticulation des différentes chaînes de polymères. La cohésion des chaînes est assurée par des liaisons physiques : liaisons de Van der Waals, liaisons hydrogènes. Il n'existe pour eux ni solvant, ni phase fondue. Si on les chauffe, les ramifications pendantes du réseau s'accrochent et le matériau se transforme définitivement en un polymère dur, infusible et insoluble dans les solvants tant qu'on reste en deçà d'une température seuil où le polymère commence à se détruire.

Les thermodurcissables ne sont pas recyclables et leur mise en forme est plus complexe. Par contre, ils peuvent servir de matériaux structuraux. Ils sont issus de monomères ayant une fonctionnalité moyenne supérieure à 2. La fonctionnalité d'un monomère est son nombre de sites réactifs au cours d'une réaction de polymérisation [23].

- **Élastomères**

Les élastomères sont des composés macromoléculaires dont les propriétés sont étroitement liées à leur nature chimique et au caractère aléatoire de la distribution des chaînes moléculaires. Ils se distinguent par les faibles valeurs des forces d'attraction entre les chaînes et des modules d'élasticité à température ambiante et surtout par leur capacité élevée de déformation. Le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques appartiennent à cette famille qui constitue apparemment une classe distincte.

Parmi les avantages des élastomères, il faut signaler une excellente mise en œuvre, de bonnes propriétés mécaniques, un très faible échauffement interne et une très bonne tenue au froid. Mais pour autant, pour avoir un élastomère vraiment élastique, c'est-à-dire qui retrouve intégralement sa forme originale après déformation,

il faut empêcher les chaînes de glisser les unes par rapport aux autres. Cette opération appelée réticulation consiste à créer des liaisons chimiques entre chaînes, de sorte que l'enchevêtrement de chaînes séparées devienne un réseau tridimensionnel [23].

I.3.5. Point de vue de la structure physique

- **Polymère amorphe**

Les zones dites amorphes correspondent à une structure comparable à celle des liquides caractérisés par l'absence d'ordre à grande distance. Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation, et ceci en raison de la structure et de la disposition aléatoire des chaînes individuelles (*figure I.16*) [24].

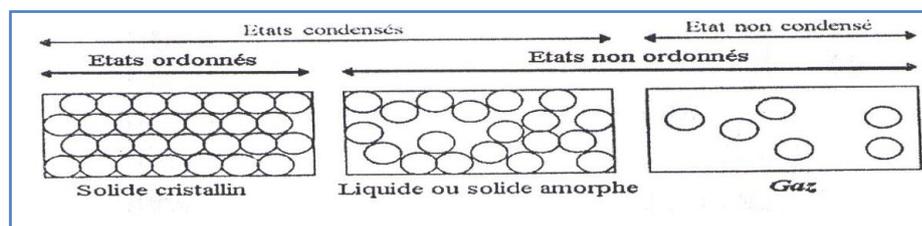


Fig.I.16: Illustration des différents états de la matière [24].

Quant à eux, ils sont aussi appelés caoutchoucs. Ils peuvent être étirés de plusieurs fois leur longueur d'origine, et reprennent leur forme initiale sans déformation permanente. Les molécules de ces polymères sont désordonnées. Les élastomères possèdent une excellente capacité d'absorption des chocs. Ils sont utilisés dans la fabrication des pneumatiques, des matelas, des semelles de chaussures.

- **Polymères Semi-Cristallins**

Les polymères semi-cristallins sont utilisés à une température qui se situe entre la température de transition vitreuse de leur phase amorphe et la température de fusion de leur phase cristalline. Ceci permet de profiter de la souplesse de la phase amorphe et de la rigidité de la phase cristalline. Leur microstructure est souvent complexe et, en conséquence, la description de leurs propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement bonnes. La structure d'un polymère semi-cristallin est présentée dans la *figure I.17*:

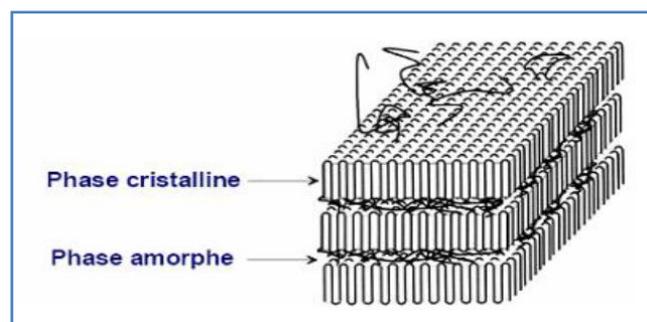


Fig.I.17 : Structure d'un polymère semi-cristallin [25].

I.3.6. Comportement mécanique des polymères

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures, telles que la température, la durée, l'intensité et le type de chargement, les radiations UV et les agents chimiques. Leur module d'élasticité est en général inférieur de deux ordres de grandeur environ à celui des métaux. Les caractéristiques de résistance peuvent différer d'un ordre de grandeur seulement. Le concepteur de pièces en matière plastique est donc souvent obligé de prendre également en compte les problèmes de déformation dans le calcul de leur résistance [23].

- ✓ **La cristallinité (ou taux de cristallinité)** correspond au pourcentage en poids de phase cristalline dans le matériau. Les cristaux ont une résistance chimique beaucoup plus élevée que la phase amorphe du même matériau. Les matériaux semi-cristallins sont ainsi généralement beaucoup plus résistants aux solvants organiques que les matériaux amorphes. Cela provient des interactions fortes entre les molécules dans les cristallites, que les solvants ne peuvent dissoudre [23].
- ✓ **La température de fusion d'un polymère (T_f)** est la température à laquelle a lieu son passage de l'état caoutchouteux à l'état liquide, visqueux en pratique. Il n'y a fusion que pour les polymères semi-cristallins, seule la partie cristalline est concernée.
- ✓ **La température de transition vitreuse (T_g)** correspond à la température à laquelle le polymère passe de l'état vitreux à l'état caoutchoutique.
- ✓ **Le taux de réticulation** correspond à la densité de liaisons pontales entre les chaînes. IL est évident que la présence des liaisons covalentes entre les chaînes (polymères thermodurcissables) donne lieu à des propriétés différentes de celles des polymères purement linéaires (matériaux thermoplastiques) dont les seules liaisons intermoléculaires sont des liaisons faibles (Van der Waals, ponts hydrogène etc.). Par exemple, les thermoplastiques peuvent être fondus puis re-solidifiés, alors que les thermodurcissables se décomposent à haute température mais ne fondent pas [28].

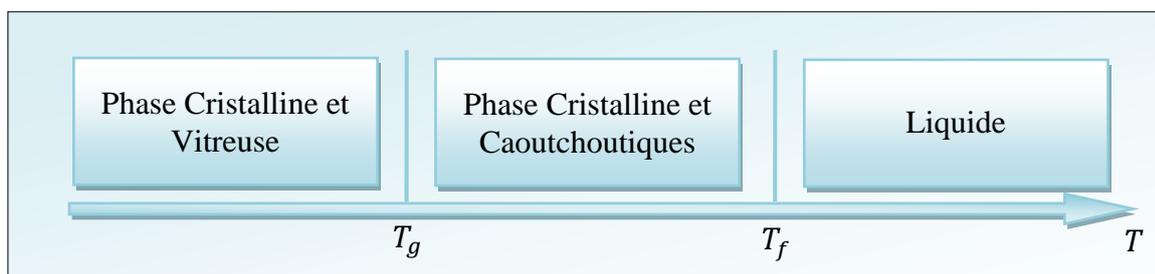


Fig.I.18: Températures T_g et T_f .

I.4. Polymères composites

I.4.1. Définition d'un composite

Un matériau composite est un matériau réunissant au moins deux composants. Ces matériaux ne sont pas miscibles mais présentent une forte capacité d'adhésion. L'association de ces éléments conduit à un matériau dont les propriétés sont supérieures à la simple addition des propriétés des éléments prisent séparément (synergie).

Les composites présentent les avantages suivants :

- ✓ Grande résistance à la fatigue ;
- ✓ Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur ;
- ✓ Insensibles aux produits chimiques ;
- ✓ Bonne résistance à la corrosion ;
- ✓ Vitesse de fissuration faible et constante ;
- ✓ Meilleure répartition des contraintes ;
- ✓ Meilleure résistance au niveau des points d'assemblage ;
- ✓ Meilleure résistance aux impacts ;
- ✓ Poids moins élevé.

I.4.2. Renforts

Il se présente sous forme fibreuse et est généralement constitué de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers de filaments de très petit diamètre (jusque 10 μm à 12 μm), à très hautes performances mécaniques et de faible masse volumique. Ainsi, les fibres de carbone sont constituées de 1 000, 3 000, 6 000 ou 12 000 filaments, dont le diamètre varie entre 6 μm et 12 μm . Cette morphologie particulière du renfort résulte du fait que, lors de son utilisation, une structure n'est pas sollicitée mécaniquement de la même façon dans toutes les directions.

Les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc. Toutefois, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées, et constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 0,3 et 0,7. Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales [18] :

- ✓ Sous forme linéique (fils, mèches, etc.);
- ✓ Sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats, etc.);
- ✓ Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

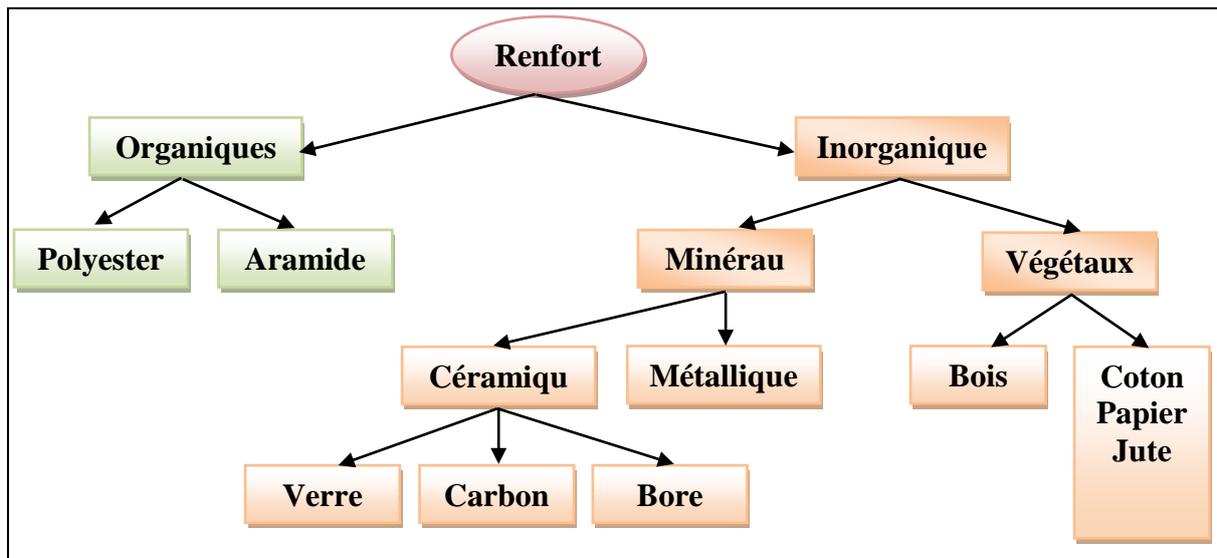


Fig.I.19: Principaux matériaux de renfort.

I.4.3. Fibres de verre

Tableau I.1: Caractéristiques mécaniques des fibres de base [18].

Fibre	Densité	Charge de rupture en traction (MPa)	Charge de rupture en compression (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Diamètre de filament élémentaire (µm)
Verre E	2.54	3400	1200	4.8	73000	3-30
Verre R	2.48	4400	1300	5.4	86000	3-30
Aramide base module	1.45	3100	500	2	70000	12
Aramide haut module	1.45	3100	500	1	130000	12
Carbone haute ténacité	1.78	2800	1800	0.5	200000	8
Carbone haut module	1.8	2200	1300	-	400000	8
Bore	2.63	3500	3500	0.8	400000	100-200
Acier XC 10	7.85	1000	-	-	210000	-
Aluminium	2.63	358	-	-	69800	-

Les fibres de verre sont des matériaux constitués de nombreuses fibres de verre extrêmement fines. C'est le plus utilisé actuellement, du fait de leur excellent rapport qualité/prix. Elles sont obtenues à partir d'un mélange fusible d'oxydes de natures différentes.

La fibre de verre a des propriétés mécaniques à peu près comparables à celles d'autres fibres telles que les polymères et les fibres de carbone. Bien que pas aussi solide ou aussi rigide que la fibre de carbone, il est beaucoup moins cher et nettement moins fragile lorsqu'il est utilisé dans les composites.

I.4.4. Matrice

Les fibres ne peuvent être utilisées seules, il est nécessaire de les placer dans un produit d'emballage, la matrice. Trois familles principales de matériaux fibreux correspondent à des matrices de nature différente : organique, métallique ou céramique.

Les plus répandus actuellement sont les matériaux composites à matrice organique, l'emploi de composites à matrice métallique ou céramique restant très limité.

I.4.5. Polyétheréthercétone GF 30 (PEEK GF 30)

Le PEEK GF 30 (Polyétheréthylcétone renforcé à 30 % de fibres de verre) est un polymère thermoplastique de haute performance, offrant une combinaison exceptionnelle de propriétés mécaniques et thermiques. Ce matériau est fabriqué par l'ajout de 30 % de fibres de verre à une matrice de PEEK, ce qui améliore significativement la rigidité, la résistance à l'usure, la résistance à la traction et la stabilité dimensionnelle, tout en maintenant une excellente résistance chimique et thermique. Il peut supporter des températures allant jusqu'à 250°C de manière continue.

Le PEEK GF 30 est utilisé dans des secteurs où une combinaison de haute performance thermique, mécanique et chimique est nécessaire, notamment : l'aérospatial, l'automobile, l'industrie chimique et les équipements médicaux [30].

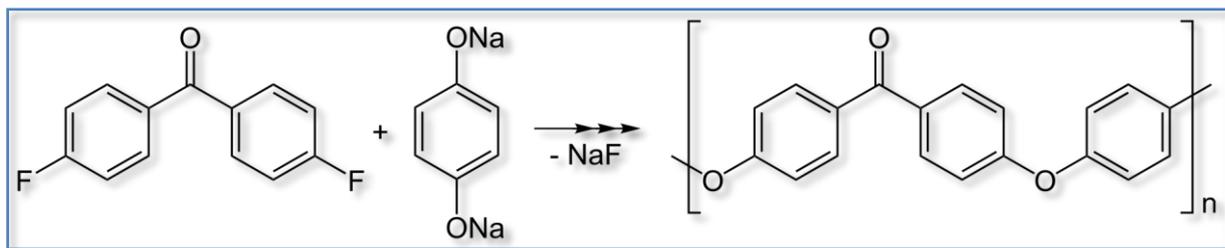


Fig.I.20: Formule chimique du PEEK [31].

Le **PEEK GF 30** est reconnu pour ses excellentes propriétés mécaniques, telles que la résistance élevée, la rigidité et la stabilité dimensionnelle, améliorées grâce à l'ajout de fibres de verre. Ce matériau est couramment utilisé dans des industries où la durabilité et la performance dans des conditions de haute température et de forte contrainte sont cruciales. Les caractéristiques principales sont [30] :

- ✓ Résistance à haute température : Le PEEK a un point de fusion autour de 343°C, ce qui le rend adapté aux applications à haute température.
- ✓ Mécaniques améliorées : Le renfort en fibres de verre augmente la résistance à la traction et la rigidité, le rendant plus résistant à l'usure et à la déformation.
- ✓ Résistance chimique : Le PEEK est résistant à une large gamme de produits chimiques, d'acides et de solvants.
- ✓ Faible friction : Il possède des propriétés de faible usure et de faible friction, ce qui le rend adapté aux pièces mobiles ou aux roulements.

I.5. Travaux de recherches concernant l'usinage de Polyétheréthercétone GF 30 (PEEK GF 30)

Cette partie récapitule la recherche dans la littérature existante reliée à l'usinage de PEEK GF30. L'objectif est de faire une étude à partir de ces articles publiés et de comprendre les travaux accomplis concernant l'usinage de PEEK GF30 jusqu'à nos jours. Dans cette recherche on a trouvé que beaucoup d'auteurs ont étudié l'influence de la matière à usiner, le rôle du revêtement et les paramètres de coupe optimaux, l'usure de l'outil, l'influence de revêtements, l'influence de différents types de substrats et l'effet de l'usinage à sec sur l'usinabilité du polyétheréthercétone GF30. Plusieurs articles ont été publiés dans ces domaines, parmi eux on cite :

J. Paulo Davim et Pedro Reis [32], ont présenté dans cet article l'étude de l'influence des paramètres d'entrée qui sont la vitesse de coupe (V_c) et l'avance par tour (f). Les paramètres de sortie choisis par les auteurs sont : la puissance de coupe (P_c), pression de coupe spécifique (K_s), la rugosité de surface (R_a) et la précision dimensionnelle (IT), et cela lors du tournage du polymère renforcé par 30 % de fibre de verre (PEEK GF30) par deux types de plaquettes (PCD) et (K20). Un plan d'expériences orthogonal de type Taguchi (L9) a été adopté par les auteurs pour réaliser l'analyse de la variance (ANOVA) afin de déterminer l'influence en pourcentage de chaque paramètre d'entrée.

La [figure I.21](#) représente le porte-outil (STGCL 2020 K16 (ISO)) employé pour la réalisation des expériences.

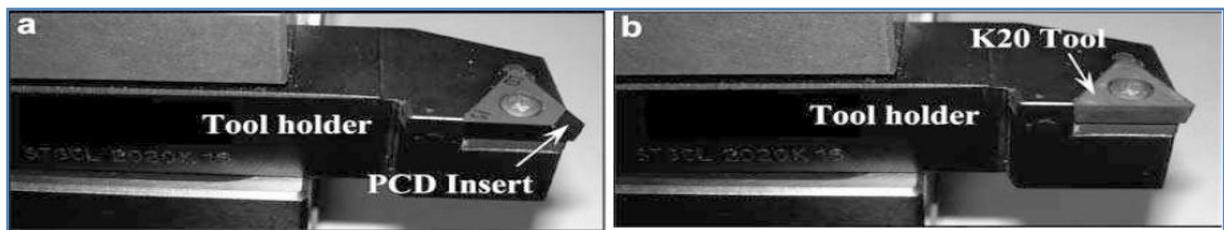


Fig.I.21: Porte-outils utilisés dans les expériences pour les deux cas (PCD) et (K20).

La [figure I.22](#) présente la variation de la puissance de coupe (P_c) en fonction de l'avance par tour (f) pour différentes valeurs de vitesse de coupe (V_c) et cela pour les deux types de plaquette (PCD et K20).

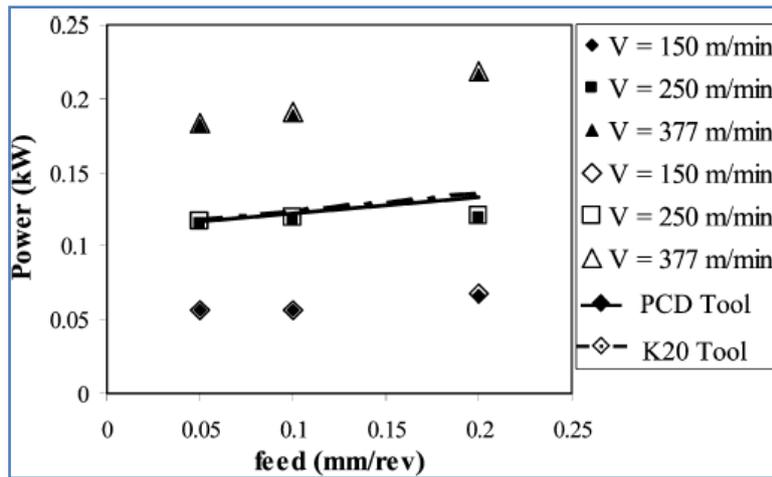


Fig.I.22 : Puissance de coupe (P_c) en fonction de (V_c) et (f) pour les deux outils.

Sur la base des résultats expérimentaux présentés, les conclusions suivantes peuvent être tirées par les auteurs :

- ✓ La puissance augmente avec l'augmentation de (V_c) et (f).
- ✓ Pour les deux outils, la vitesse de coupe est le paramètre de coupe qui a la plus grande influence sur la puissance avec des pourcentages de : 96.9 et 96.8 % pour (PCD) et (K20), respectivement.
- ✓ La pression de coupe spécifique diminue avec l'avance par tour et augmente avec la vitesse de coupe.
- ✓ Les outils PCD et K20 présentent les mêmes valeurs de P_c et de K_s dans le cas d'utilisation des mêmes paramètres de coupe (vitesse de coupe et l'avance par tour).
- ✓ L'avance (f) est le paramètre de coupe qui a la plus grande influence sur la pression de coupe spécifique avec : 93.3 et 93.6 % pour (PCD) et (K20), respectivement.
- ✓ La rugosité de surface (R_a) et IT augmentent avec l'avance (f) et diminuent avec la vitesse de coupe.
- ✓ L'outil en PCD présente de meilleures performances que l'outil K20 en termes de (R_a), c'est-à-dire que la qualité de surface est meilleure avec les mêmes conditions de coupe.
- ✓ L'avance est le paramètre de coupe le plus significatif sur la rugosité de surface avec des contributions de : 99,1 % pour PCD et 95,5 % pour K20.

J. Paulo Davim et al [33], ont étudié l'influence des paramètres de coupe qui sont : la vitesse de coupe et l'avance par tour lors de l'usinage de PEEK renforcé par 30 % en fibres de verre et non renforcé, sur les paramètres de sortie : l'effort d'usinage (F_m), la pression de coupe spécifique (K_s), la rugosité de surface (R_a) et la précision dimensionnelle (IT). Un plan d'expériences, basé sur la méthodologie de Taguchi (L9), a été établi donnant neuf combinaisons orthogonales entre elles, reliant des vitesses et des avances par tour variant

entre 150 ; 250 et 377 (m/min) et 0.05 ; 0.1 et 0.2 (mm/tr), respectivement. L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée pour étudier le degré d'influence des paramètres technologiques lors du tournage de PEEK par un outil de coupe en diamant polycristallin (PCD).

Dans le [tableau I.2](#), les résultats de l'ANOVA donnant l'influence des paramètres de coupe en pourcentage sur la rugosité de surface ont été présentés par les auteurs.

Tableau I.2: ANOVA pour la rugosité de surface (Ra) des deux matériaux.

Source of variance	SDQ	D_f	Variance	Test F	$F_{\alpha} = 5\%$	P (%)
<i>PEEK</i>						
V (m/min)	6.21E-02	2	3.10E-02	2.69	6.94	0.5
f (mm/rev)	7.53E+00	2	3.77E+00	327.02	6.94	98.3
Error	4.61E-02	4	1.15E-02	/	/	1.2
Total	7.64E+00	8	/	/	/	100.0
<i>PEEK GF30</i>						
V (m/min)	4.35E-02	2	2.17E-02	2.92	6.94	0.3
f (mm/rev)	9.91E+00	2	4.95E+00	666.57	6.94	99.1
Error	2.97E-02	4	7.43E-03	/	/	0.6
Total	9.98E+00	8	/	/	/	100.0

Les propriétés mécaniques et thermiques du PEEK et du PEEK (GF30) sont décrites dans le [tableau I.3](#).

Tableau I.3: Propriétés mécaniques et thermiques du matériau composite PEEK et PEEK (GF30) provenant de la société ERTA.

Mechanical and thermal properties	PEEK	PEEK GF30	Unit
Elastic shear modulus (G)	4800	8900	N/mm ²
Tensile modulus (E)	4200	8100	N/mm ²
Hardness ASTM D2240 (Shore D)	85	86	–
Charpy impact resistance	–	30	KJ/m ²
Tensile strength	110	160	N/mm ²
Glass transition temperature (T_g)	143	143	°C
Melting temperature	340	340	°C
Density	1.31	1.5	kg/m ³
Coefficient of thermal expansion (<150 °C)	5E-05	2.5E-05	m/m K
Coefficient of thermal expansion (>150 °C)	11E-05	5.50E-05	m/m K

La [figure I.23](#) représente une plateforme Kistler dynamomètre piézoélectrique 9121 avec amplificateur de charge employée pour acquérir les trois composantes de l'effort de tournage (axiale, radiale et tangentiel). Les acquisitions de données ont été effectuées par le biais du dynamomètre piézoélectrique par interface RS-232 pour charger l'amplificateur et un PC en utilisant le logiciel approprié Dynoware-Kistler.

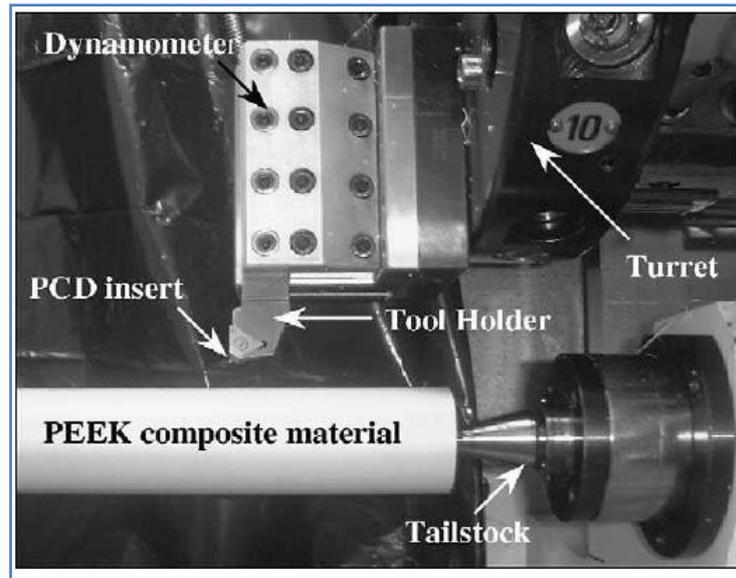


Fig.I.23 : Mesure des forces de coupe (F_c , F_f et F_d) avec un dynamomètre piézoélectrique Kistler 9121.

Sur la base des résultats expérimentaux présentés, les conclusions suivantes peuvent être tirées du tournage d'échantillons de PEEK et de PEEK GF30 fabriqués par extrusion :

- ✓ L'effort d'usinage diminue avec les deux paramètres de coupe (V_c et f).
- ✓ Pour les deux matériaux, et selon l'ANOVA, la vitesse de coupe est le paramètre qui a une influence significative sur la force d'usinage avec une contribution de : 61.3 % et 83.6 % PEEK et PEEK GF30, respectivement.
- ✓ La pression de coupe spécifique (K_s) est inversement proportionnelle à l'avance en revanche, (K_s) augmente avec l'augmentation de (V_c).
- ✓ Le matériau composite PEEK GF30 donne des valeurs de F_m et de K_s inférieures que le PEEK, et cela pour les mêmes valeurs des paramètres de coupe (vitesse de coupe et l'avance).
- ✓ L'avance est le paramètre de coupe qui a la plus grande influence sur la pression de coupe spécifique, 96.9 % et 93.3 %, pour les deux matériaux (PEEK et PEEK GF30), respectivement.
- ✓ La rugosité de surface (R_a) et IT augmentent avec l'avance et diminuent avec la vitesse de coupe.
- ✓ Le PEEK présente une meilleure performance que le PEEK GF30, c'est-à-dire que la qualité de surface est meilleure, sous les mêmes paramètres de coupe.
- ✓ L'avance est le paramètre de coupe qui a une influence élevée sur la rugosité de surface (98.3 % et 99.1 %) pour les deux matériaux PEEK et PEEK GF30, respectivement.

- ✓ Il a été possible d'obtenir des qualités de surface (précision dimensionnelle) dans le matériau composite PEEK et PEEK GF30 de construction mécanique de précision, nommé IT 6 avec des paramètres de coupe appropriés.

Gökçe Özden et al [34], ont réalisé une étude comparative entre trois types de polymères lors du tournage de PEEK non renforcé, PEEK renforcé CF 30 et PEEK GF 30 à l'aide des outils de coupe K15 et PCD, et cela pour prédire l'effort de coupe en utilisant deux modèles statistiques qui sont : l'ANN et ANFIS. Les auteurs ont utilisé les paramètres : l'avance par tour (F_r), vitesse de coupe (C_s), type de matériaux T_m et l'outil de coupe (C_t) comme des paramètres d'entrées. La [figure 1.24](#) représente l'architecture de réseau de neurones nécessaire pour les calculs. Les auteurs ont employé une couche d'entrée et une autre de sortie avec deux couches cachées intermédiaire.

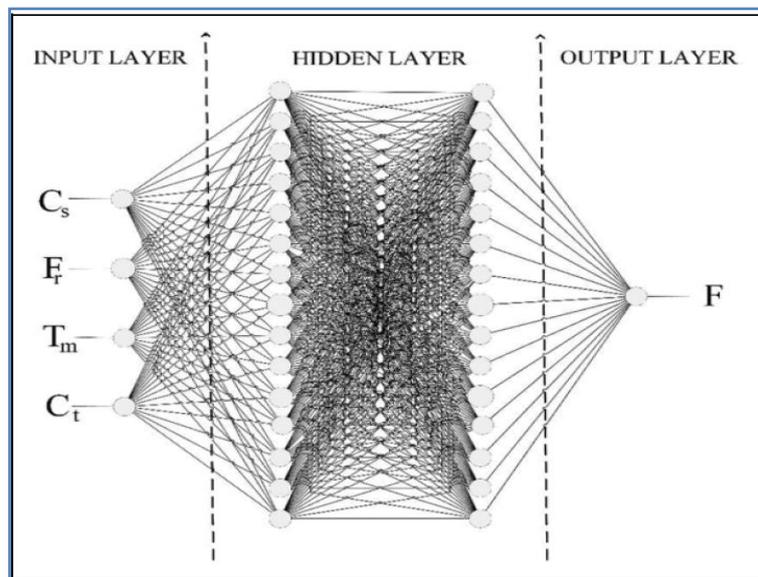


Fig.I.24: Architecture des réseaux de neurones artificiels ; vitesse de coupe (C_s), vitesse d'avance (F_r), outil de coupe (C_t) et type de matériau T_m , force (F).

Les figures ([figure 1.25](#) et [figure 1.26](#)) représentent une comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs issues des modèles ANN et ANFIS. Les auteurs ont mis comme critère de comparaison le coefficient de déterminations (R^2) et l'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE). Le [tableau 1.4](#) rassemble les valeurs obtenues de ces deux critères de comparaison.

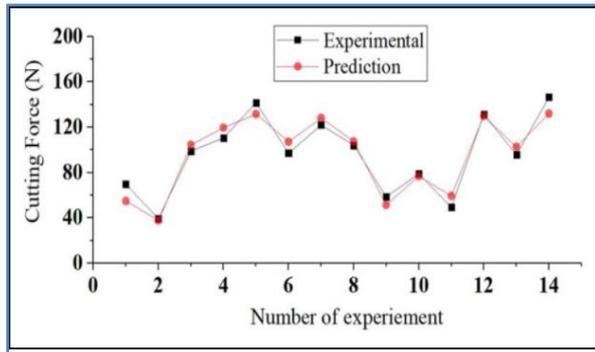


Fig.I.25: Comparaison des résultats expérimentaux et tests de la force de coupe du modèle de réseau neuronal artificiel.

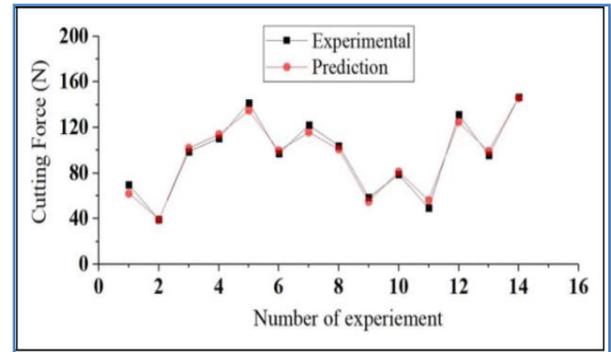


Fig.I.26: Comparaison des résultats expérimentaux et tests de la force de coupe du modèle d'inférence floue adaptif-neuronale.

Tableau I.4: Valeurs statistiques de la force de coupe des modèles conçus pour les réseaux neuronaux artificiels (ANN) et le système d'inférence floue adaptative-neuronale (ANFIS).

Statistical parameters	ANN		ANFIS
	Training set	Testing set	Testing set
MAPE	0.0090	0.0871	0.0468
R ²	0.9952	0.9321	0.9812

Les auteurs ont conclu que la méthode ANFIS donne de meilleurs résultats comparés à la méthode ANN, et cela dans le cas de tournage des polymères renforcés et non renforcés (PEEK, PEEK CF 30 et PEEK GF 30) par des outils de coupe K15 et PCD.

Dans un autre travail de **Shang Gao et al** [35], les principaux matériaux mis en étude sont : le PEEK pur, le PEEK renforcé par des fibres de carbone courtes (CF/PEEK) et le PEEK renforcé par des fibres de verre courtes (GF/PEEK). Les effets du type de fibre et de la fraction massique sur la résistance à la traction, la dureté et le module élastique des matériaux ont été discutés en utilisant l'essai de traction et les expériences de nano-indentation.

En outre, l'usinabilité du PEEK renforcé par fibres a été étudiée à l'aide d'expériences de ponçage avec des papiers abrasifs de différentes tailles de mailles. Les résultats présentés par les auteurs ont montré que la dureté et le module d'élasticité du PEEK pourraient être améliorés avec la fraction de masse des fibres, et la résistance à la traction du CF/PEEK peut être améliorée par rapport à celle du GF/PEEK. Pour les mêmes conditions de ponçage, les taux d'enlèvement de matière des matériaux renforcés de fibres se sont avérés inférieurs au PEEK pur en raison de la dureté plus élevée de la fibre. Les résultats des auteurs montrent que la rugosité de surface du matériau PEEK peut être améliorée par renforcement des fibres.

Dans la *figure 1.27*, les auteurs ont étudié l'effet du pourcentage des fibres de carbone et de verres et cela sur la charge supportée par les pièces tout en variant la profondeur de ponçage.

Il a été observé que la profondeur de ponçage dans le cas du PEEK pur est supérieure à la profondeur de PEEK CF et PEEK GF, et ce pour un même chargement, ce qui prouve que la dureté des fibres est supérieure à la dureté du PEEK pur.

De plus, la profondeur de ponçage dans les deux cas PEEK CF10/30 et PEEK GF 10/30 est inférieure que le PEEK pur pour les mêmes conditions de ponçage.

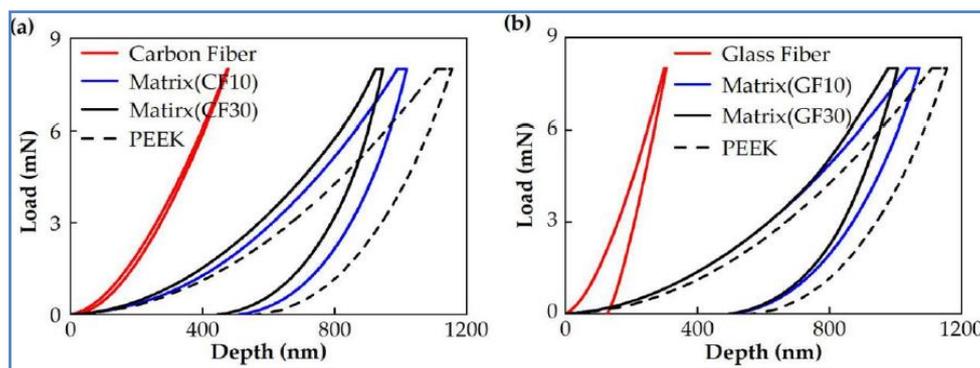


Fig.I.27 : Courbes charge-profondeur (P-h) pour :(a) PEEK (CF/PEEK) et (b) PEEK (GF/PEEK).

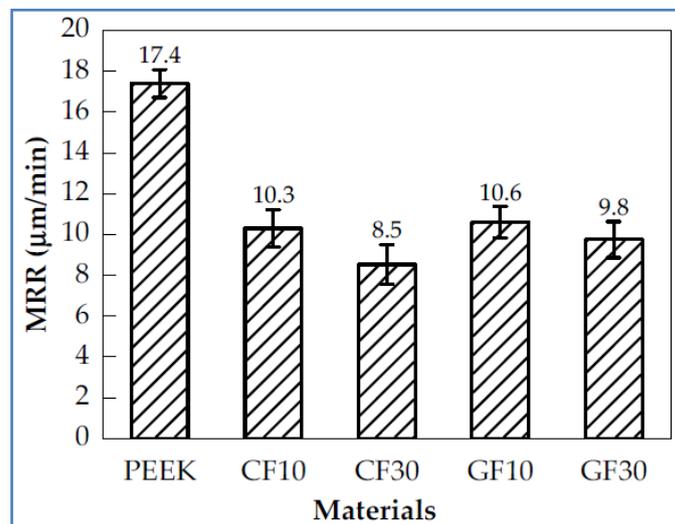


Fig.I.28: Taux d'enlèvement de matière du PEEK pur et des fibres renforcées.

Dans la *figure 1.29*, la rugosité de surface du CF10/PEEK était inférieure à celle du GF10/PEEK, ce qui correspond à la même tendance entre le CF30/PEEK et le GF30/PEEK. Le CF/PEEK présentait une meilleure usinabilité que le GF/PEEK.

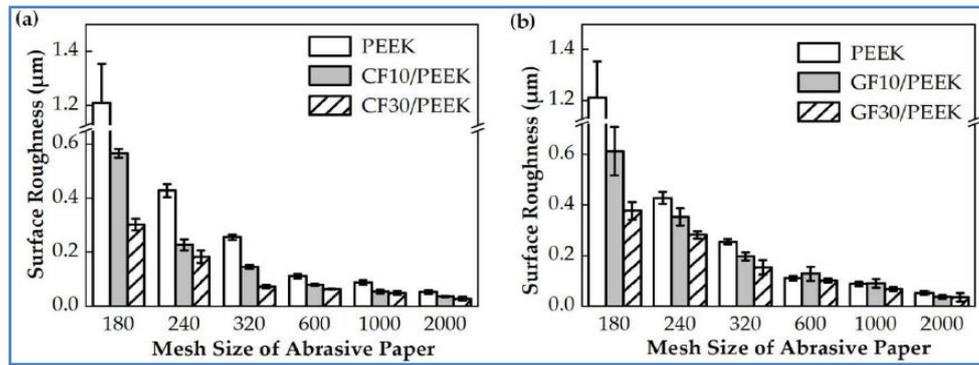


Fig.I.29 : Analyse comparative sur la rugosité de surface des types de fibres : (a) La rugosité de surface du PEEK pur, CF10/PEEK et GF10/PEEK, (b) la rugosité de surface du PEEK pur, CF30/PEEK et GF30/PEEK.

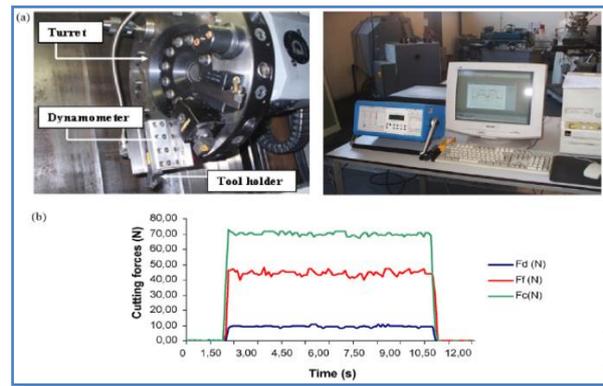
Les conclusions suivantes ont été tirées par les auteurs :

- ✓ Dans le processus de ponçage, le PEEK renforcé par fibres a une meilleure qualité de surface et le MRR est inférieur au PEEK pur en raison des propriétés mécaniques supérieures de la fibre (*figure I.28*).
- ✓ La qualité de surface du CF/PEEK est meilleure que celle du GF/PEEK. La dureté et le module de la fibre de carbone étant plus élevés que ceux de la fibre de verre, cela entraîne une déformation plus faible sur la surface de la matrice PEEK.
- ✓ Plus la fraction de masse est élevée en pourcentage (10%, 30%), plus les propriétés mécaniques du PEEK renforcé par des fibres sont améliorées. Le renforcement de la fibre peut améliorer la qualité et la dureté de la surface dans le cas du PEEK pur, le PEEK renforcé par des fibres en carbone et en fibre de verre.
- ✓ L'augmentation en fraction de masse (10%, 30%) pour les deux matériaux (PEEK/CF et PEEK/GF) permet d'obtenir un état de surface meilleur tout en réduisant le MRR (*figure I.28*).

Francisco Mata et al [36], ont réalisé une étude concernant les relations entre les conditions de coupe (vitesse de coupe et l'avance) sur deux aspects de l'usinabilité, à savoir la puissance (P_c) et la pression de coupe spécifique (K_s) en développant des modèles mathématiques de second ordre basés sur la méthodologie de surface de réponse (RSM) lors de l'usinage des composites PEEK non renforcés et renforcés à l'aide des outils en diamant poly-cristallins (PCD), le montage expérimental est illustré dans la *figure I.30*. Les expériences ont été planifiées selon un plan factoriel complet L_{12} (FFD) des expériences (Tableau I.6). Les trois types de composites utilisés pour les essais d'usinage sont : PEEK pure, PEEK CF 30 et PEEK GF 30.

Tableau I.5: Plan expérimental factoriel complet.

Trial no.	Levels of input parameters		Actual setting values of input parameters	
	v	f	v (m/min)	f (mm/rev)
1	1	1	50	0.05
2	1	2	50	0.1
3	1	3	50	0.15
4	1	4	50	0.2
5	2	1	100	0.05
6	2	2	100	0.1
7	2	3	100	0.15
8	2	4	100	0.2
9	3	1	200	0.05
10	3	2	200	0.1
11	3	3	200	0.15
12	3	4	200	0.2

**Fig.I.30:** Mesure des efforts de coupe avec un dynamomètre piézoélectrique Kistler 9121.

L'analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour déterminer la contribution de chaque paramètre technologique (V_c et f) et par la suite tirer les modèles théoriques.

L'analyse paramétrique révèle que, la puissance (P) augmente avec l'augmentation de l'avance par tour alors que la pression de coupe spécifique (K_s) diminue pour tous les matériaux testés. Les valeurs calculées de la puissance et de la pression de coupe spécifique pour les matériaux composites PEEK, PEEK CF 30 et PEEK GF 30 sont illustrées dans les [tableaux I.6 et I.7](#), respectivement.

Tableau I.6: Valeurs calculées de (P_c) selon le plan expérimental (L_{12}).

Trial no.	Power (W)		
	PEEK	PEEK CF 30	PEEK GF 30
1	30.85	29.59	37.68
2	50.46	51.76	59.09
3	68.55	78.53	78.29
4	82.19	103.12	96.6
5	89.16	65.22	69.32
6	108.45	109.79	112.98
7	139.72	170.17	150.55
8	166.71	197.24	185.39
9	110.26	124.68	133.93
10	193.14	167.37	226.87
11	258.97	291.67	304.5
12	314.69	385.28	373.73

Tableau I.7: Valeurs calculées de (K_s) selon le plan expérimental (L_{12}).

Trial no.	Specific cutting pressure (MPa)		
	PEEK	PEEK CF 30	PEEK GF 30
1	371.7	356.5	454
2	304	311.8	355.95
3	275.3	315.4	314.43
4	247.55	310.6	290.98
5	537.1	392.9	417.6
6	326.65	330.7	340.3
7	280.57	341.7	302.3
8	251.08	297.05	279.2
9	331.1	374.4	402.2
10	290	251.3	340.65
11	259.23	291.97	304.8
12	236.25	289.25	280.58

Dans le [tableau I.6](#), les petites valeurs de la puissance sont observées au premier essai avec : 30.85 W pour le PEEK, 29.59 W pour le PEEK CF 30 et 37.68 W pour le PEEK GF 30. Tandis que les valeurs les plus élevées apparaissent au dernier essai : 314.69 W, 385.28 W et 373.73 W respectivement. Généralement, le PEEK GF 30 consomme plus de puissance par rapport aux autres matériaux, ce qui peut être attribué à la présence de fibres de verre qui ont la caractéristique d'augmenter la dureté du matériau et donc la résistance à la coupe. Le PEEK

CF 30 présente les valeurs de puissance les plus faibles, ce qui suggère que les fibres de carbone améliorent l'usinabilité par rapport aux fibres de verre. Le PEEK pur se situe entre les deux, ce qui montre que l'absence de renforts rend la coupe moins exigeante que le PEEK GF 30 mais plus que le PEEK CF 30.

Le [tableau 1.7](#) montre que les valeurs maximales de la pression de coupe spécifique sont atteintes aux essais numéros 5, 9 et 1 pour le PEEK, PEEK CF30 et PEEK GF30, respectivement. Tandis que les valeurs minimales sont observées pour les essais 12, 10 et 8 pour le PEEK, PEEK CF30 et PEEK GF30, respectivement. Le PEEK GF 30 présente des pressions de coupe généralement plus élevées par rapport au PEEK pur et au PEEK CF 30, ce qui est cohérent avec la dureté accrue due à la présence des fibres de verre. Le PEEK CF 30 a des valeurs de pression plus faibles, suggérant une meilleure usinabilité grâce aux fibres de carbone.

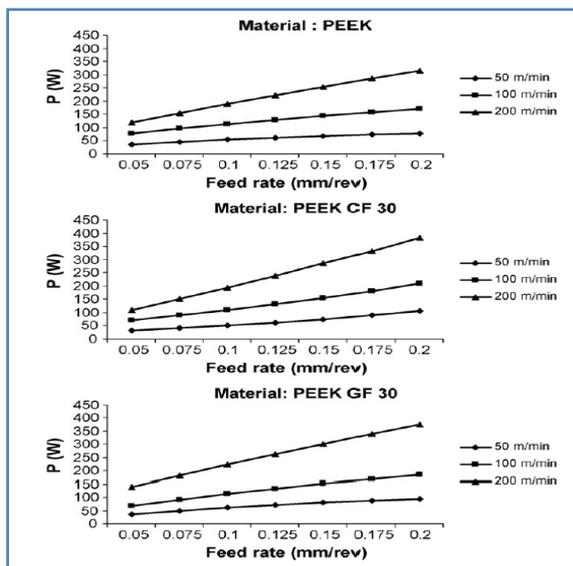


Fig.I.31: Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la puissance (P).

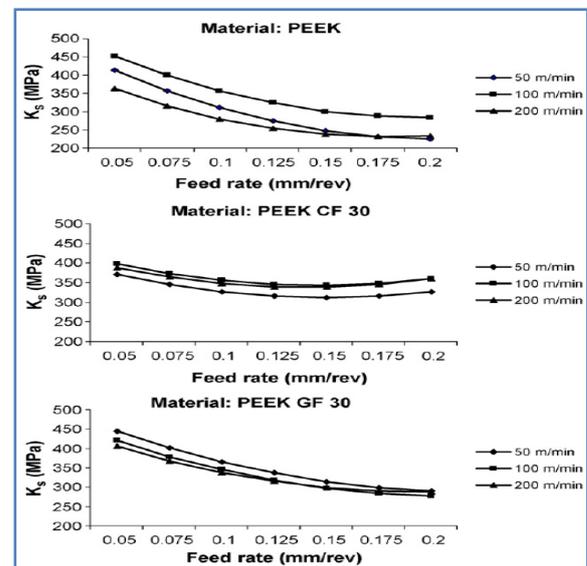


Fig.I.32: Effet de la vitesse de coupe et de l'avance sur la pression spécifique (K_s).

Sur la base des essais expérimentaux et des recherches effectuées, les conclusions suivantes sont tirées :

- ✓ Pour tous les composites testés, à une vitesse de coupe choisie, la puissance augmente avec l'augmentation de l'avance, alors que la pression de coupe spécifique diminue ([figure I.32](#)).
- ✓ L'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance simultanément induit une augmentation de la puissance ([figure I.31](#)).
- ✓ L'évaluation des performances indique que les caractéristiques d'usinabilité des matériaux PEEK CF 30 et PEEK GF 30 sont inférieures par rapport au PEEK. Bien

que l'ajout de renforts au PEEK améliore les propriétés du matériau, mais au prix d'une puissance et d'une pression de coupe spécifique élevée.

I.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases nécessaires à la compréhension de cette étude. Ce chapitre comporte une partie de rappel des mécanismes de la coupe des métaux tels que : la définition de l'usinabilité des matériaux, l'évaluation de l'usinabilité, les paramètres de coupe (la vitesse de coupe, la profondeur de passe, l'avance, etc). Puis une partie est dédiée aux définitions et présentations des matériaux polymères. La dernière partie traite l'état de l'art sur l'usinabilité des polymères ainsi que les méthodes d'optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage des polymères.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, un banc d'essais comportant un tour, une plateforme pour l'acquisition des efforts de coupe, un Rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée, une caméra thermographie IR pour la mesure de la température et un microscope.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique à l'Université du 8 Mai 1945, Guelma.

II.2. Matériels utilisés

II.2.1. Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle **SN40C** de puissance sur la broche égale à 6.6KW (*figure II-1*).

Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont comme suit (45 ; 63 ; 90 ; 125 ; 180 ; 250 ; 355 ; 500 ; 710 ; 1000 ; 1400 ; 2000) tr/min.

Les avances disponibles sont : (0,08 ; 0,10 ; 0,11 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,18 ; 0,20 ; 0,22 ; 0,24...0,8) mm/tr.



Fig.II.1 : Tour parallèle modèle SN40C.

II.2.2. Matériau et éprouvette utilisés

Le matériau utilisé dans cette étude est le polyétheréthercétone GF 30 (PEEK GF 30). Il s'agit d'un polymère composite constitué d'une matrice polymère (PEEK) renforcée par des fibres de verre (30%). Ce matériau présente une anisotropie marquée et offre d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. Il se distingue par une résistance élevée aux températures élevées, aux produits chimiques et à l'usure, tout en conservant une densité relativement faible par rapport aux métaux, ce qui en fait un choix privilégié pour les applications exigeantes (voir *tableau II.1*).

Apparu récemment, ce matériau trouve un usage dans de nombreux secteurs : Aérospatiale, Automobile, Médical et Industrie chimique.

Grâce aux recherches que nous avons menées, on peut dire que le PEEK pur est un polymère de haute performance offrant une excellente résistance thermique (250°C), chimique et électrique, avec une bonne flexibilité et un faible coefficient de frottement. Le PEEK GF 30 (renforcé avec 30% de fibres de verre) est plus rigide, plus résistant mécaniquement et à l'usure, mais légèrement moins isolant et moins résistant aux agents chimiques. Le PEEK pur convient aux applications nécessitant une bonne isolation électrique et résistance chimique, tandis que le PEEK GF 30 est idéal pour les pièces mécaniques soumises à de fortes contraintes.

L'éprouvette utilisée pour les essais d'usinage (rugosité de surface et des efforts de coupe) possède un diamètre $d = 80$ mm et une longueur $l = 400$ mm avec plusieurs paliers de 20 mm de longueurs séparées par des gorges de 5 mm (*figure II.2*).

Tableau II.1: les propriétés techniques du PEEK GF30 [37].

<i>Générales</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Densité	1.45	g/m^3
Absorption de l'eau	0.6	%
<i>Mécaniques</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Résistance à la traction	190	MPa
Allongement à la traction	2	%
Résistance à la flexion	275	MPa
Module de flexion	11	GPa
Résistance à la compression	300	MPa
Résistance au choc	7	KJ/m^2
<i>Thermiques</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Point de fusion	343	°C
Conductivité thermique	0.3	$W/m \times ^\circ C$
Température de déformation thermique	315	°C
<i>Électriques</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>
Résistance de surface	$>10^{12}$	Ω
Résistance volumique	$>10^{12}$	$\Omega \times cm$
Résistance diélectrique	23	KV/mm

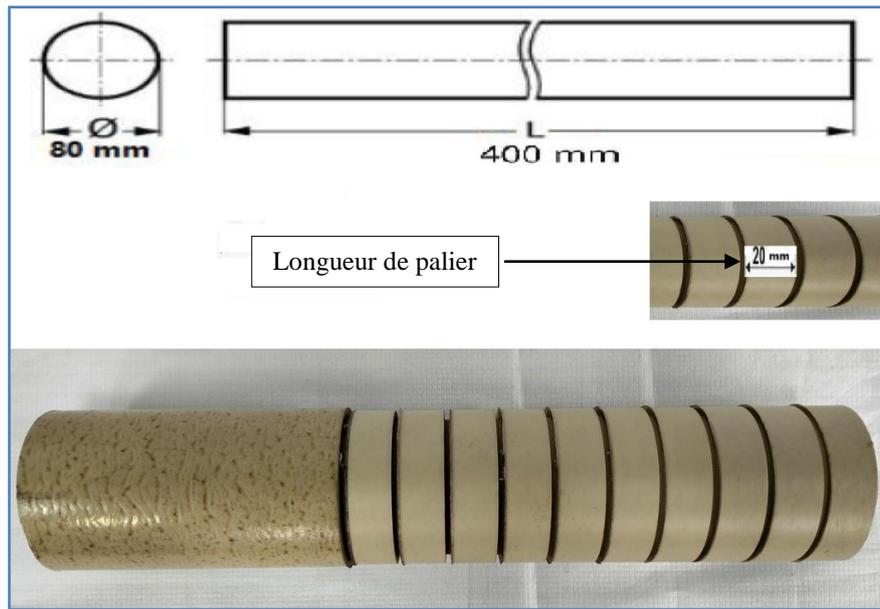


Fig.II.2 : Éprouvette utilisée pour les essais.

II.2.3. Plaquette et porte-outils utilisés

Les opérations de tournage ont été effectuées par une plaquette revêtue en carbure métallique de forme triangle type TCMT 16 T3 04-PM 4325 (*figure II.3*) fixée par vis sur un porte-outil STECR 25 25 M16 (*figure II.4*).

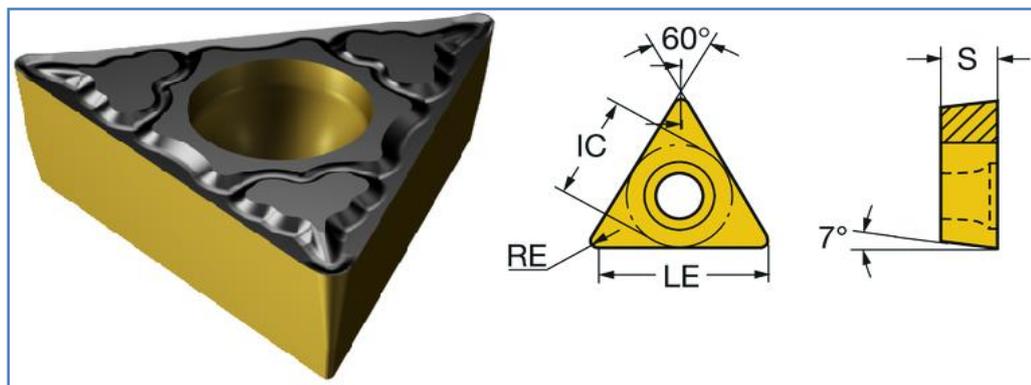


Fig.II.3 : Plaquette de coupe utilisée [38].



Fig.II.4 : Plaquette et porte-outil utilisées.

II.2.4. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (**KISTLER** 9257 B) *figure II.5*, qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézoélectrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation *figure II.6*. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz, *figure II.7*.



Fig.II.5: Dynamomètre (KISTLER9257 B).

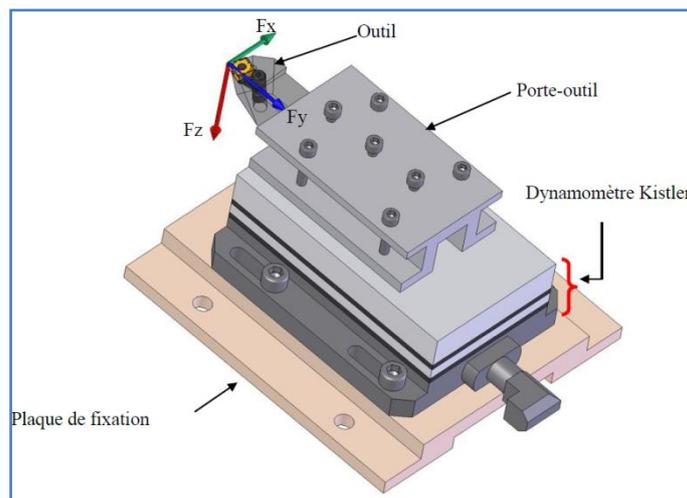


Fig.II.6 : Montage du dynamomètre sur la table de la machine [39].

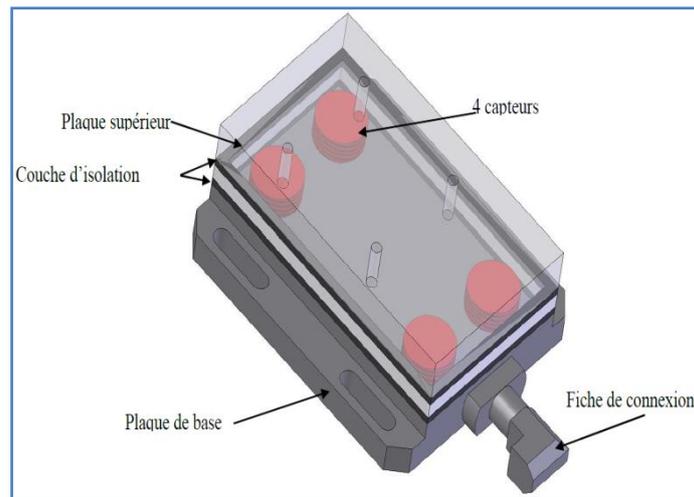


Fig.II.7 : Capteur d'effort de coupe KISTLER [39].

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes.

La *figure II.8* présente un exemple d'acquisition du logiciel (DYNOWARE) qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (effort axial, effort radial et effort tangentiel) en fonction du temps d'acquisition.

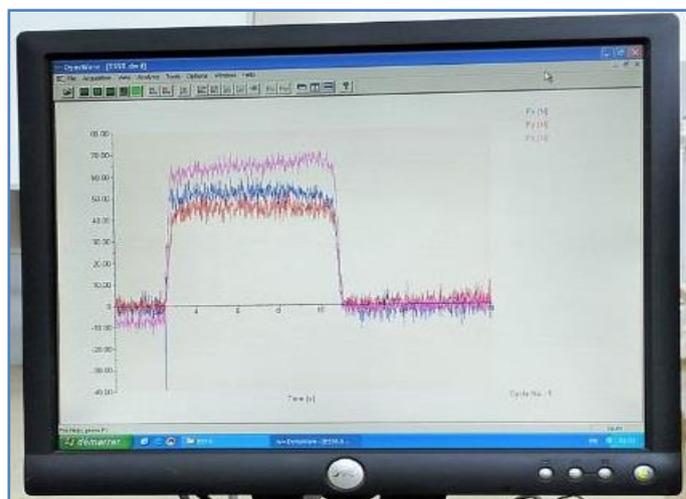


Fig.II.8 : Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

II.2.5. Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à 3 composantes (9257 B) : le porte outil type 9403 visible est employée pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26 *figure II.9*.

- ✓ Grande rigidité, fréquence propre très élevée.
- ✓ Large gamme de mesures.
- ✓ Bonne linéarité, sans hystérésis.
- ✓ Faible interaction (<1%).
- ✓ Utilisation simple (prêt à l'emploi).
- ✓ Construction compacte.
- ✓ Résistant au lubrifiant selon le mode de protection IP 67.
- ✓ Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre).
- ✓ Amplificateur multicanaux, destiné à la mesure des efforts de coupe.
- ✓ Ordinateur personnel (PC).

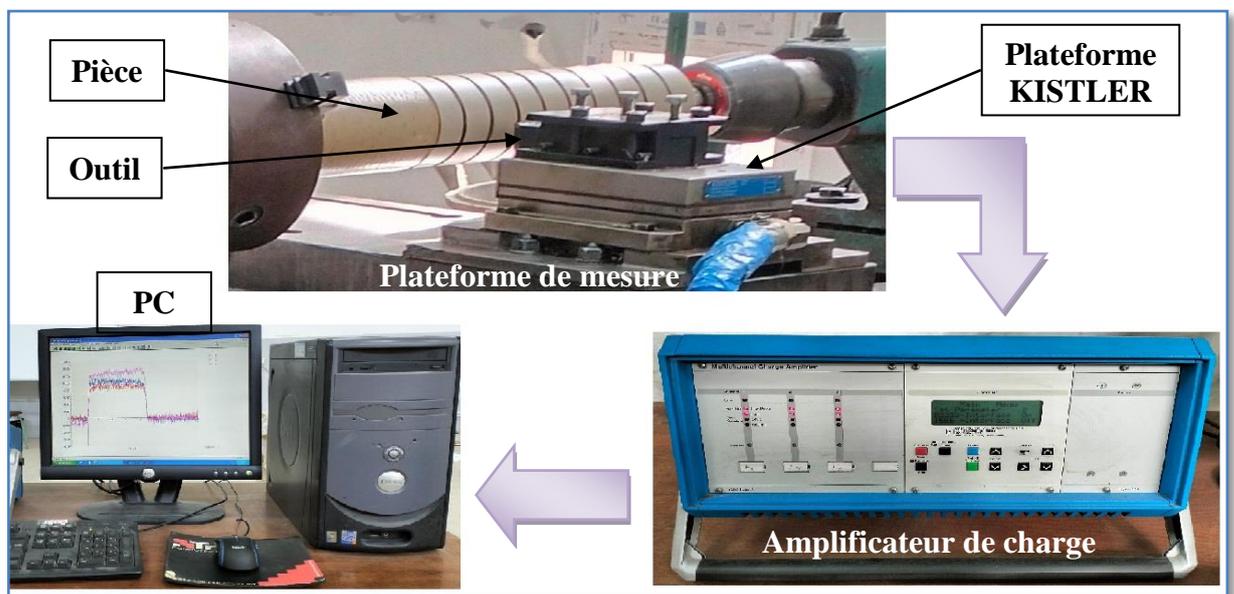


Fig.II.9 : Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II.2.6. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure de la rugosité (R_a), nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) Surf test 201 (Mitutoyo) *figure II.10*. Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation (Cut-off) est maintenue à 4 mm, avec une base de 0,8 mm ($0,8 \times 5$). La plage de mesure des critères de rugosité s'étend de 0,05 à 40 μm pour R_a , et de 0,3 à 160 μm pour R_t et R_z . Les différents critères de la rugosité de surface ont été obtenus instantanément après chaque passage de l'outil. Les mesures ont été répétées trois fois sur trois lignes de cylindre axial séparées à 120° et la moyenne de la mesure a été retenue. La méthode conforme à la norme ISO 4287 a été suivie pour la mesure de la rugosité de surface.

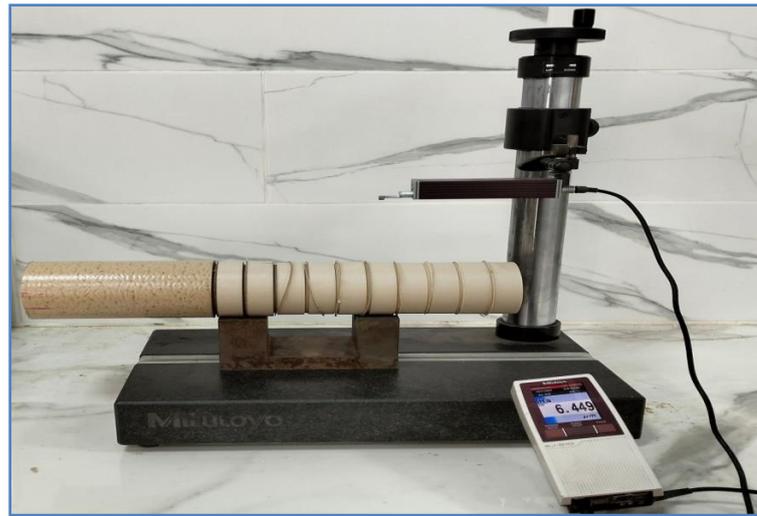


Fig.II.10 : Mesure de rugosité de la pièce.

II.2.7. Caméra thermographie IR pour la mesure de la température

Afin de faire l'acquisition des valeurs de la température générée au niveau de la zone de coupe, nous avons utilisé une caméra thermographie infrarouge modèle RayCAM C.A 1884 (*figure. II.11*). La caméra RayCAM présente un format compact, une facilité d'utilisation et des fonctionnalités puissantes. Cette caméra intègre une technologie de détection hautement avancée, un traitement infrarouge (IR) sophistiqué de l'image et une interface informatique conviviale. Elle présente les caractéristiques suivantes : une gamme de mesure de : $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $1680\text{ }^{\circ}\text{C}$, un laser de mono point avec un réglage d'intervalle (entre 0 et 1) d'émissivité qui est une propriété du matériau essentielle à la bonne détermination de la température de la cible visée. Un logiciel appelé RayCAM report a été développé pour être utilisé conjointement avec une caméra, offrant un ensemble de fonctionnalités avancées pour le traitement d'images. Ce logiciel permet à l'opérateur de visualiser les images infrarouges et de mener des analyses précises par point, par ligne ou par zone. Actuellement, la caméra RayCAM se classe parmi les appareils portatifs de thermographie infrarouge les plus performants [40].



Fig.II.11 : Caméra thermographie infrarouge.

II.2.8. Microscope

Pour l'analyse des copeaux, nous avons utilisé un microscope digital numérique avec un écran large affichant une image en haute résolution (1080 FHD) qui permet une visualisation détaillée en temps réel des objets placés sous l'objectif (*figure II.12*).



Fig.II.12 : Microscope digital numérique.

II.2.9. Autres équipements

- ✓ Un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce.
- ✓ Un téléphone portable pour prendre les photos des différents équipements utilisés.

II.3. Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe (V_c , f , ap), la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). Les conditions de coupe utilisées pour nos essais sont indiquées dans les *tableaux II.2* et *II.3*. Tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

Tableau II.2: Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité.

<i>Paramètres d'entrée</i>	<i>Valeurs</i>
V_c (m/min)	120 ; 170 ; 240 ; 340
f (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 ; 0.20
ap (mm)	0.4 ; 0.8 ; 1.2 ; 1.6

II.4. Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c , f et ap), sont considérés comme paramètres d'entrées. Les efforts de coupe, la rugosité de surface et la température représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

II.4.1. Méthode de planification des expériences

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f , ap) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe et température).

Dans notre cas, nous avons utilisé un plan de Taguchi L_{16} . L'objectif était de réduire le nombre d'essais et par conséquent de minimiser les coûts et le temps nécessaires pour mener les expériences. Le [tableau II.3](#) illustre la matrice de codification et planification pour un plan de Taguchi L_{16} , qui présente les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les divers régimes de coupe. Il montre également la codification des facteurs utilisée. Les essais ont été numérotés de 1 à 16.

Tableau II.3 : Matrice de codification et planification pour un plan de 16 essais.

N° Essai	Valeurs codée			Paramètres d'usinage		
	X1	X2	X3	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	1	1	1	120	0.08	0.4
2	1	2	2	120	0.12	0.8
3	1	3	3	120	0.16	1.2
4	1	4	4	120	0.20	1.6
5	2	1	2	170	0.08	0.8
6	2	2	1	170	0.12	0.4
7	2	3	4	170	0.16	1.6
8	2	4	3	170	0.20	1.2
9	3	1	3	240	0.08	1.2
10	3	2	4	240	0.12	1.6
11	3	3	1	240	0.16	0.4
12	3	4	2	240	0.20	0.8
13	4	1	4	340	0.08	1.6
14	4	2	3	340	0.12	1.2
15	4	3	2	340	0.16	0.8
16	4	4	1	340	0.20	0.4

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. Les propriétés techniques des éprouvettes et les caractéristiques des outils de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été choisies. Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les différents résultats des essais réalisés.

Chapitre III

Analyse statistique et

Modélisation des performances

III.1. Introduction

Ce chapitre présente une analyse approfondie des résultats expérimentaux obtenus lors du tournage du polymère polyétheréthercétone renforcé à 30 % de fibres de verre (PEEK GF 30 %) à l'aide d'un outil de coupe en carbure revêtu.

L'étude s'articule en deux parties principales : dans un premier temps, l'analyse statistique ensuite, l'accent est mis sur la modélisation des paramètres technologiques, notamment : la composante de l'effort de coupe (F_z), la rugosité de surface (R_a), la température de coupe (T), la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeaux enlevé (MRR), en fonction des conditions de coupe définies par: la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p).

L'exploitation des données a été réalisée à l'aide de la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) et de l'analyse de la variance (ANOVA). Cette approche statistique a permis d'identifier les facteurs influents ainsi que leurs interactions, ayant un impact significatif sur les paramètres étudiés. Par ailleurs, les modèles mathématiques obtenus permettent d'établir des relations quantitatives précises entre les conditions de coupe et les performances du procédé, contribuant ainsi à une optimisation efficace des paramètres d'usinage.

III.2. Analyse de la variance (ANOVA) et MSR

III.2.1. L'ANOVA

L'analyse de la variance (ANOVA) est une technique statistique couramment utilisée pour évaluer l'influence des variables indépendantes sur les réponses de sortie. Plutôt que d'analyser directement les données, elle permet de déterminer le pourcentage de contribution de chaque facteur à la variabilité (variance) des résultats. Le tableau ANOVA comprend la somme des carrés (SC) et les degrés de liberté (DF) [41].

Le (SC) est utilisé pour estimer le carré de l'écart par rapport à la moyenne. Il est exprimé par l'équation:

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (III.1)$$

$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ La moyenne des réponses, la réponse moyenne observée dans les expériences où \bar{y} le facteur f prend son niveau $i^{\text{ème}}$, N : nombre total d'expériences, N_{nf} : niveau de chaque facteur f .

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté.

$$M_c = \frac{SC_f}{df_i} \quad (III.2)$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice F-value est utilisé avec la base que les valeurs de F-calculées devraient être supérieures à celles obtenues à partir du F-table.

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (\text{III.3})$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA (Cont. %), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$\text{Cont. \%} = \frac{SC_s}{SC_t} \times 100 \quad (\text{III.4})$$

III.2.2. Méthodologie des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponse est un ensemble de techniques mathématiques qui se base sur la conception expérimentale pour déterminer la portée des variables d'entrée indépendantes. Cette méthode permet, grâce à des modèles mathématiques empiriques, de déterminer une relation d'approximation entre les réponses de sortie (Y), et les variables d'entrée (vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p)) pour optimiser les paramètres du procédé (dans notre cas, c'est le tournage) afin d'atteindre des réponses souhaitables. Dans cette méthode, la réponse peut s'écrire sous la forme suivante [42].

$$Y = \emptyset (V_c \times f \times a_p) \quad (\text{III.5})$$

Dans le cadre de cette étude, deux types de paramètres sont pris en compte :

- Les paramètres d'entrée : qui influencent directement le processus, comme la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe.
- Les paramètres technologiques: qui représentent les réponses du système, comme les efforts de coupe, la température et la rugosité de surface.

L'application de la MSR suit un enchaînement méthodique en six étapes principales, illustrées dans le diagramme présenté dans la *figure III.1*.

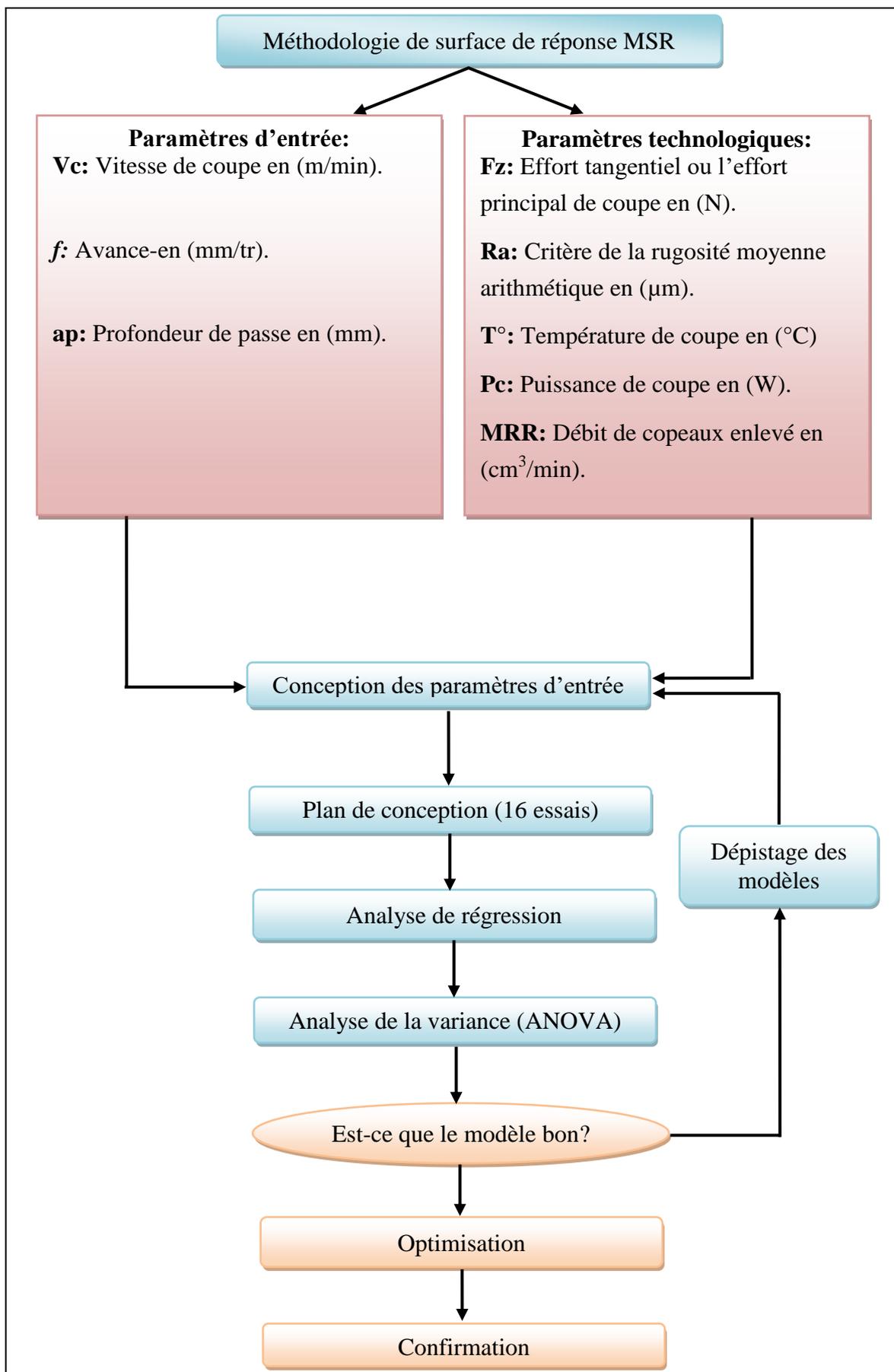


Fig.III.1 : Organigramme de la MSR.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Y , dite variable de réponse (rugosité de la surface, effort de coupe tangentiel, effort spécifique tangentiel et puissance de coupe), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe). Ce modèle permet d'analyser l'influence individuelle de chaque facteur sur la réponse. Il s'exprime sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i \quad (\text{III.6})$$

- Y : Variable dépendante (réponse mesurée) ;
- X_i : Variables indépendantes (facteurs explicatifs) ;
- a_0 : Constante (ordonnée à l'origine) ;
- a_i : Coefficient de régression associé à X_i , représentant l'effet linéaire du facteur i ;
- k : Nombre total de facteurs ou variables explicatives.

Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (III.7).

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

y_i : Valeur de la réponse calculée à l' $i^{\text{ème}}$ expérience ;

\bar{y}_i : Valeur mesurée à l' $i^{\text{ème}}$ expérience ;

\bar{y} : Valeur moyenne des réponses mesurées.

III.3. Résultat d'expériences

Le [tableau III.1](#) présente les résultats expérimentaux correspondants à l'effort de coupe tangentiel (F_z), le critère de la rugosité moyenne arithmétique (R_a), la température de coupe (T°), la puissance de coupe (P_c) et le débit du copeau enlevé (MRR) avec la combinaison des différents paramètres de coupe lors du tournage du PEEK GF 30% en utilisant un outil de coupe en carbure revêtu.

Tableau III.1: Valeurs expérimentales de Fz, Ra, T°, Pc et MRR en fonction de Vc, f et ap.

N° Essai	Facteurs			Réponses				
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Fz (N)	Ra (µm)	T° (°C)	Pc (W)	MRR (cm ³ /min)
1	120	0.08	0.4	15.02	3.13	159	30.04	3.84
2	120	0.12	0.8	30.12	3.45	175	60.24	11.52
3	120	0.16	1.2	46.62	5.2	190	93.24	23.04
4	120	0.2	1.6	76.22	6.57	195	152.44	38.4
5	170	0.08	0.8	20.8	1.57	169	58.93	10.88
6	170	0.12	0.4	19.11	2.1	161	54.14	8.16
7	170	0.16	1.6	60.64	4.55	197	171.81	43.52
8	170	0.2	1.2	56.22	6.11	193	159.29	40.8
9	240	0.08	1.2	31.77	1.33	195	127.08	23.04
10	240	0.12	1.6	45.77	2.07	199	183.08	46.08
11	240	0.16	0.4	16.2	3.82	168	64.8	15.36
12	240	0.2	0.8	41.67	5.26	186	166.68	38.4
13	340	0.08	1.6	34.66	1.99	200	196.40	43.52
14	340	0.12	1.2	34.62	2.1	197	196.18	48.96
15	340	0.16	0.8	33.33	3.08	190	188.87	43.52
16	340	0.2	0.4	26.44	4.55	175	149.82	27.2

L'analyse des résultats de ce tableau montre que pour les différentes combinaisons du régime de coupe la composante de l'effort de coupe (Fz) varie selon l'intervalle [15.02 - 76.22] (N). On remarque aussi que le critère de rugosité (Ra) obtenu varie dans l'intervalle [1.33 - 6.57] (µm). Concernant la température, elle varie selon l'intervalle [159 - 200] (°C). Et pour Pc et MRR varient selon les intervalles [30.04 - 196.4] (W) et [3.84 - 48.96] (cm³/min) respectivement.

III.3.1. ANOVA et Modélisation des différents paramètres Fz, Ra, T° et Pc

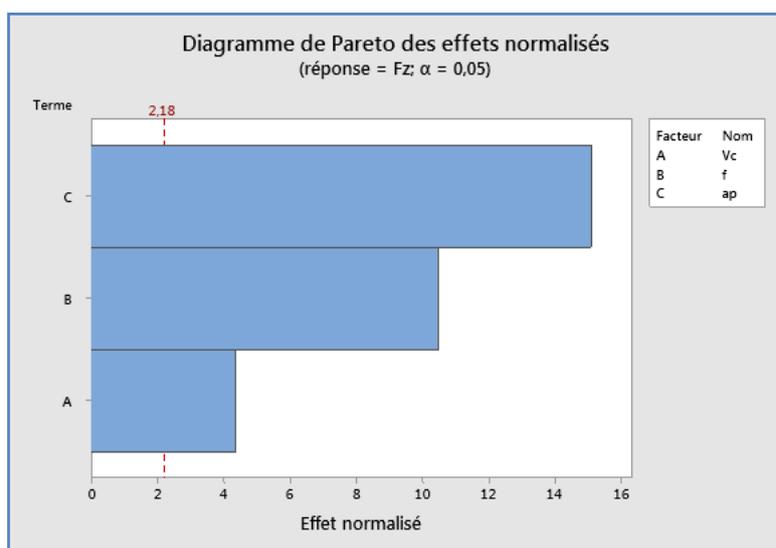
III.3.1.1. Analyse des résultats de l'effort de coupe (Fz) en fonction de Vc, f et ap

Le [tableau III.2](#) présente l'analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort (Fz). On constate que la profondeur de passe (ap) a la plus grande contribution (61.87%), ce qui signifie qu'elle est le facteur dominant influençant l'effort (Fz). L'avance (f) joue également un rôle important avec une contribution de 29.70%. Tandis que, la vitesse de coupe (Vc) a une contribution relativement faible (5.18%). L'analyse du tableau montre que tous les facteurs étudiés (Vc, f et ap) sont significatifs, ce qui signifie qu'ils influencent tous l'effort (Fz). CHABBI A. [23] a réalisé une étude comparative mettant en évidence l'influence des paramètres de coupe notamment: la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) sur l'effort de coupe (Fz).

Tableau III.2: Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort (Fz).

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur P	Remarques
Model	3	4224.3	96.75%	4224.3	1408.09	118.95	0.000	Signifiant
Linéaire	3	4224.3	96.75%	4224.3	1408.09	118.95	0.000	Signifiant
Vc	1	226.3	5.18%	226.3	226.34	19.12	0.001	Signifiant
f	1	1296.6	29.70%	1296.6	1296.61	109.53	0.000	Signifiant
ap	1	2701.3	61.87%	2701.3	2701.30	228.19	0.000	Signifiant
Erreur	12	142.1	3.25%	142.1	11.84			
Total	15	4366.3	100.00%					

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse de la variance, un graphe de Pareto est construit (*figure III.2*). Il en ressort que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influant sur l'effort tangentiel de coupe (Fz), suivie par l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc). Ces conclusions viennent renforcer la cohérence des résultats présentés dans *le tableau III.2*.

**Fig.III.2:** Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur Fz.

a) Effets principaux pour Fz

La *figure III.3* illustre le graphique des effets principaux pour l'effort (Fz). On remarque que la profondeur de passe (ap) a la plus grande pente, donc c'est le facteur qui a la plus grande influence sur l'effort de coupe (Fz), suivie par l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc). Des résultats comparatifs ont été trouvés par V. N. Gaitonde et al. [43] en ce qui concerne l'influence des conditions de coupe (Vc, f et ap) sur l'effort de coupe (Fz).

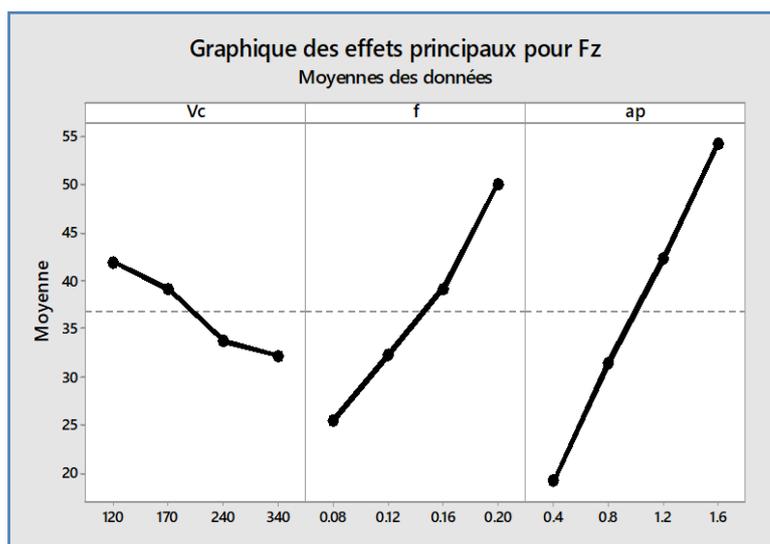


Fig. III.3: Graphique des effets principaux pour Fz.

b) Analyse de régression pour Fz

La relation fonctionnelle entre Fz et les variables indépendantes étudiées (Vc, f et ap) a été exprimée avec un coefficient de détermination ($R^2=96.75\%$) correspondant à la précision de régression. Le modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire l'effort de coupe (Fz) selon les facteurs étudiés. L'évolution de cet effort en fonction de (Vc, f et ap) est décrite par l'équation (III.8).

$$Fz = -10.50 - 0.0455 Vc + 201.3 f + 29.05 ap \quad (III.8)$$

La *figure III.4* expose la courbe de normalité pour l'effort tangentiel (Fz). En remarque que la majorité des points d'intersection sont proches de la ligne médiane. Cela indique que les résidus de la variable Fz sont normalement distribués, ce qui renforce la crédibilité des analyses associées. Cela suggère également que le modèle utilisé est bien adapté aux données.

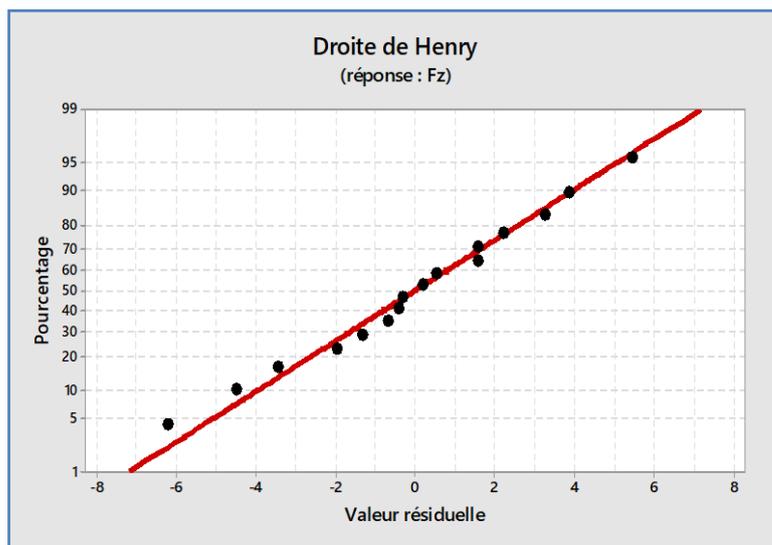


Fig.III.4 : Courbe de normalité pour Fz.

c) **Analyse de surface de réponse 3D pour Fz**

La *figure III.5* présente le graphe de surface de réponse en 3D pour l'effort (Fz). On remarque que l'effort tangentiel de coupe augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et l'avance. Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe est plus importante. La vitesse de coupe (V_c) a un effet moindre sur l'effort tangentiel de coupe (Fz) ce qui confirme les résultats présentés dans le *tableau III.2*.

Aussi, les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse pour l'effort tangentiel (Fz) et d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables (*figure III.6*).

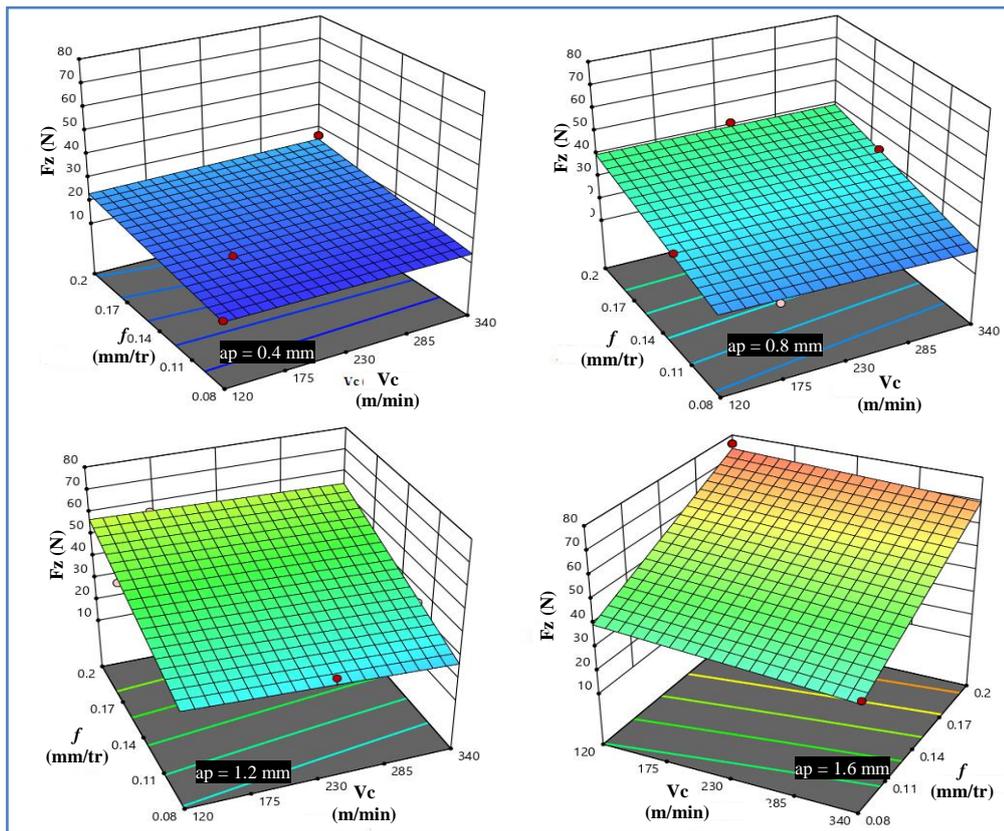


Fig.III.5 : Surface de réponse en 3D pour F_z .

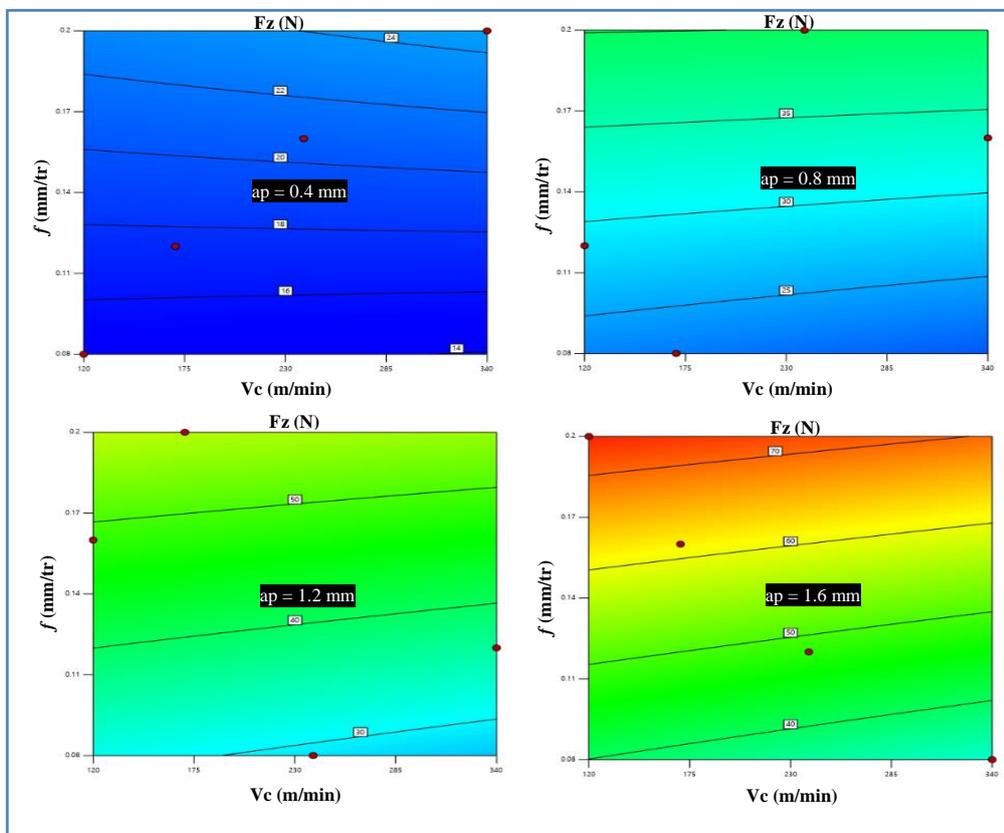


Fig.III.6 : Graphe de contour en 2D pour F_z .

d) Comparaison entre l'effort (Fz) expérimental et prédit (estimé)

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'effort tangentiel (Fz) et celles prédites par le modèle pour le plan de Taguchi L₁₆ de 16 essais obtenus par la méthodologie de surface de réponse, est présentée graphiquement dans la *figure III. 7*. Le pourcentage d'erreur est calculé de la façon suivante :

$$\text{erreur \%} = \frac{\text{valeur expérimentale} - \text{valeur prédite}}{\text{valeur expérimentale}} \quad (\text{III.9})$$

L'analyse des résultats montre que l'erreur minimale pour la composante (Fz) est de (0.31 %) enregistrée à l'essai N° 7. L'erreur maximale est de (-38.23 %) enregistrée à l'essai N° 11.

La *figure III.7* présente la comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de Fz. Elle montre aussi que les valeurs expérimentales et prédites sont très proches. Donc, on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donnent des résultats fiables.

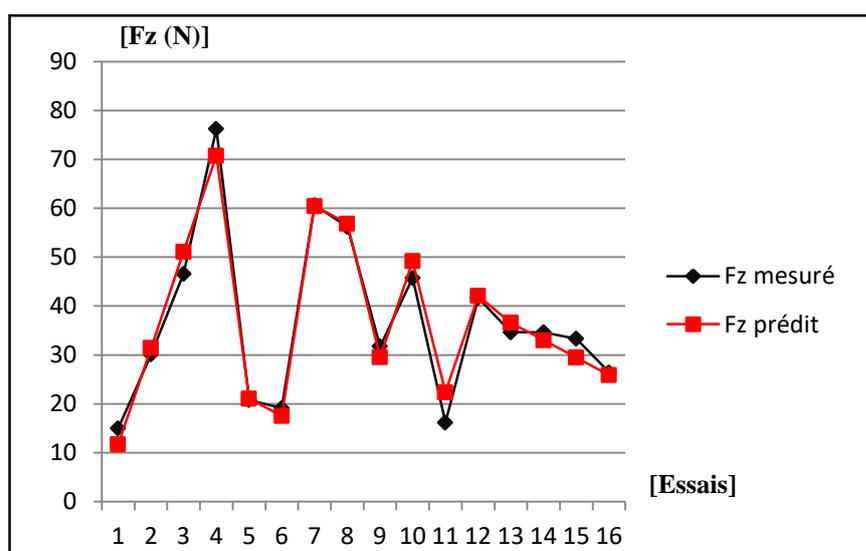


Fig.III.7: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Fz.

III.3.1.2. Analyse des résultats de la rugosité (Ra) en fonction de Vc, f et ap

Le [tableau III.3](#) présente les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra). L'analyse de la variance montre que l'avance (f) est le facteur le plus influent sur (Ra) avec une contribution de 76.37 %. La vitesse de coupe (V_c) a une influence modérée (12.54%), tandis que la profondeur de passe (ap) a une contribution plus faible (1.13%). L'analyse du tableau montre que l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c) ont un impact extrêmement significatif sur la rugosité (Ra). En revanche, la profondeur de passe (ap) ne présente pas d'influence significative sur la rugosité (Ra) dans le cadre de cette étude. Des résultats analogues de l'effet de conditions de coupe (V_c , f et ap) sur Ra ont été rapportés par S. HAOUES et al. [44] lors de l'usinage des polymères.

Tableau III.3: Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra.

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur P	Remarques
Model	3	37.34	90.04%	37.34	12.44	36.15	0.000	Signifiant
Linéaire	3	37.34	90.04%	37.34	12.44	36.15	0.000	Signifiant
Vc	1	5.20	12.54%	5.20	5.20	15.10	0.002	Signifiant
f	1	31.67	76.37%	31.67	31.67	91.99	0.000	Signifiant
ap	1	0.46	1.13%	0.46	0.46	1.36	0.266	Non Signifiant
Erreur	12	4.13	9.96%	4.13	0.34			
Total	15	41.47	100.00%					

La [figure III.8](#) illustre le diagramme de Pareto de la rugosité (Ra), élaboré afin de confirmer les résultats obtenus par l'analyse de la variance. L'analyse révèle que l'avance (f) est le facteur le plus influant sur la rugosité (Ra), suivie par la vitesse de coupe (V_c). Tandis que, la profondeur de passe (ap) présente un impact moindre, mais non négligeable.

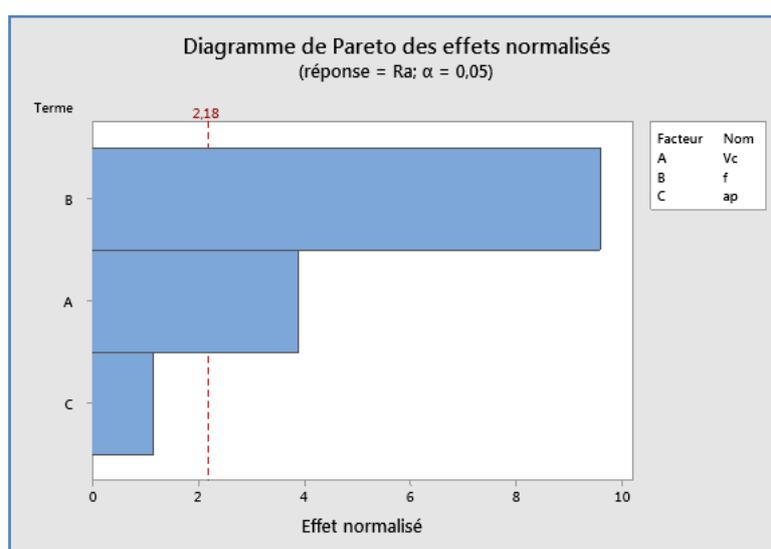


Fig.III.8: Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur Ra.

a) Effets principaux pour Ra

La *figure III.9* expose le graphique des effets principaux pour la rugosité (Ra) en fonction de conditions de coupe (V_c , f et a_p). L'analyse des graphes montre que l'influence de l'avance (f) est la plus grande, cela signifie que l'effet de l'avance est plus important. Suivie par la vitesse de coupe (V_c) puis par la profondeur de passe (a_p). Selon les travaux de Lakhdar Bouzid et al. [45], les conditions de coupe (V_c , f et a_p) influencent significativement sur la rugosité de surface (Ra), comme le montrent leurs résultats comparatifs.

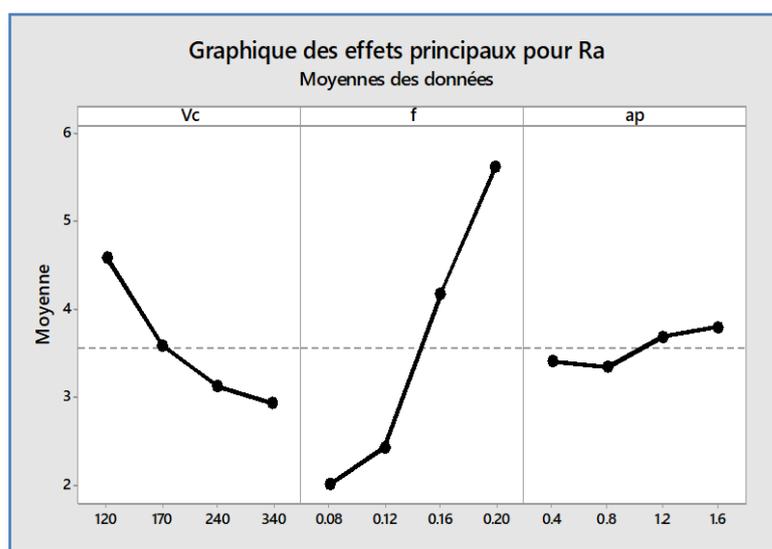


Fig.III.9 : Effet de conditions de coupe sur Ra.

b) Analyse de régression pour Ra

La relation fonctionnelle entre Ra et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et a_p) a été exprimée avec un coefficient de détermination ($R^2=90.04\%$) correspondant à la précision de régression. Le modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la rugosité (Ra) selon les facteurs étudiés. L'évolution de Ra en fonction de (V_c , f et a_p) est décrite par l'équation (III.10).

$$Ra = 0.270 - 0.00690 V_c + 31.46 f + 0.382 a_p \quad (\text{III.10})$$

La *figure III.10* illustre la courbe de normalité pour la rugosité de surface (Ra). On observe que la plupart des points d'intersection sont proches de la ligne médiane. Cela montre que les résidus de la rugosité de surface (Ra) suivent une distribution normale, renforçant ainsi la fiabilité des analyses effectuées. Cela indique également que le modèle utilisé s'ajuste adéquatement aux données.

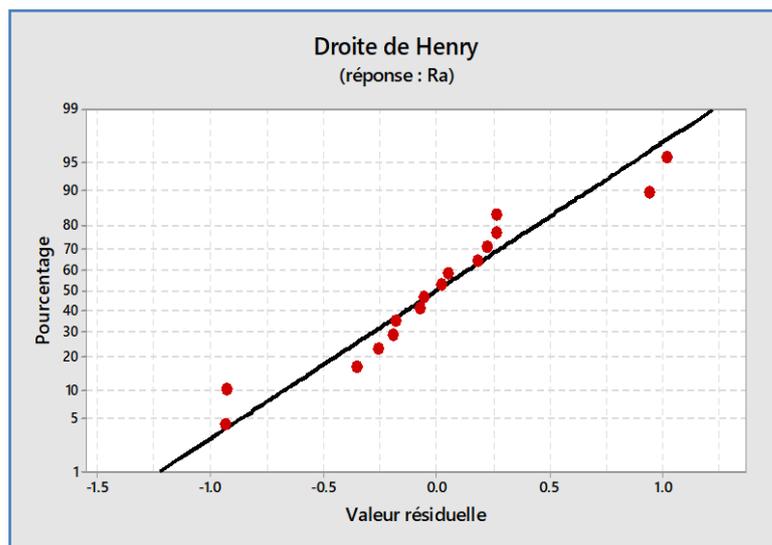


Fig.III.10: Courbe de normalité pour Ra.

c) Analyse de surface de réponse pour Ra

La [figure III.11](#) illustre le graphe de surface de réponse en 3D pour la rugosité (Ra). On observe que l'effet de la profondeur de passe (a_p) sur la rugosité de surface (Ra) est moindre par rapport aux effets de l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c). Cependant, il est noté que l'effet de l'avance est plus important.

De plus, les graphes de contour offrent une visualisation de la surface de réponse pour la rugosité moyenne arithmétique (Ra) et permettent de déterminer les valeurs de réponse ainsi que les conditions d'exploitation optimales ([figure III.12](#)).

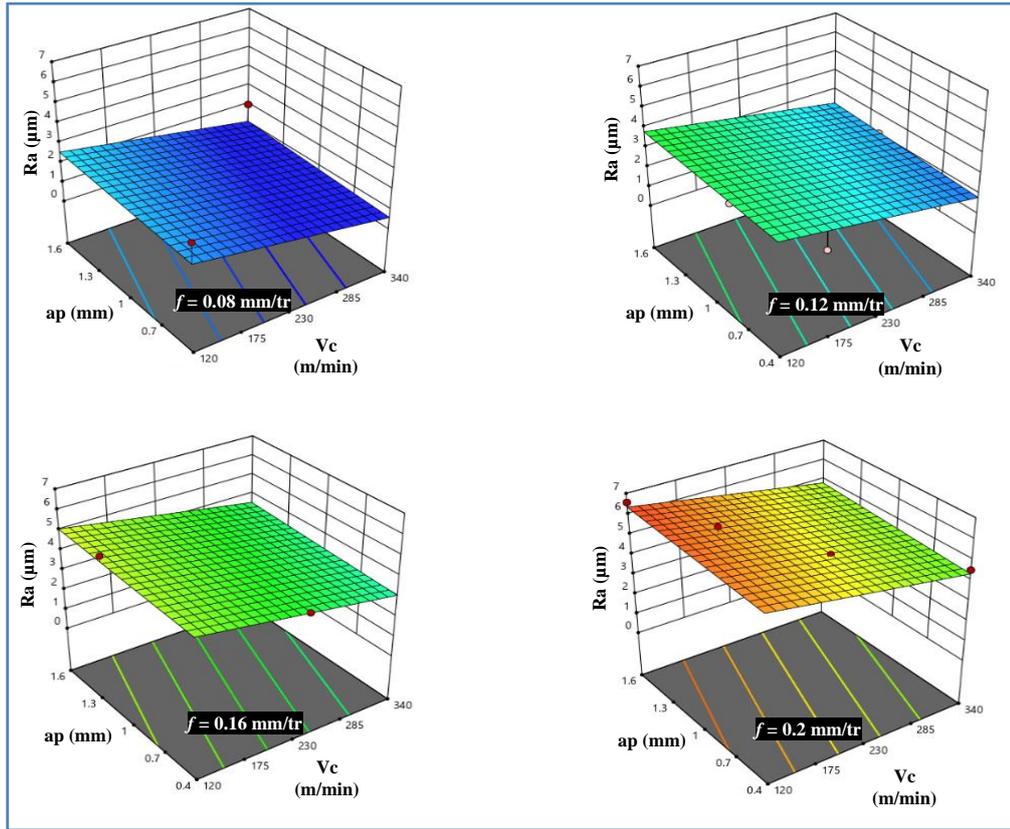


Fig.III.11: Surface de réponse en 3D pour Ra.

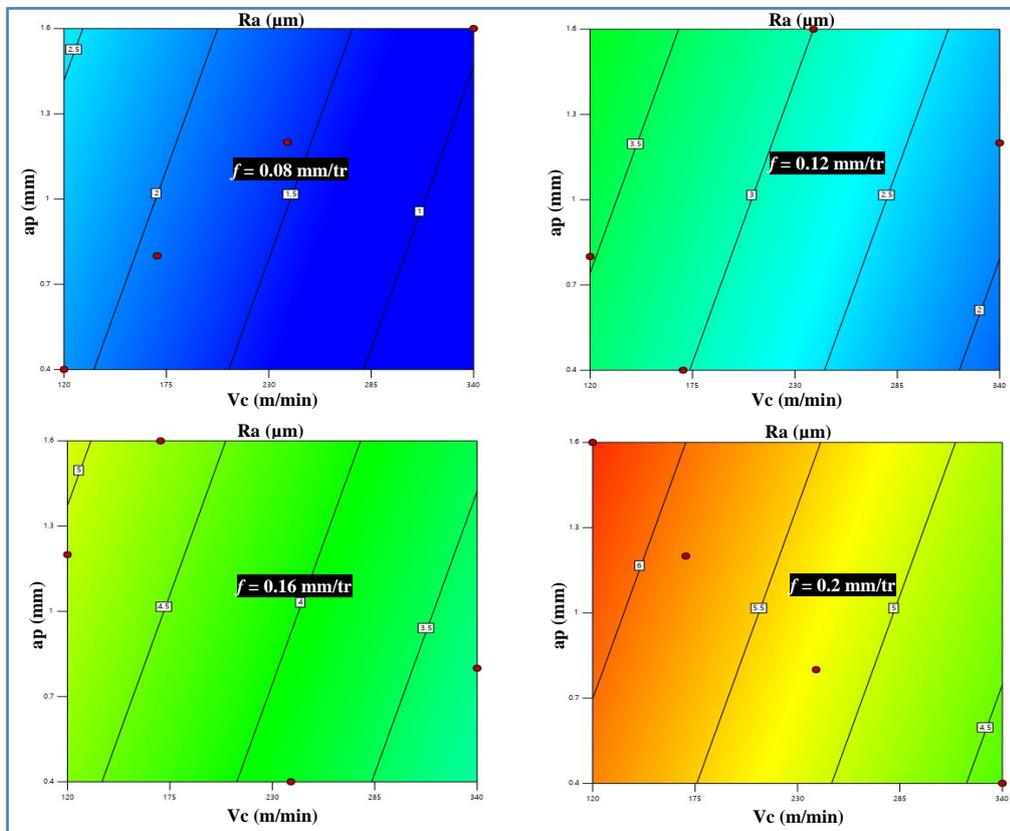


Fig.III.12 : Graphe de contour en 2D pour Ra.

d) Comparaison entre la rugosité (Ra) expérimentale et prédite (estimée)

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites pour la rugosité (Ra) est présentée graphiquement dans la *figure III.13*.

L'analyse montre que l'erreur minimale est de (0.53 %), elle est enregistrée à l'essai N°11, alors que l'erreur maximale est de (47.18 %), enregistrée à l'essai N°13. La *figure III.13* montre que les valeurs mesurées et les valeurs prédites sont proches. En effet, ces résultats prouvent la précision du modèle.

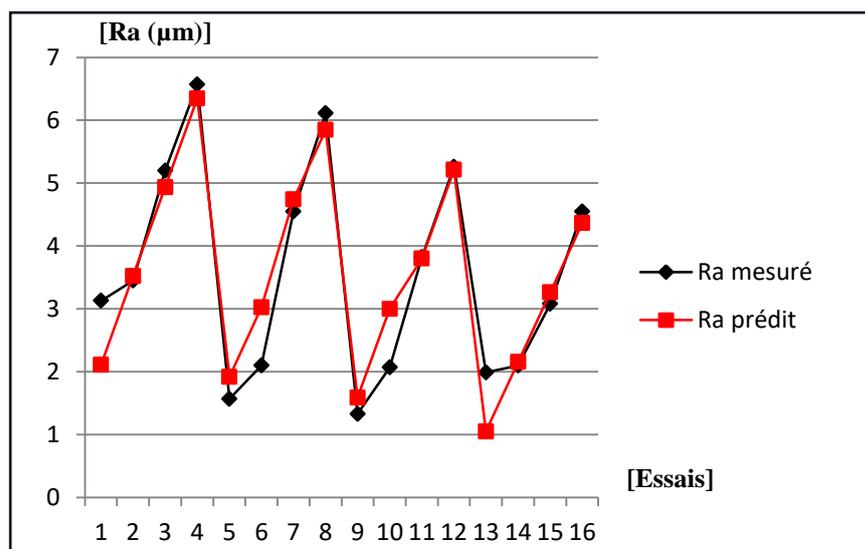


Fig.III.13: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra.

III.3.1.3. Analyse des résultats de la température (T°) en fonction de V_c , f et ap

Le [tableau III.4](#) présente l'ANOVA pour la température (T°). On remarque que la profondeur de passe (ap) est le facteur dominant, expliquant 73.92% de la variation de T° . En comparaison, la vitesse de coupe (V_c) a une influence plus modérée (14.51%). Tandis que l'avance (f) a une contribution plus faible (5.59%). L'analyse du tableau expose que tous les facteurs étudiés (V_c , f et ap) sont significatifs, ce qui signifie qu'ils influencent tous sur la température (T°).

Tableau III.4 : Analyse de la variance (ANOVA) pour T° .

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur P	Remarques
Model	3	2543.9	94.02%	2543.9	847.96	62.87	0,000	Signifiant
Linéaire	3	2543.9	94.02%	2543.9	847.96	62.87	0.000	Signifiant
V_c	1	392.6	14.51%	392.6	392.64	29.11	0.000	Signifiant
f	1	151.3	5.59%	151.3	151.25	11.21	0.006	Signifiant
ap	1	2000.0	73.92%	2000.0	2000.00	148.28	0.000	Signifiant
Erreur	12	161.9	5.98%	161.9	13.49			
Total	15	2705.8	100.00%					

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse de la variance, un graphe de Pareto est construit, il est représenté dans la [figure III.14](#). L'analyse du graphe montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur principal influençant sur la température de coupe (T°), suivie par la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f).

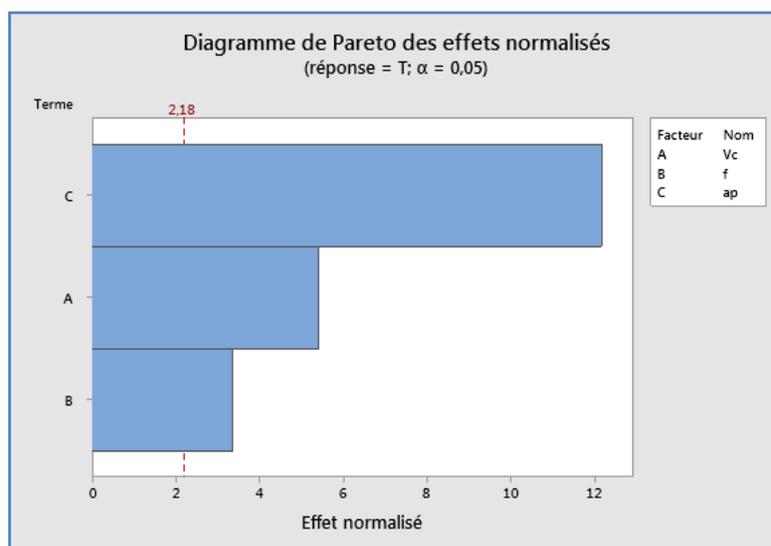


Fig.III.14: Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur T° .

a) Effets principaux pour T°

La *figure III.15* expose le graphique des effets principaux pour la température (T°) en fonction de conditions de coupe (V_c , f et ap). L'analyse du graphe montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influent. La vitesse de coupe (V_c) a un effet modéré et l'avance (f) a une influence faible. D. Gomez-García et al. [46] ont présenté des résultats comparatifs mettant en évidence l'influence des paramètres de coupe, notamment la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap), sur la température de coupe (T°).

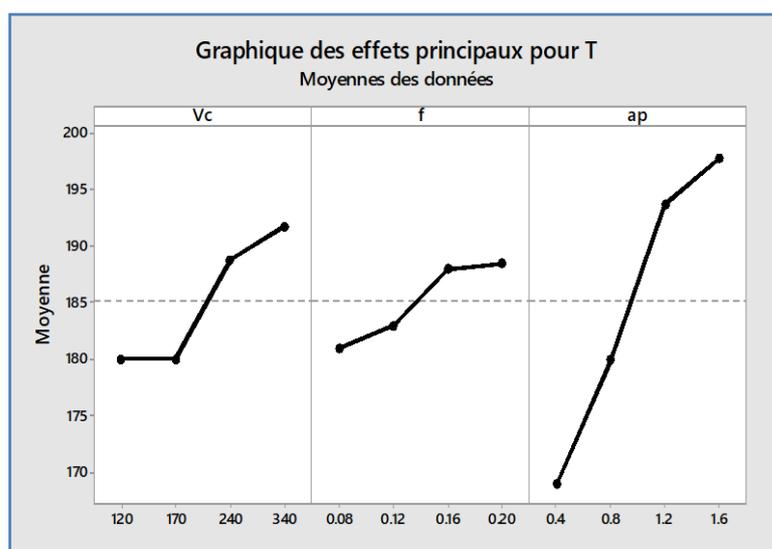


Fig.III.15 : Effet de conditions de coupe sur T° .

La *figure III.16* présente plusieurs captures thermographiques illustrant les températures générées lors de l'usinage avec un outil en carbure revêtu sous différents régimes de coupe. Chaque thermographie est accompagnée d'un graphique représentant l'évolution de la température en fonction du temps. On observe que l'élévation de température dépend du régime de coupe appliqué.

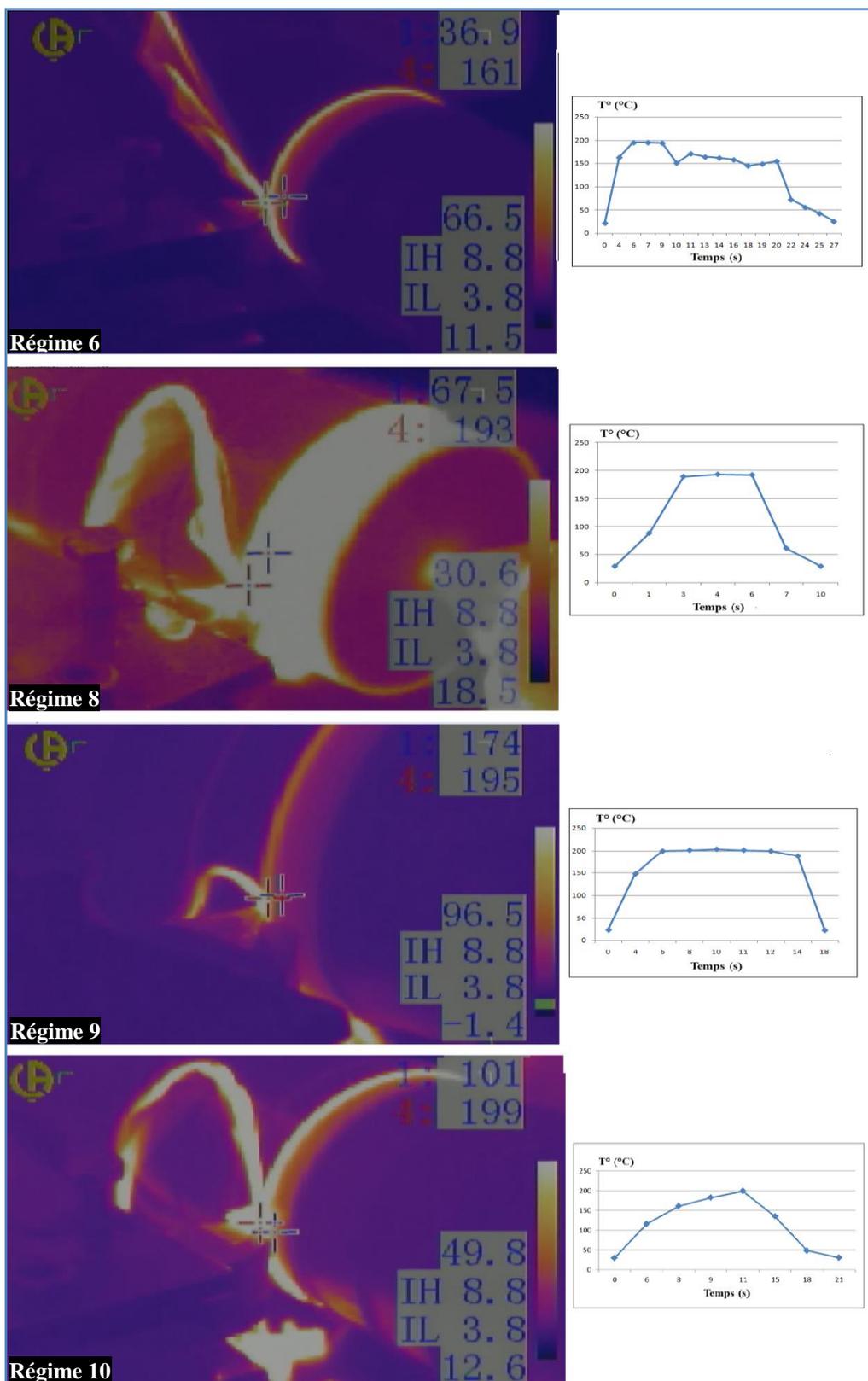


Fig.III.16: Thermographies infrarouges des températures de coupe avec un outil en carbure revêtu sous divers régimes.

b) Analyse de régression pour T°

La relation fonctionnelle entre T° et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et a_p) a été exprimée avec un coefficient de détermination ($R^2=94.02\%$) correspondant à la précision de régression. Le modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la température (T°) selon les facteurs étudiés. L'évolution de T° en fonction de (V_c , f et a_p) est décrite par l'équation (III.11).

$$T = 137.45 + 0.0600 V_c + 68.8 f + 25.00 a_p \quad (\text{III.11})$$

La *figure III.17* montre la courbe de normalité pour la température (T°). On remarque que la plupart des points d'intersection sont proches de la ligne médiane. Cela indique que la distribution normale des résidus de la température de coupe (T°), confirme la fiabilité des analyses effectuées et suggère que le modèle utilisé s'adapte correctement aux données. HAMLAOUI, N et al. [47] ont réalisé une étude comparative soulignant l'impact des paramètres de coupe, notamment: la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p), sur la température générée au cours du processus d'usinage.

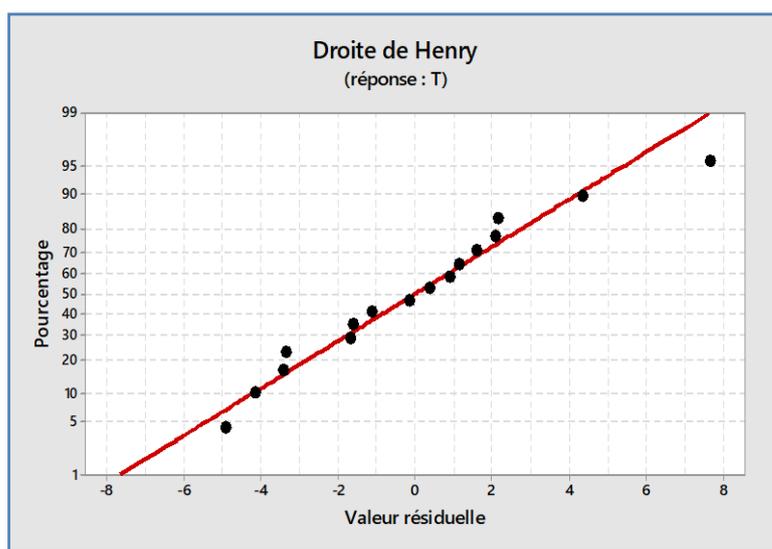


Fig.III.17: Courbe de normalité pour T° .

c) Analyse de surface de réponse pour T°

La *figure III.18* illustre le graphe de surface de réponse en 3D pour la température (T°). L'analyse du graphe montre que l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) ainsi que la profondeur de passe (a_p) entraîne une augmentation de la température (T°).

Ensuite, les graphes de contour fournissent une représentation visuelle de la surface de réponse pour la température de coupe (T°), facilitant ainsi l'identification des valeurs de réponse et l'optimisation des conditions d'exploitation (*figure III.19*).

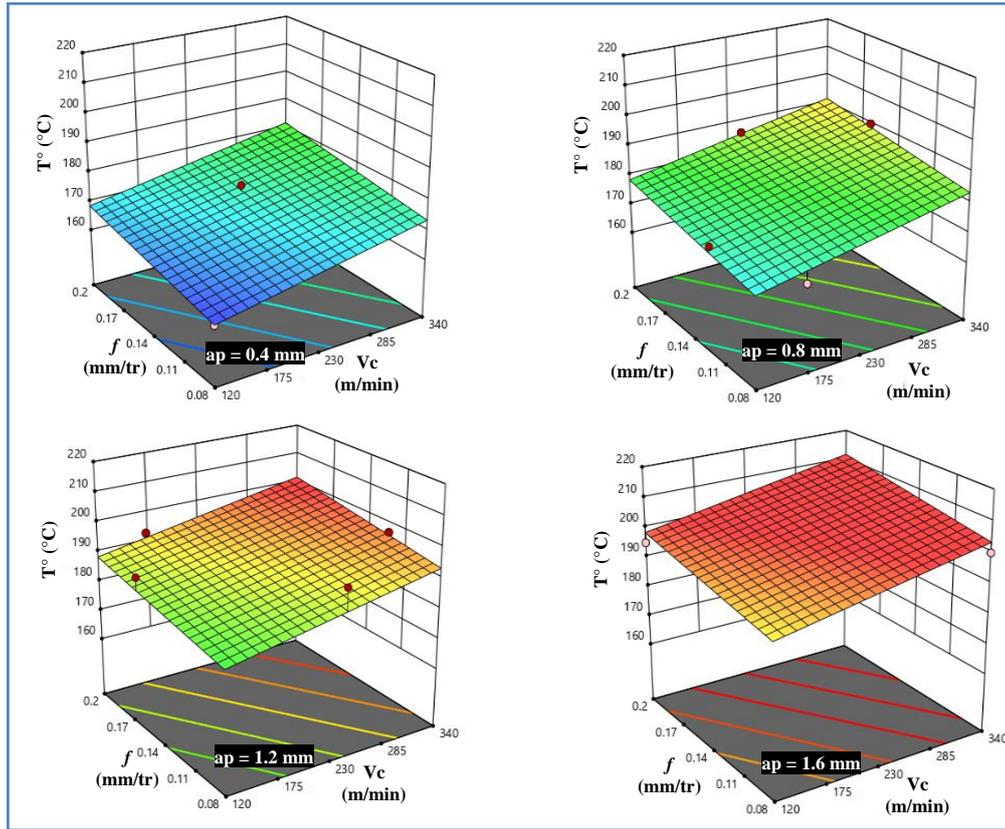


Fig.III.18: Surface de réponse en 3D pour T° .

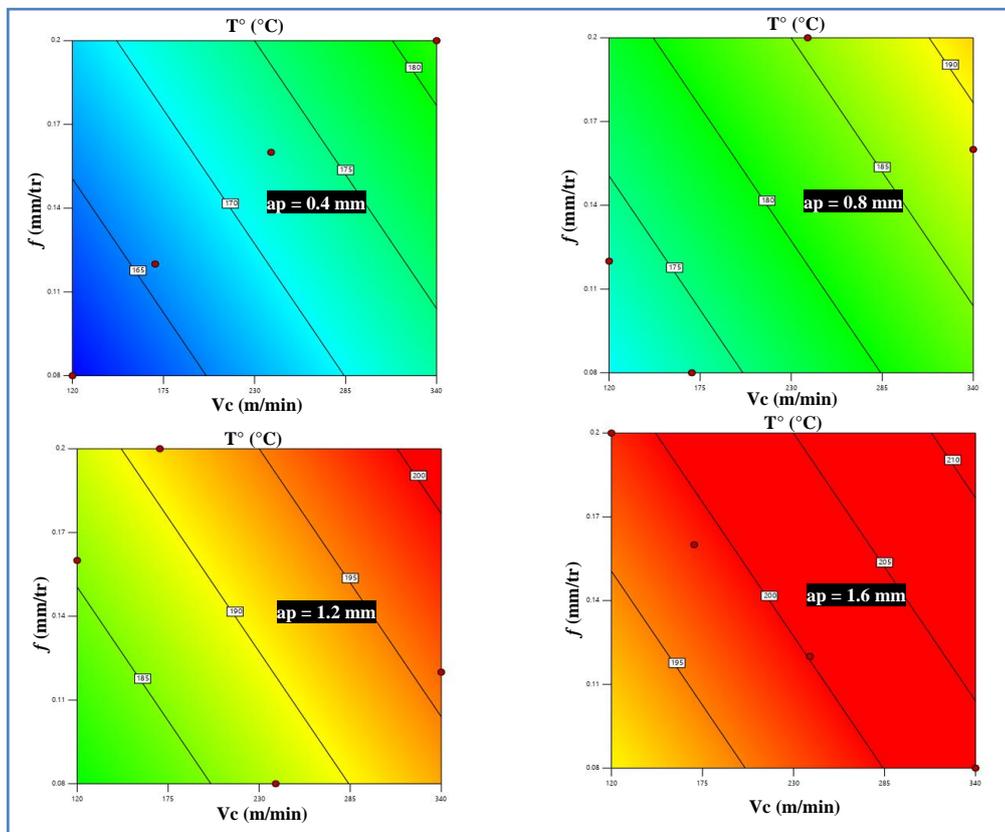


Fig.III.19 : Graphe de contour en 2D pour T° .

d) Comparaison entre la température (T°) expérimentale et prédite (estimée)

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites pour la température (T°) est présentée graphiquement dans la *figure III.20*.

L'analyse montre que l'erreur minimale est de (0.09 %), elle est enregistrée à l'essai N°1, alors que l'erreur maximale est de (3.92 %), enregistrée à l'essai N°9. La *figure III.20* montre que les valeurs mesurées et les valeurs prédites sont proches. En effet, ces résultats prouvent la précision du modèle.

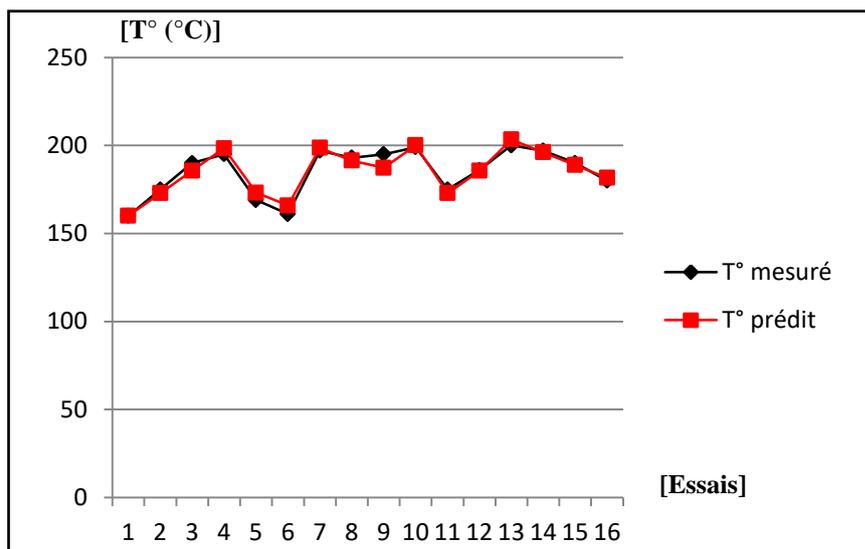


Fig.III.20: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de T° .

III.3.1.4. Analyse des résultats de la puissance de coupe (P_c) en fonction de V_c , f et ap

Le *tableau III.5* expose l'analyse de la variance pour la puissance de coupe (P_c). L'analyse des résultats montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur dominant avec une contribution de 42.31%. La vitesse de coupe (V_c) a une contribution légèrement inférieure à (ap) de 41.14%. Aussi, l'avance (f) a une contribution plus faible de 11.05%, ce qui montre qu'elle a un impact moindre sur P_c par rapport aux deux autres facteurs. L'analyse du tableau montre que tous les facteurs étudiés (V_c , f et ap) sont statistiquement significatifs et influencent significativement sur P_c .

Tableau III.5: Analyse de la variance (ANOVA) pour P_c .

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur P	Remarques
Model	3	48337	4.50%	48337	16112.5	68.76	0.000	Signifiant
Linéaire	3	48337	94.50%	48337	16112.5	68.76	0.000	Signifiant
V_c	1	21042	41.14%	21042	21042.0	89.80	0.000	Signifiant
f	1	5652	11.05%	5652	5651.9	24.12	0.000	Signifiant
ap	1	21644	42.31%	21644	21643.6	92.37	0.000	Signifiant
Erreur	12	2812	5.50%	2812	234.3			
Total	15	51149	100.00%					

La *figure III.21* expose le graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la puissance de coupe (P_c). Il apparaît clairement que la profondeur de passe (ap) est le paramètre le plus influençant sur P_c , suivie par la vitesse de coupe (V_c). En revanche, l'avance (f) exerce un effet moindre sur P_c .

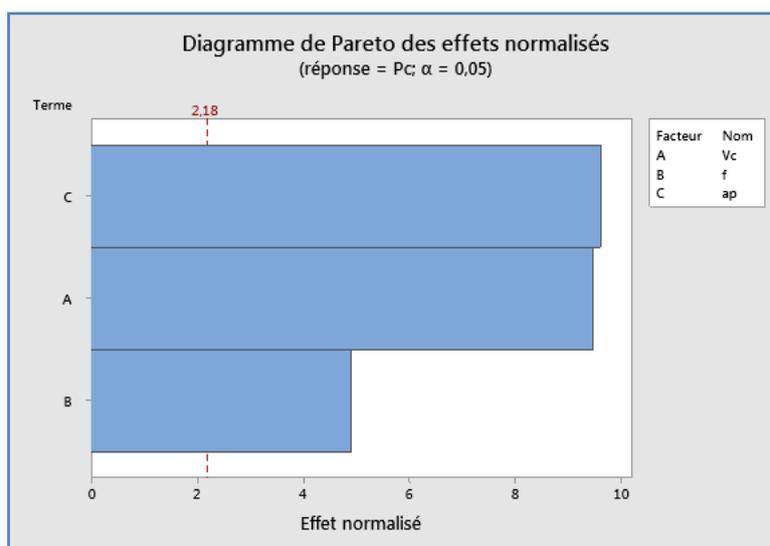


Fig.III.21: Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur P_c .

a) Effets principaux pour Pc

La *figure III.22* illustre le graphique des effets principaux pour la puissance de coupe (Pc) en fonction de conditions de coupe (V_c , f et ap). L'analyse du graphe révèle que la vitesse de coupe (V_c) a la plus grande pente suivie par la profondeur de passe (ap), puis par l'avance (f). Des résultats similaires de l'effet des conditions de coupe (V_c , f et ap) sur la puissance de coupe (Pc) sont évoqués dans la littérature [48].

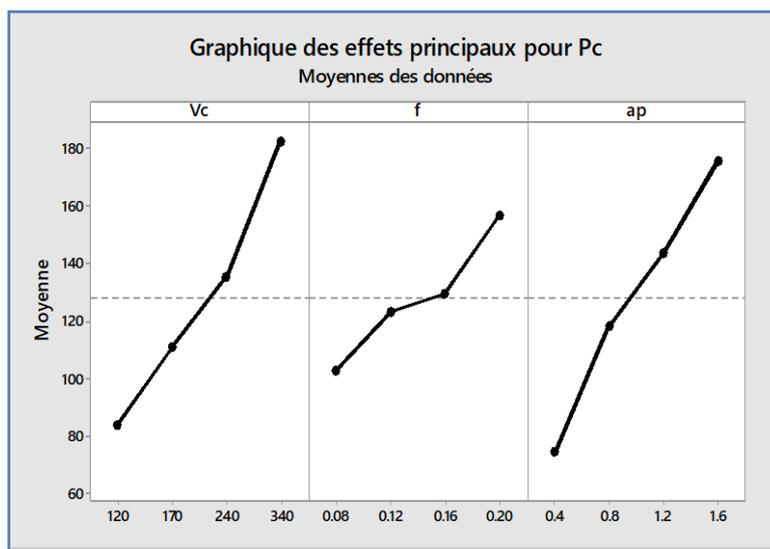


Fig.III.22 : Effet de conditions de coupe sur Pc.

b) Analyse de régression pour Pc

La relation fonctionnelle entre Pc et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et ap) a été exprimée avec un coefficient de détermination ($R^2=94.50\%$) correspondant à la précision de régression. Le modèle linéaire obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la puissance de coupe (Pc) selon les facteurs étudiés. L'évolution de Pc en fonction de (V_c , f et ap) est décrite par l'équation (III.12).

$$Pc = -108.3 + 0.4392 V_c + 420.3 f + 82.24 ap \quad (\text{III.12})$$

La *figure III.23* montre la courbe de normalité pour la puissance de coupe (Pc). On observe que la majorité des points d'intersection se situent à proximité de la ligne centrale. Cela indique que la distribution normale des résidus de la puissance de coupe (Pc), atteste la fiabilité des analyses effectuées et suggère que le modèle utilisé s'ajuste de manière appropriée aux données.

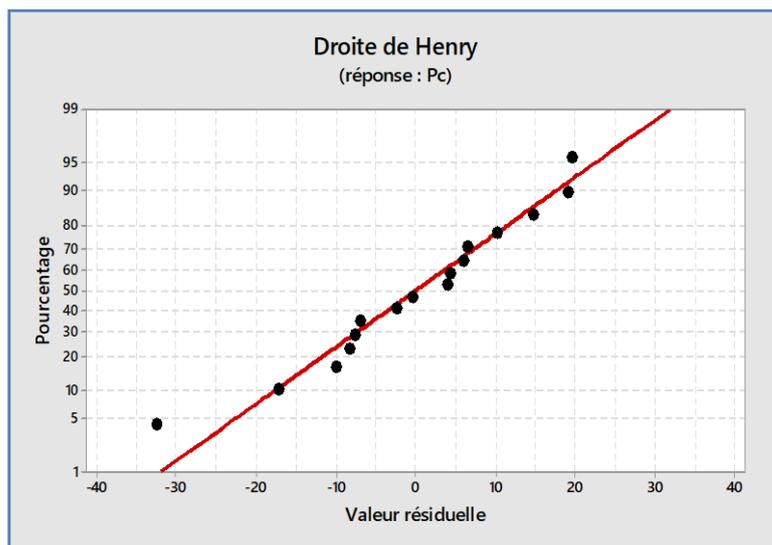


Fig.III.23: Courbe de normalité pour Pc.

c) **Analyse de surface de réponse pour Pc**

La *figure III.24* présente le graphe de surface de réponse en 3D pour la puissance de coupe (Pc). L'analyse du graphe montre que l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p) provoque une augmentation de la puissance de coupe (Pc).

Aussi, les graphes de contour permettent une analyse visuelle de la surface de réponse pour la puissance de coupe (Pc), facilitant ainsi la détermination des valeurs de réponse et l'optimisation des conditions d'exploitation (*figure III.25*).

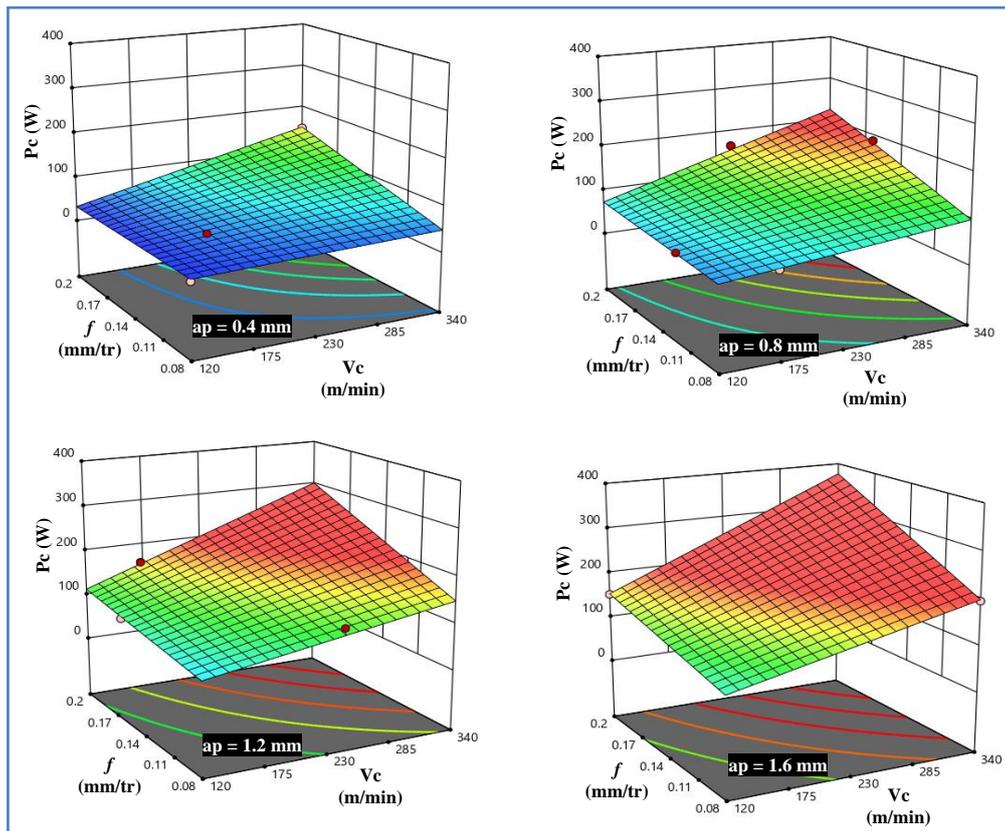


Fig.III.24: Surface de réponse en 3D pour P_c .

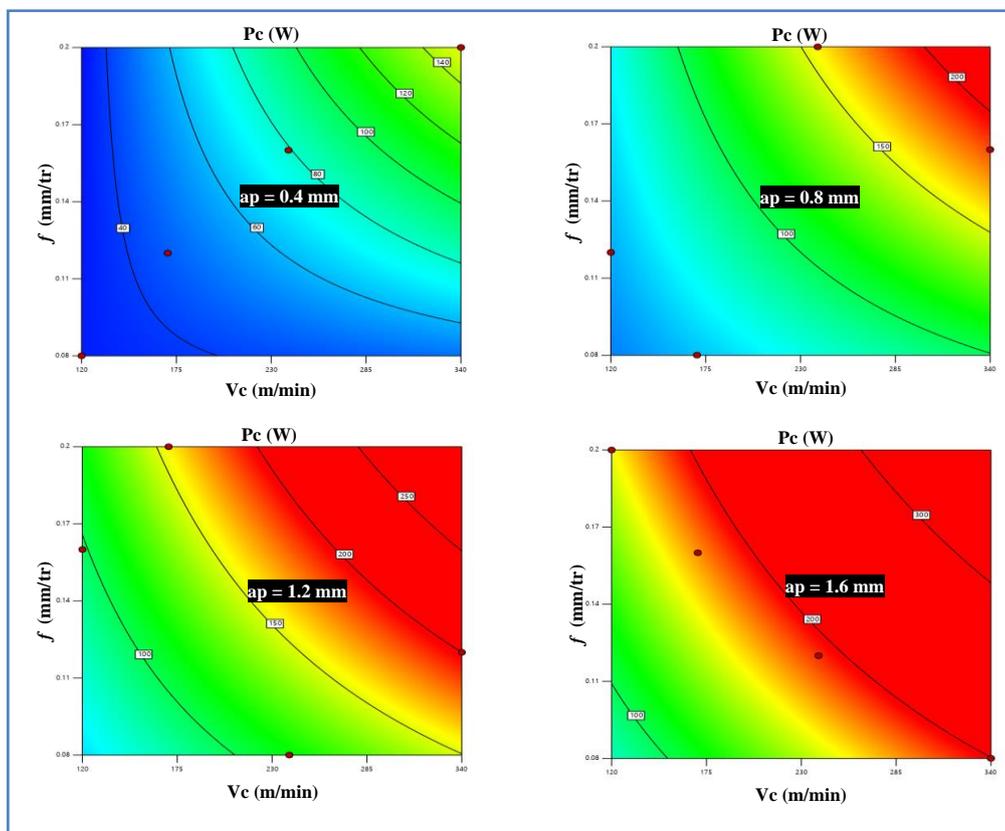


Fig.III.25 : Graphe de contour en 2D pour P_c .

d) Comparaison entre la puissance de coupe (P_c) expérimentale et prédite (estimée)

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites pour la puissance de coupe (P_c) est présentée graphiquement dans la *figure III.26*.

L'analyse montre que l'erreur minimale est de (0.66 %), elle est enregistrée à l'essai N°2, alors que l'erreur maximale est de (63.59%), enregistrée à l'essai N°1. La *figure III.26* montre que les valeurs expérimentales et les valeurs prédites sont proches. En effet, ces résultats prouvent la précision du modèle.

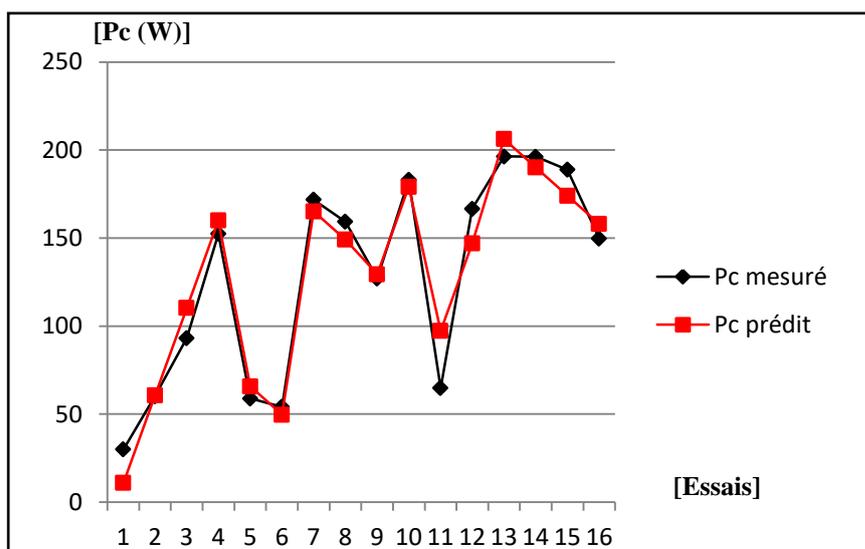


Fig.III.26: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de P_c .

III.4. Confirmation des essais

Afin de vérifier la compatibilité et l'efficacité des modèles obtenus par la méthode MSR pour les différentes réponses, un nombre d'expériences ont été effectuées pour évaluer la composante de l'effort de coupe (F_z), la rugosité de surface (R_a) et la température de coupe (T°). Les résultats obtenus sont présentés dans le *tableau III.6*. Les erreurs entre les valeurs expérimentales et prédites pour (F_z), (R_a) et (T°) sont de: (0.20 à 4.75)%, (0.96 à 5.88)% et (0.46 à 0.95)%, respectivement. Les erreurs relatives restent globalement faibles, avec un écart maximal de 5.88 % pour la rugosité de surface, ce qui indique une précision satisfaisante du modèle de prédiction. L'effort de coupe présente des écarts encore plus réduits, ne dépassant pas 4.75 %, tandis que les prévisions de température de coupe montrent une très bonne fiabilité avec des erreurs inférieures à 1 %. Ces résultats confirment la validité du modèle employé pour prédire les réponses en fonction des paramètres de coupe, et suggèrent que ce modèle peut être utilisé pour optimiser les conditions d'usinage avec un bon niveau.

Tableau III.6: Résultats des expériences de confirmation.

<i>Teste</i>	<i>Vc</i> (m/min)	<i>f</i> (mm/tr)	<i>ap</i> (mm)	<i>Valeurs</i> <i>expérimentales</i>	<i>Valeurs</i> <i>prédites</i>	<i>Erreurs</i> (%)
<i>Effort de coupe (Fz)</i>						
1	120	0.11	0.6	23.28	23.61	1.41
2	170	0.14	0.5	24.42	24.47	0.20
3	240	0.18	0.4	25.23	26.43	4.75
4	340	0.09	0.4	3.7	3.76	1.62
<i>Rugosité de surface (Ra)</i>						
1	120	0.11	0.6	3.10	3.13	0.96
2	170	0.14	0.5	3.58	3.69	3.07
3	240	0.18	0.4	4.36	4.42	1.37
4	340	0.09	0.4	0.85	0.9	5.88
<i>Température de coupe (T°)</i>						
1	120	0.11	0.6	166	167.21	0.73
2	170	0.14	0.5	169	169.78	0.46
3	240	0.18	0.4	173	174.23	0.71
4	340	0.09	0.4	172.4	174.04	0.95

III.5. Formation des copeaux

Lors des opérations d'usinage, la formation des copeaux joue un rôle crucial dans la compréhension des mécanismes de coupe et l'optimisation des paramètres d'usinage. La forme des copeaux dépend de plusieurs facteurs, notamment le matériau usiné, l'outil de coupe, l'avance et la profondeur de passe. L'analyse des copeaux permet non seulement d'évaluer l'efficacité du processus d'usinage, mais aussi d'anticiper d'éventuels problèmes tels que ; l'usure de l'outil ou une mauvaise évacuation des copeaux.

L'étude de D. Gomez-García et al. [46] montre que lors de l'usinage du PEEK non renforcé, les copeaux se fissurent et adhèrent à l'outil à cause de la chaleur, contrairement au PEEK renforcé de fibres où les copeaux se détachent nettement.

La *figure III.28* illustre la forme macroscopique des copeaux résultant de différentes conditions d'usinage du plan réalisé. Conformément à la classification des formes de copeaux définie par la norme ISO 3685 (*figure III.27*), plusieurs types de copeaux ont été identifiés au cours des différents essais. Les essais 1 et 16 présentent une forme de copeau en ruban enchevêtré. Les essais 2, 3 et 11 montrent des copeaux de type hélicoïdal en rondelle enchevêtrée, tandis que l'essai 4 révèle une forme spirale conique. Les essais 5,7 et 9 sont caractérisés par des copeaux en ruban long. Le copeau issu de l'essai 6 est de type hélicoïdal conique enchevêtré. Quant aux essais 8 et 12, ils produisent des copeaux tubulaires courts. Enfin, les essais 10, 13, 14 et 15 donnent lieu à des copeaux de forme tubulaire enchevêtrée.

1 : copeau ruban	2 : copeau tubulaire	3 : copeau en spirale	4 : copeau hélicoïdal en rondelle	5 : copeau hélicoïdal conique	6 : copeau élémentaire	7 : copeau aiguille	8 : copeau en arc
11 : Long 	21 : Long 	32 : plat 	41 : Long 	51 : Long 	61 : Enchevêtré 		
12 : Court 	22 : Court 	32 : Conique 	42 : Court 	52 : Court 	62 : détaché 		
13 : Enchevêtré 	23 : Enchevêtré 		43 : Enchevêtré 	53 : Enchevêtré 			

Fig.III.27: Classification des formes de copeaux selon la norme ISO 3685 [50].

La *figure III.29* présente la morphologie des copeaux à l'échelle microscopique. L'observation de ces structures constitue un outil d'analyse métallurgique essentiel, permettant d'évaluer le comportement du matériau durant l'usinage ainsi que l'efficacité du procédé mis en œuvre. Une interprétation approfondie de ces observations offre la possibilité d'optimiser les paramètres de coupe afin d'améliorer les performances globales du processus de fabrication. L'extrémité supérieure du copeau est marquée par des dents irrégulières et effilées, signe d'un arrachement progressif des fibres plutôt que d'une coupe nette. Cette morphologie traduit un comportement fragile du matériau, avec une rupture par cisaillement ou délaminage plutôt qu'une déformation plastique. Un tel comportement de formation de copeaux impacte directement l'état de surface de la pièce usinée. Ainsi, un état de surface plus rugueux et moins homogène est attendu, notamment en présence de délaminations ou d'arrachements de fibres. L'optimisation des paramètres de coupe est donc essentielle pour améliorer à la fois la morphologie des copeaux et la qualité de l'état de surface obtenu.

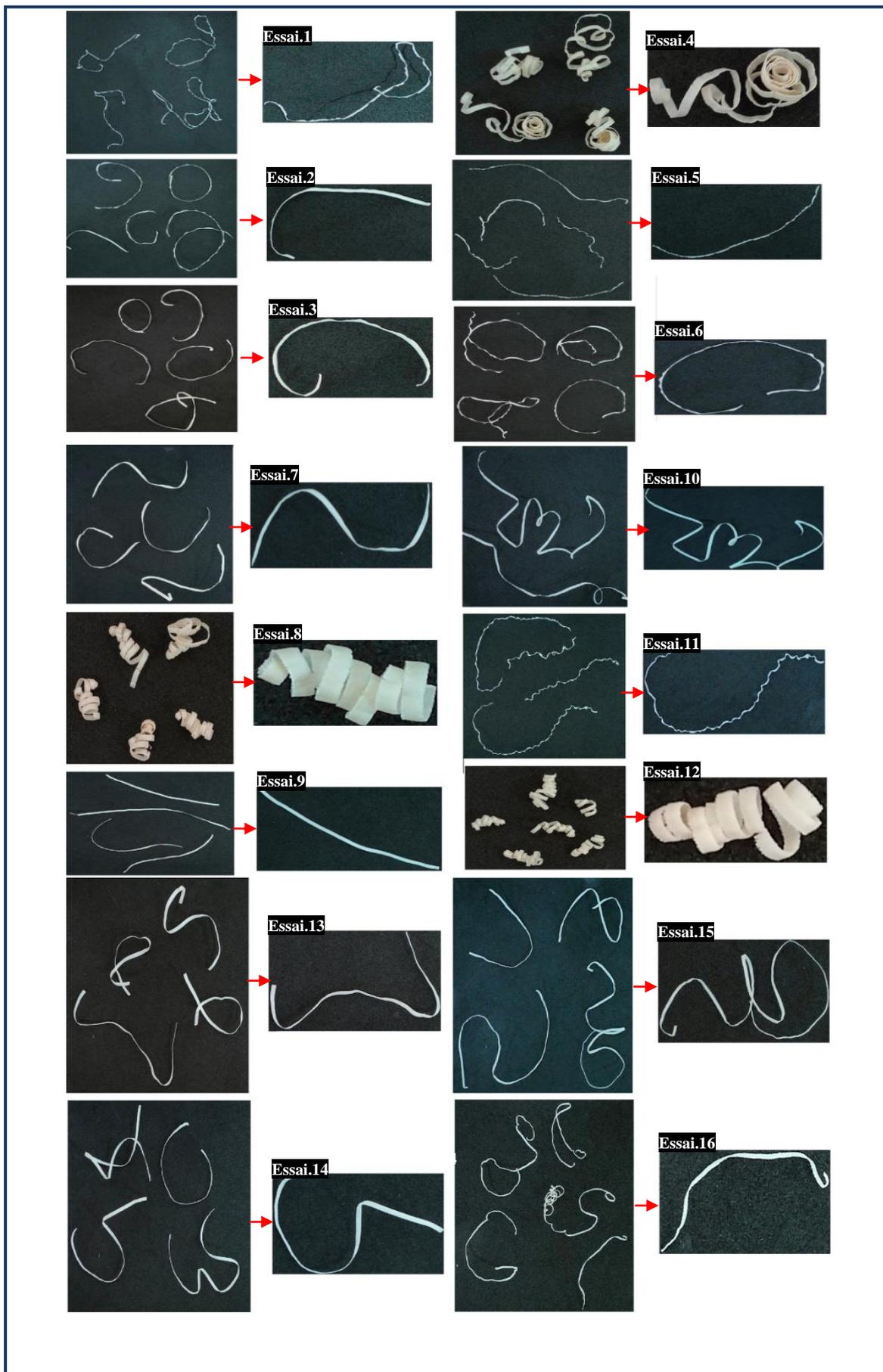


Fig.III.28: Forme des copeaux macroscopiques obtenue.



Fig.III.29: Forme des copeaux microscopiques.

III.6. Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence que l'avance (f) exerce une influence déterminante sur la rugosité de surface (R_a), tandis que la profondeur de passe (a_p) impacte significativement sur l'effort de coupe (F_z). L'augmentation des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) entraîne une élévation de la puissance et de la température de coupe. Les analyses ANOVA et de régression ont permis de développer des modèles prédictifs fiables, confirmés par des essais de validation. Par ailleurs, l'analyse de la formation des copeaux s'est révélée essentielle pour affiner l'optimisation des paramètres d'usinage.

Chapitre IV
Optimisation multi-objective
des paramètres de sortie

IV.1.Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de la démarche de l'application des méthodes d'optimisation « multi-objective » sur un plan d'expérience de Taguchi L_{16} . Les paramètres de coupe pris en compte lors de cette étude sont les suivants : la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p) avec les paramètres technologiques de sorties qui sont : la rugosité de surface (R_a), la température de coupe (T°), la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau enlevé (MRR). L'optimisation multi-objective a été réalisée par les méthodes à savoir : la fonction de désirabilité (DF), l'analyse relationnelle grise (GRA) et la méthode de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données (DEAR) afin de sélectionner un régime de coupe optimal qui satisfait les quatre paramètres de sortie simultanément.

IV.2. Fonction de désirabilité

L'optimisation des conditions d'usinage est une stratégie intelligente et très efficace pour résoudre de nombreux problèmes liés à l'industrie. Lorsqu'il s'agit d'optimiser plusieurs paramètres de sortie simultanément [50]. L'objectif des industriels est de réduire les coûts de production tout en augmentant la productivité [51]. Parmi les différentes méthodes d'optimisation appliquées dans le domaine de la fabrication mécanique, l'approche de la fonction de désirabilité (DF) est largement utilisée [52 - 53]. Cette méthode est flexible, puissante, simple et nécessite moins d'étapes de calcul par rapport aux autres techniques d'optimisation multi-objectifs. Les étapes suivantes sont utilisées dans (DF) pour optimiser les paramètres du processus [54].

1^{ère} étape : L'indice de désirabilité individuelle, « di » pour les réponses correspondantes peut être trouvé en utilisant les équations IV.1 et IV.2. Selon les valeurs de la réponse, il existe 2 types de fonction de désirabilité.

- Le plus grand est le meilleur.

Si la réponse doit être maximisée, la désirabilité individuelle est définie comme :

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_j \leq Y_{\min} \\ \left\{ \frac{Y_j - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \right\}^r & \text{si } Y_{\min} \leq Y_j \leq Y_{\max}; \quad r \geq 0 \\ 1 & \text{si } Y_j \geq Y_{\max} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

- Le plus petit est le meilleur.

Si la réponse doit être minimisée, nous pourrions utiliser.

$$d_i = \begin{cases} 1 & \text{si } Y_j \leq Y_{\min} \\ \left\{ \frac{Y_j - Y_{\max}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \right\}^r & \text{si } Y_{\min} \leq Y_j \leq Y_{\max}; \quad r \geq 0 \\ 0 & \text{si } Y_j \geq Y_{\max} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Où: Y_j a une valeur normalisée ; Y_{min} est le minimum de valeurs de colonne particulières (caractéristique de réponse) ; Y_{max} est le maximum de valeurs de colonne particulières (caractéristique de réponse) et r : paramètre de pondération.

2^{ème} étape : La désirabilité globale, D peut être calculée en utilisant les valeurs « di » de toutes les réponses. Ceci est fait en utilisant l'équation IV.3.

$$D = \sqrt[w]{d_1^{w1} \times d_2^{w2} \times \dots \times d_n^{wn}} \quad (IV.3)$$

Où : w, w_1, w_2, \dots, w_n sont les poids attribués. Étant donné l'importance de tous les paramètres technologiques pendant l'opération d'usinage, une pondération égale leurs est attribuée.

Cette étude met en œuvre une optimisation multi-objective des paramètres de sortie : rugosité de surface (R_a), température de coupe (T°) et puissance de coupe (P_c) en s'appuyant sur une approche par la fonction de désirabilité (DF).

Le **tableau IV.1** présente les objectifs d'optimisation et les intervalles de variation des paramètres de coupe en usinage. Il définit les limites inférieures et supérieures pour la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap), ainsi que les valeurs cibles à minimiser pour la rugosité (R_a), la température de coupe (T°) et la puissance de coupe (P_c).

Tableau VI.1: Objectifs de l'optimisation et l'intervalle de variation des paramètres de coupe.

Conditions	Objective	Limites	
		Inférieur	Supérieur
V_c	/	120	340
f	/	0.08	0.2
ap	/	0.4	1.6
R_a	Minimise	1.33	6.57
T°	Minimise	160	200
P_c	Minimise	30.04	196.4

Cette étude aborde deux cas d'optimisation multi-objectifs. Le premier cas vise l'optimisation simultanée des paramètres de réponse : rugosité de surface (R_a), température de coupe (T°) et puissance de coupe (P_c). Le second cas étend cette approche en intégrant également le débit de copeau enlevé (MRR) comme critère supplémentaire, permettant une analyse plus complète des performances d'usinage.

Dans le premier cas d'optimisation l'importance est maintenue à (3) pour les trois paramètres de sortie, donc a importance égale. Le diagramme des rampes présenté dans la **figure. IV.1** illustre de manière remarquable le profil optimal dans le cadre du premier cas d'optimisation. Le graphique, bien plus qu'une simple représentation, est le reflet d'un équilibre parfaitement maîtrisé entre les variables d'entrée et les réponses du système, avec

une désirabilité globale exceptionnelle de 0.937, traduisant la proximité quasi-parfaite de cette solution avec l'idéal théorique. Les meilleures conditions de coupe favorisant cet objectif ont été trouvées comme suit : $V_c = 120$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.4$ mm. Les valeurs optimisées des paramètres de sorties sont : $R_a = 2.11096$ μm , $T^\circ = 160.151$ $^\circ\text{C}$ et $P_c = 34.9181$ W.

Il est remarquable de constater que toutes les variables d'entrée (V_c , f et a_p) se positionnent à leur minimum admissible, révélant une tendance claire du système vers une configuration à faible sollicitation, probablement en faveur d'une meilleure stabilité, d'une consommation réduite ou d'un comportement plus contrôlé du processus. Cette orientation vers le minimalisme opérationnel semble entraîner une performance optimisée des réponses.

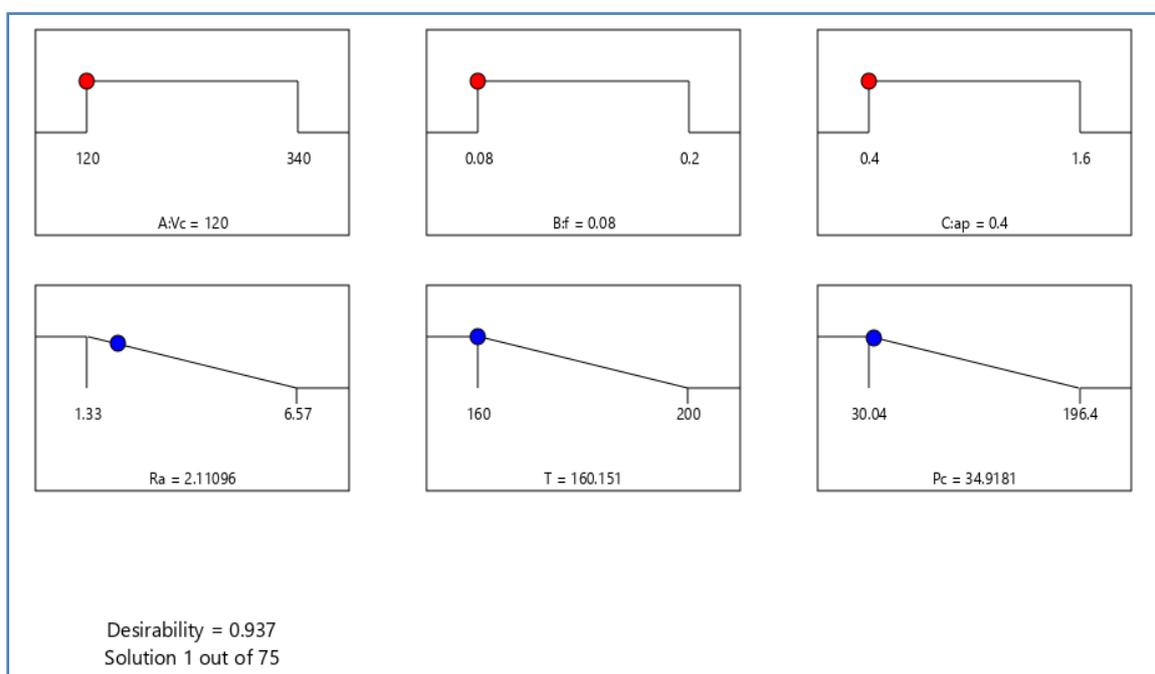


Fig.IV.1 : Diagramme des rampes pour le premier cas d'optimisation.

La *figure IV.2* illustre des barres de désirabilité analogique pour les facteurs de réponse optimisés pour le premier cas d'optimisation. D'après cette figure, on peut conclure que le meilleur résultat de désirabilité a été obtenu pour la température de coupe avec une valeur de désirabilité égale à 0.996228 ($Df_1 \approx 1$, le cas idéal). Par contre, la valeur de désirabilité liée à la puissance de coupe a été obtenue dans la limite de 0.97 ($Df_2 = 0.970677$). Aussi, La valeur de désirabilité associée à la rugosité de surface a été obtenue dans la limite de 0.85 ($Df_3 = 0.850963$). En ce qui concerne la désirabilité combinée, une valeur de désirabilité de 0.937 a été atteinte ($Dc = 0.937$). En général, on peut conclure que la plage de désirabilité enregistrée a été entre (0.8 et 1). Ce qui confirme l'importance des résultats d'optimisation et la possibilité d'exploitation de ces résultats dans les limites des paramètres étudiés.

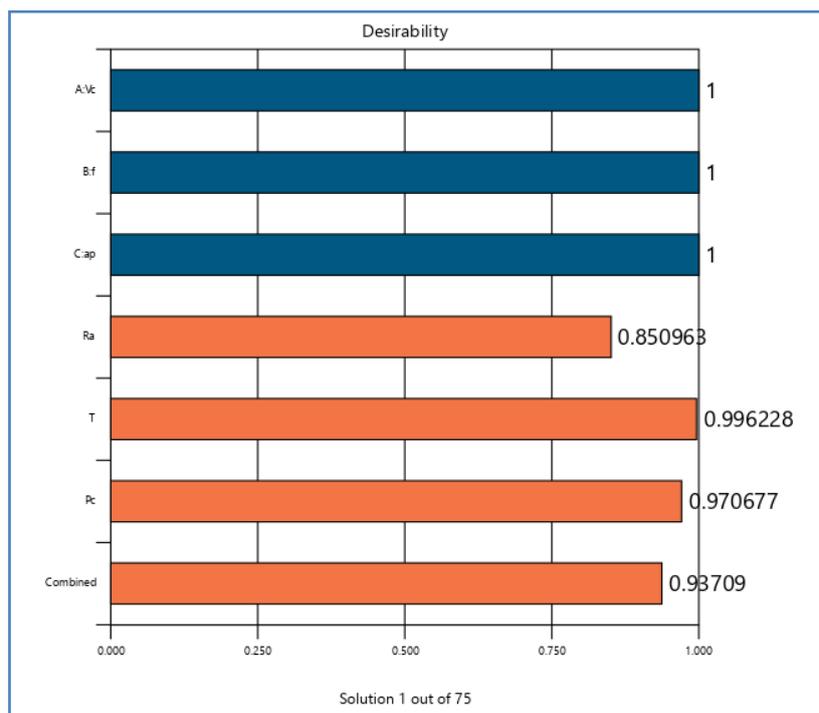


Fig.IV.2 : Barres de désirabilité analogique pour le premier cas d'optimisation.

La *figure IV.3* illustre la surface de réponse en 3D pour la désirabilité combinée, la rugosité de surface (R_a), la température de coupe (T°) et la puissance de coupe (P_c), en fonction de la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et une profondeur de passe (a_p) constante de 0.4 mm. Les surfaces de réponse révèlent que les meilleures performances sont atteintes dans une zone où V_c et f sont faibles, permettant d'obtenir une désirabilité maximale de 0.93709, une rugosité de surface réduite ($R_a = 2.11 \mu\text{m}$), une température de coupe minimale ($T = 160.15 \text{ }^\circ\text{C}$) et une faible consommation énergétique ($P_c = 34.92 \text{ W}$). Ces résultats soulignent la cohérence du modèle et mettent en évidence un compromis optimal entre qualité de surface, efficacité énergétique et stabilité thermique, offrant ainsi une orientation claire pour le choix des paramètres d'usinage.

La *figure IV.4* présente les graphes de contour en 2D pour la désirabilité, la rugosité de surface (R_a), la température de coupe (T°) et la puissance de coupe (P_c), en fonction de la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et une profondeur de passe (a_p) constante de 0.4 mm. Les courbes de niveau mettent en évidence une zone optimale, située dans la région inférieure gauche des graphes, où les valeurs de V_c et f sont faibles. Cette zone correspond à une désirabilité maximale de 0.93709, associée à une rugosité minimale ($R_a = 2.11096 \mu\text{m}$), une température de coupe réduite ($T = 160.151 \text{ }^\circ\text{C}$) et une faible puissance de coupe consommée ($P_c = 34.9181 \text{ W}$). Les contours lisses et bien répartis valident la stabilité du modèle et permettent une lecture explicite des zones de performance optimale. Ces représentations confirment visuellement les tendances observées dans les graphes 3D, renforçant ainsi la fiabilité des conditions d'usinage optimales déterminées.

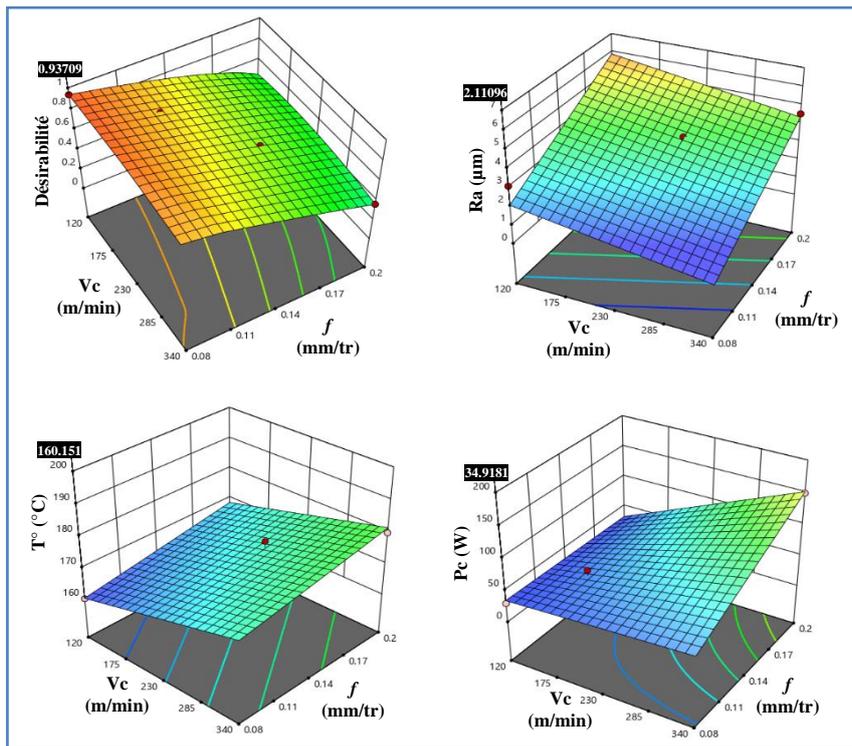


Fig.IV.3 : Surfaces de réponse en 3D pour le premier cas d'optimisation (avec $a_p = 0.4$ mm).

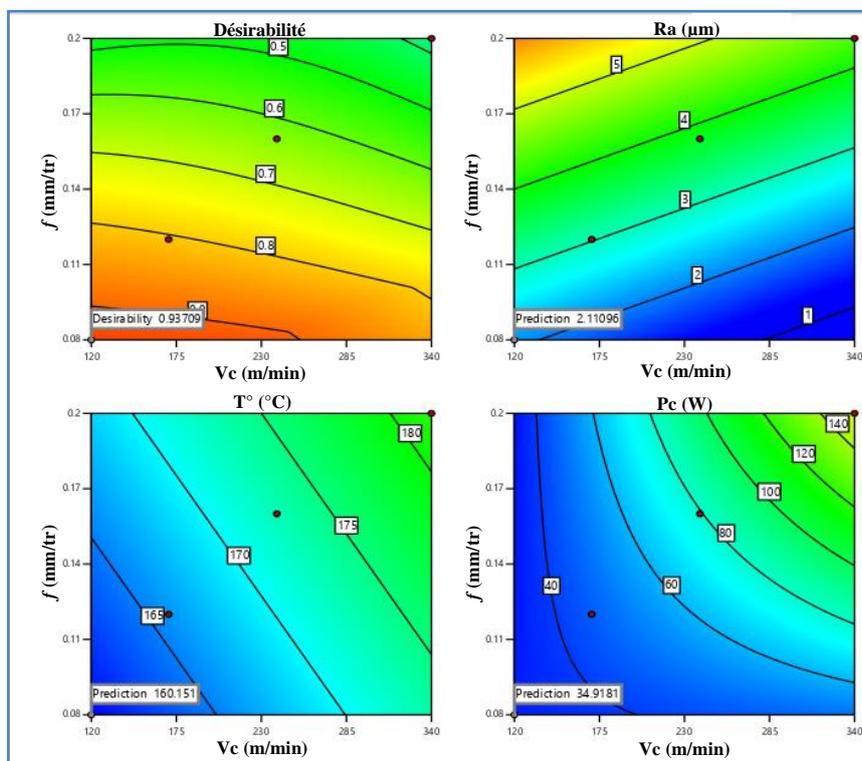


Fig.IV.4 : Graphes de contour en 2D pour le premier cas d'optimisation (avec $a_p = 0.4$ mm).

Dans le deuxième cas, on prend la productivité (MRR) en compte avec les autres paramètres de sortie. La *figure IV.5* présente un diagramme des rampes illustrant les

niveaux optimaux des paramètres pour le deuxième cas d'optimisation. Les variables d'entrée (V_c , f et a_p) montrant qu'elles ont atteint des valeurs bien situées dans leurs plages admissibles. Les variables de sortie (R_a , T° , P_c et MRR), quant à elles, indiquent un objectif de minimisation ou de maximisation selon le critère visé. Le régime de coupe optimal trouvé est comme suit : $V_c = 254.545$ m/min, $f = 0.101112$ mm/tr et $a_p = 0.693578$ mm. Les valeurs optimisées des paramètres de sorties sont : $R_a = 1.9585$ μm , $T^\circ = 177.013$ $^\circ\text{C}$, $P_c = 84.6714$ W et $MRR = 18.2071$ cm^3/min . La désirabilité globale est de 0.573, traduisant un compromis acceptable entre les différentes réponses, bien que certaines performances puissent encore être améliorées. Ce diagramme fournit ainsi une visualisation claire et pratique de l'équilibre entre les paramètres et les objectifs du processus.

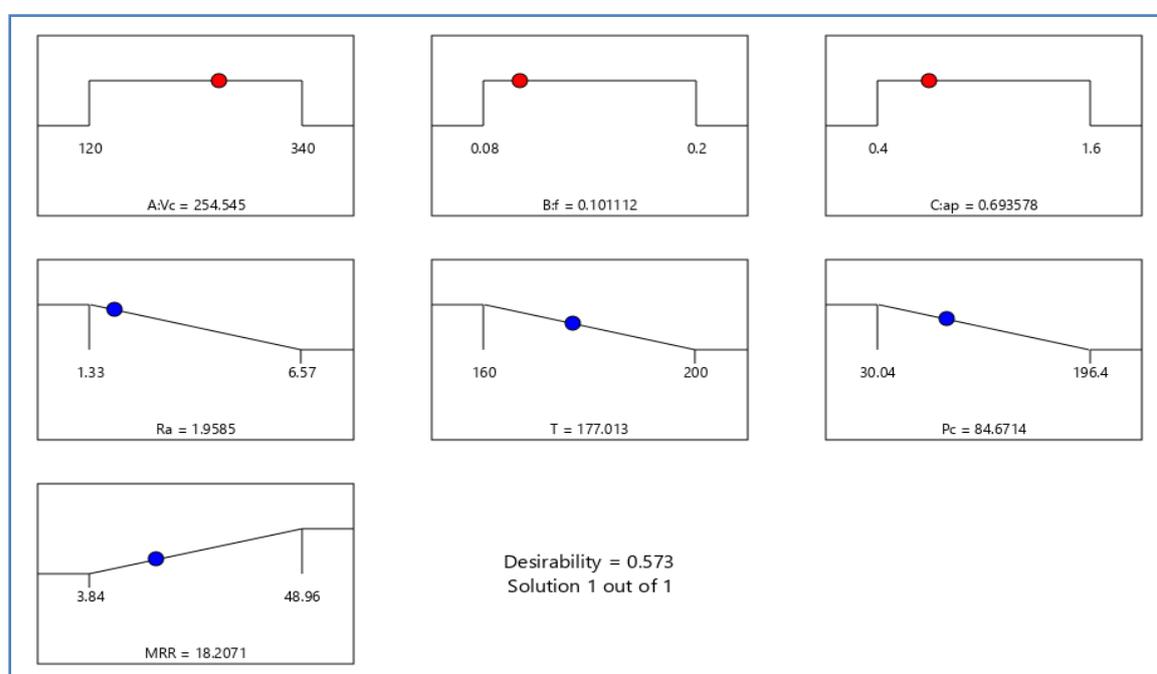


Fig.IV.5 : Diagramme des rampes pour le deuxième cas d'optimisation.

Ensuite, la *figure IV.6* présente les barres de désirabilité analogique, qui détaillent la contribution individuelle de chaque réponse à la désirabilité combinée. Selon cette figure, il ressort que le meilleur résultat en termes de désirabilité a été obtenu pour la rugosité de surface (R_a), avec une valeur de désirabilité atteignant 0.88 ($Df_1 = 0.880057$), ce qui témoigne d'une excellente performance pour ce critère. En revanche, la puissance de coupe (P_c) présente une performance nettement plus modérée, avec une valeur de désirabilité plafonnant à 0.67 ($Df_2 = 0.671608$). Ce résultat suggère que, bien que la puissance de coupe soit restée dans une plage acceptable, elle n'a pas atteint un niveau de performance optimal dans le cadre de l'optimisation globale du processus. De plus, la valeur de désirabilité liée à la température de coupe (T°) a été obtenue à hauteur de 0.57 ($Df_3 = 0.574668$), ce qui traduit une performance relativement faible pour ce critère. Bien que cette valeur reste dans les limites acceptables, elle indique que la température n'a pas été

parfaitement maîtrisée dans le cadre de l'optimisation, ce qui pourrait affecter la stabilité du processus ou la qualité de la pièce usinée. Ce résultat suggère qu'une attention particulière devrait être portée à ce paramètre pour améliorer davantage l'efficacité thermique du procédé. En outre, le résultat de désirabilité obtenu pour le débit de copeaux enlevé (MRR) se situe à un niveau relativement bas, avec une valeur de 0.31 ($Df_4 = 0.318421$). Cette faible désirabilité indique que le critère de productivité, représenté par le MRR, n'a pas été pleinement satisfait dans cette configuration d'optimisation. Cela suggère un compromis défavorable sur cet aspect, probablement au profit de la qualité de surface ou de la réduction des contraintes thermiques et mécaniques. Une telle performance souligne la nécessité d'un réajustement des paramètres si l'objectif prioritaire devient l'amélioration du taux d'enlèvement de matière. En ce qui concerne la désirabilité combinée, une valeur de 0.573 a été atteinte ($Dc = 0.573471$), ce qui reflète un compromis globalement satisfaisant entre les différentes réponses optimisées. En général, on peut conclure que la plage de désirabilité enregistrée a été entre (0.3 et 1), ce qui confirme l'importance des résultats d'optimisation et la possibilité d'exploitation de ces résultats dans les limites des paramètres étudiés.

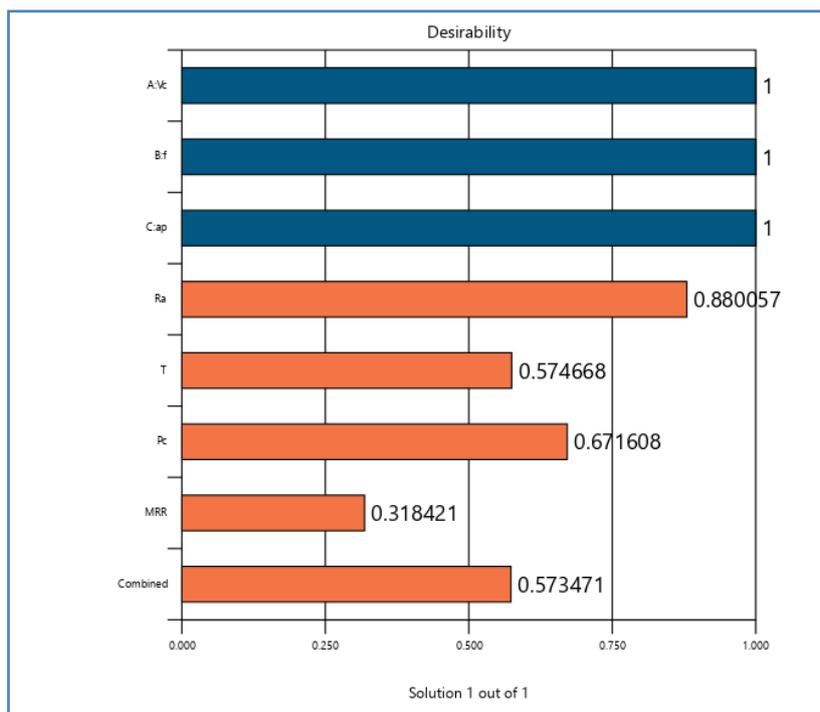


Fig.IV.6 : Barres de désirabilité analogique pour le deuxième cas d'optimisation.

La *figure IV.7* illustre la surface de réponse en 3D pour la désirabilité, la rugosité de surface (R_a), la température de coupe (T°), la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau enlevé (MRR), en fonction de la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et une profondeur de passe (ap) constante de 0.693578 mm. Les surfaces de réponse révèlent que les meilleures performances sont atteintes dans une zone où V_c et f sont faibles, permettant d'obtenir une

désirabilité maximale de 0.573471, une rugosité de surface réduite ($R_a = 1.9585 \mu\text{m}$), une température de coupe minimale ($T = 177.013 \text{ }^\circ\text{C}$) et une faible consommation énergétique ($P_c = 84.6714 \text{ W}$). Concernant la valeur obtenue par le débit de copeaux enlevé, elle est de : $\text{MRR} = 18.2071 \text{ cm}^3/\text{min}$. Ces résultats soulignent la cohérence du modèle et mettent en évidence un compromis optimal entre qualité de surface, efficacité énergétique et stabilité thermique, offrant ainsi une orientation claire pour le choix des paramètres d'usinage.

La *figure IV.8* présente les graphes de contour en 2D pour la désirabilité, la rugosité de surface (R_a), la température de coupe (T°), la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau enlevé (MRR), en fonction de la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et une profondeur de passe (a_p) constante de 0.693578 mm. Les courbes de niveau mettent en évidence une zone optimale, située dans la région inférieure gauche des graphes, où les valeurs de V_c et f sont faibles. Cette zone correspond à une désirabilité maximale de 0.573471, associée à une rugosité minimale ($R_a = 1.9585 \mu\text{m}$), une température de coupe réduite ($T = 177.013 \text{ }^\circ\text{C}$), une puissance de coupe consommée ($P_c = 84.6714 \text{ W}$) et un débit de copeau enlevé ($\text{MRR} = 18.2071 \text{ cm}^3/\text{min}$). Les contours valident la cohérence du modèle et permettent une lecture claire des zones de performance optimale. Ces représentations confirment visuellement les tendances observées dans les graphes 3D, renforçant ainsi la fiabilité des conditions d'usinage optimales déterminées.

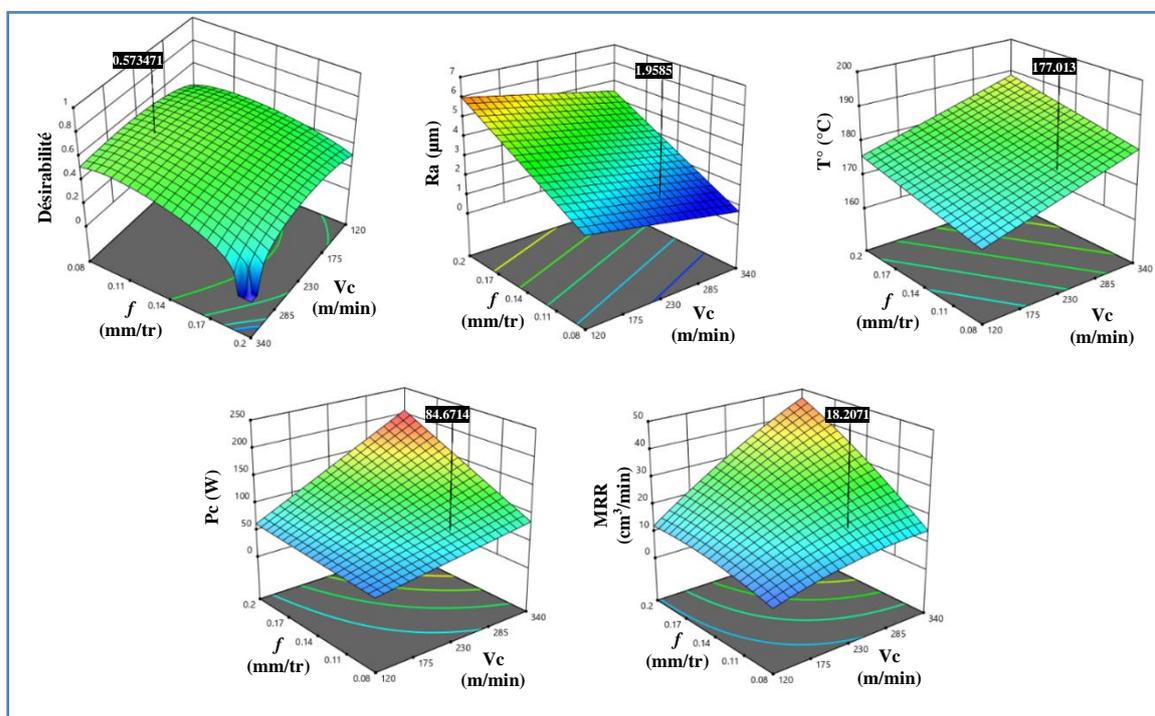


Fig.IV.7 : Surfaces de réponse en 3D pour le deuxième cas d'optimisation (avec $a_p = 0.693 \text{ mm}$).

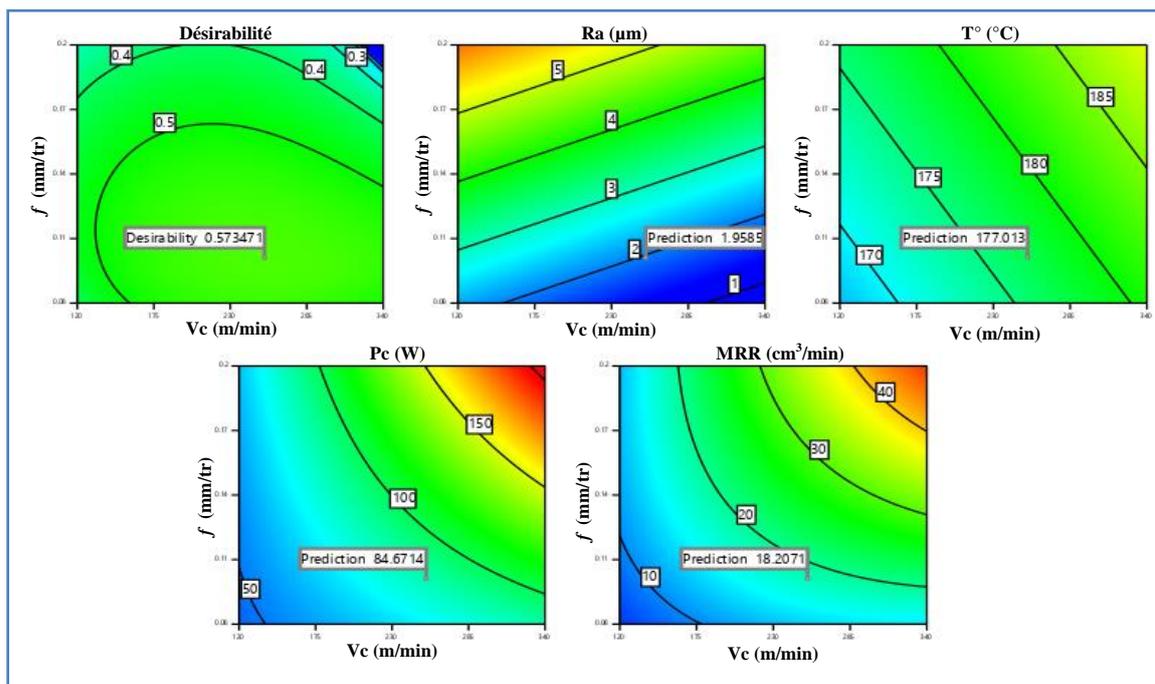


Fig.IV.8 : Graphes de contour en 2D pour le deuxième cas d’optimisation (avec $a_p = 0.693$ mm).

Le *tableau IV.2* récapitule les résultats trouvés pour les deux cas d’optimisation (sans et avec MRR). Dans le premier cas, les conditions de coupe sont plus faibles, ce qui se traduit par une rugosité de surface (R_a) de $2.11 \mu\text{m}$, une température de coupe (T°) modérée de $160.15 \text{ }^\circ\text{C}$ et une faible puissance de coupe (P_c) de 34.92 W , avec une désirabilité élevée de 0.937 . En revanche, dans le second cas, l’augmentation des paramètres de coupe permet d’améliorer le débit de copeau enlevé (MRR) à $18.21 \text{ cm}^3/\text{min}$ et d’obtenir une meilleure rugosité de surface ($R_a = 1.96 \mu\text{m}$). Cependant, cela entraîne une hausse significative de la température de coupe ($T^\circ = 177.01 \text{ }^\circ\text{C}$) et de la puissance de coupe ($P_c = 84.67 \text{ W}$), ce qui diminue la désirabilité globale à 0.573 . Ainsi, le premier cas privilégie la qualité et l’efficacité énergétique, tandis que le second optimise la productivité au détriment de la désirabilité globale.

Tableau IV.2: Résultats trouvés pour les deux cas d’optimisation.

	<i>Conditions de coupe</i> (V_c, f et a_p)	<i>Les sorties</i> (R_a, T° et P_c)	<i>Désirabilité</i>
<i>1^{er} cas</i> (sans MRR)	$V_c = 120 \text{ m/min}$ $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ $a_p = 0.4 \text{ mm}$	$R_a = 2.110 \mu\text{m}$ $T^\circ = 160.151 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_c = 34.918 \text{ W}$ MRR = $3.84 \text{ cm}^3/\text{min}$ (calculé)	$D_c = 0.937$
<i>2^{ème} cas</i> (avec MRR)	$V_c = 254.545 \text{ m/min}$ $f = 0.101 \text{ mm/tr}$ $a_p = 0.693 \text{ mm}$	$R_a = 1.958 \mu\text{m}$ $T^\circ = 177.013 \text{ }^\circ\text{C}$ $P_c = 84.671 \text{ W}$ MRR = $18.207 \text{ cm}^3/\text{min}$	$D_c = 0.573$

VI.3. Méthode MCDM

Le problème de la sélection des conditions de coupe optimales lors d'un processus d'usinage est l'une des principales préoccupations de l'industrie aujourd'hui. Les méthodes (MCDM) sont parmi les méthodes d'optimisation les plus importantes. De nombreux chercheurs ont utilisé avec succès différentes méthodes (MCDM) en usinage pour sélectionner les meilleures conditions de coupe selon des objectifs souhaités [52].

Dans ce travail, la méthode d'analyse rationnelle grise (GRA) a été choisie pour réaliser une optimisation des paramètres (Ra, T°, Pc et MRR). Le but de la méthode GRA est de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui nous permet de minimiser la rugosité de surface (Ra), la température de coupe (T°), la puissance de coupe (Pc) et maximiser le débit du copeau enlevé (MRR) simultanément.

Dans la partie suivante on va expliquer les étapes considérées pour cette méthode d'analyse:

- **Étape 1:** la normalisation

La première étape de l'analyse relationnelle grise est de normaliser (dans l'intervalle 0 et 1) les données expérimentales selon le but d'optimisation [54].

- Pour la minimisation du critère, la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{IV.4})$$

Et c'est le cas de la rugosité de surface (Ra).

- Pour la maximisation du critère, et c'est le cas du débit du copeau enlevé (MRR), alors la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{IV.5})$$

Où : $x_i(k)$ valeur normalisée de la séquence, $\max(x_i^0(k))$ la plus grande valeur de $x_i^0(k)$ k^{ème} réponse, $\min(x_i^0(k))$ la plus petite valeur de $x_i^0(k)$ la k^{ème} réponse [53].

- **Étape 2:** Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational) ($\eta_i(k)$) peuvent être calculés comme suit [54 - 55] :

$$\eta_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \omega \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \omega \Delta_{max}} ; \quad 0 < \eta_i(k) \leq 1 \quad (\text{IV.6})$$

Où:

$\Delta_{i0}(k)$: La différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$;

Δ_{min} : La plus petite valeur de $\Delta_{0i}(k)$;

Δ_{max} : La plus grande valeur de $\Delta_{0i}(k)$, coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{IV.7})$$

$$\Delta_{min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{IV.8})$$

$$\Delta_{max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{IV.9})$$

La valeur de ω est en général égale à (0,5) [56].

La valeur du coefficient η a été prise (0,5).

- **Étape 3:** Calcul du GRG (Grey Relational Grade)

Après avoir calculé la moyenne des coefficients du relationnel gris (Grey Relational Coefficients), les γ_i (Grey Relational Grade) peuvent être obtenu comme suit :

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \eta_i(k) \quad (\text{IV.10})$$

Où : n est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas n=4).

La plus grande valeur de GRG est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale ($x_0(k)$) et la séquence donnée ($x_i(k)$). La séquence idéale ($x_0(k)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel (Relational Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale [53].

- **Étape 4:** Détermination des paramètres de coupe optimaux

Le [tableau IV.3](#) résume les résultats de l'application des différentes étapes de la méthode (GRA).

Tableau IV.3: Résultats de l'optimisation par la méthode GRA.

N°	Normalisation				GRC				GRG	RANK
	Ra	T°	Pc	MRR	Ra	T°	Pc	MRR		
1	0.656	1.000	1.000	0.000	0.593	1.000	1.000	0.333	0.732	1
2	0.595	0.625	0.818	0.170	0.553	0.571	0.734	0.376	0.558	8
3	0.261	0.250	0.620	0.426	0.404	0.400	0.568	0.465	0.459	15
4	0.000	0.125	0.264	0.766	0.333	0.364	0.405	0.681	0.446	16
5	0.954	0.775	0.826	0.156	0.916	0.690	0.742	0.372	0.680	3
6	0.853	0.975	0.855	0.096	0.773	0.952	0.775	0.356	0.714	2
7	0.385	0.075	0.148	0.879	0.449	0.351	0.370	0.806	0.494	11
8	0.088	0.175	0.223	0.819	0.354	0.377	0.392	0.734	0.464	14
9	1.000	0.125	0.417	0.426	1.000	0.364	0.462	0.465	0.573	6
10	0.859	0.025	0.080	0.936	0.780	0.339	0.352	0.887	0.589	5
11	0.525	0.625	0.791	0.255	0.513	0.571	0.705	0.402	0.548	9
12	0.250	0.350	0.179	0.766	0.400	0.435	0.378	0.681	0.474	12
13	0.874	0.000	0.000	0.879	0.799	0.333	0.333	0.806	0.568	7
14	0.853	0.075	0.001	1.000	0.773	0.351	0.334	1.000	0.614	4
15	0.666	0.250	0.045	0.879	0.600	0.400	0.344	0.806	0.537	10
16	0.385	0.500	0.280	0.518	0.449	0.500	0.410	0.509	0.467	13

D'après les résultats du GRG (*tableau IV.3* et *figure IV.9*), la combinaison optimale correspond à la plus grande valeur du critère (GRG) parmi les essais du plan d'expérience, correspond au test numéro 1. La méthode d'optimisation GRA a été appliquée par des chercheurs dans différents domaines de l'optimisation de processus complexes. De nombreux documents de recherche indiquent l'efficacité de cette méthode [57 - 58].

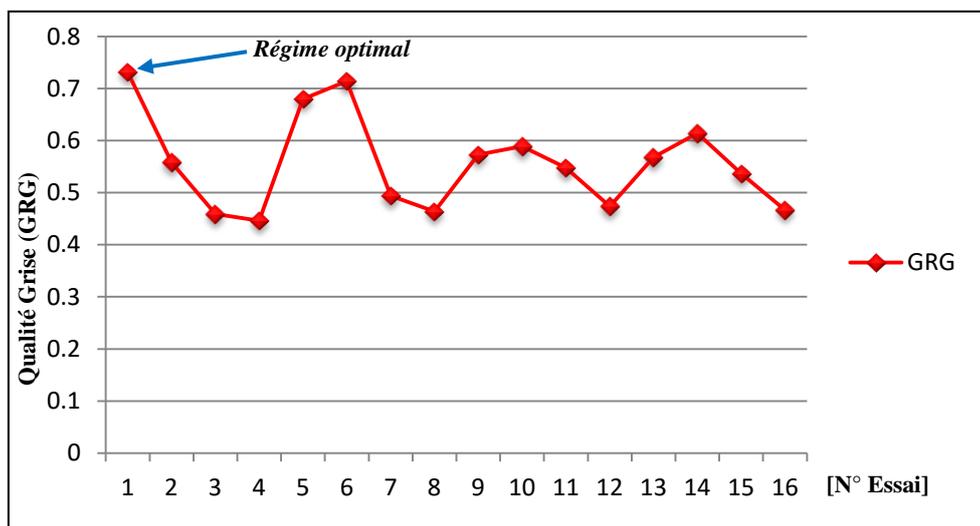


Fig.IV.9: Qualité Relationnelle Grise (GRG).

Pour obtenir les résultats d'optimisation, nous avons procédé au tracé des droites des effets principaux des différents indices pour la méthode GRA (*figure IV.10*). En effet, les niveaux optimaux des facteurs d'entrée correspondent à la valeur maximale des indices. On peut voir, que le régime optimal pour la méthode GRA correspond à la combinaison (V_{c2} , f_1 et ap_1).

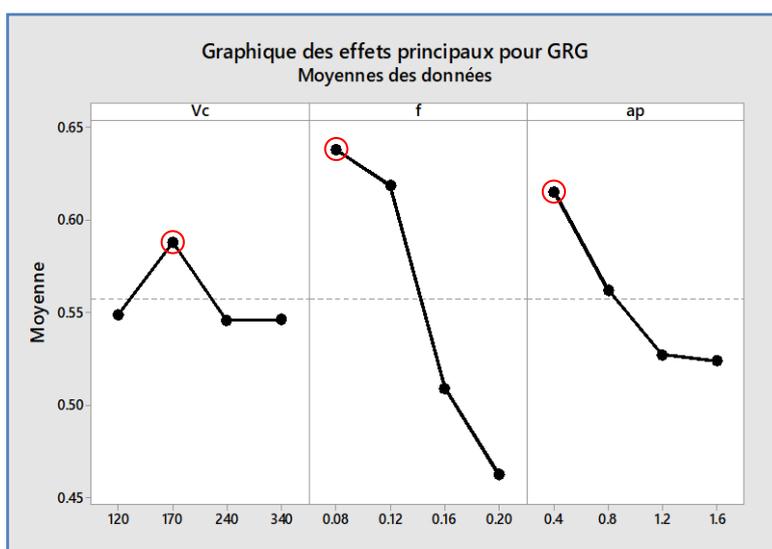


Fig.IV.10: Graphique des effets principaux pour la méthode GRA.

Aussi, nous avons utilisé la méthode d'analyse d'enveloppement des données (DEAR) pour réaliser une optimisation des paramètres (R_a , T° , P_c et MRR). Le but de la méthode DEAR est d'optimiser plusieurs réponses simultanément dans un processus expérimental (La minimisation de R_a , T° , P_c et la maximisation de MRR).

Dans cette méthode, une combinaison de réponses originales est transformée en un rapport, de sorte que les niveaux les plus appropriés peuvent être calculés sur la base de ce rapport. La valeur peut être considérée comme un indice de performance multi réponses (MRPI) pour calculer les combinaisons optimales des paramètres d'entrée. Les étapes suivantes sont impliquées dans la méthodologie de classement basée sur l'analyse d'enveloppement des données [59] :

Étape 1: Calculer les poids (W) pour chaque réponse (R_a , T° , P_c et MRR). Le poids est le rapport entre une réponse et la somme de toutes les réponses comme il est indiqué aux (Eq. IV.11, IV.12, IV.13 et IV.14).

$$W_{R_a} = \frac{1}{\sum \frac{1}{R_a}} \quad (\text{IV.11})$$

$$W_{T^\circ} = \frac{1}{\sum \frac{1}{T^\circ}} \quad (\text{IV.12})$$

$$W_{P_c} = \frac{1}{\sum \frac{1}{P_c}} \quad (\text{IV.13})$$

$$W_{MRR} = \frac{MRR}{\sum MRR} \quad (\text{IV.14})$$

Étape 2: Convertir les données de réponse en données pondérées en multipliant les données observées par leur propre poids (Eq. IV.15, IV.16, IV.17 et IV.18).

$$A = W_{R_a} \times R_a \quad (\text{IV.15})$$

$$B = W_{T^\circ} \times T^\circ \quad (\text{IV.16})$$

$$C = W_{P_c} \times P_c \quad (\text{IV.17})$$

$$D = W_{MRR} \times MRR \quad (\text{IV.18})$$

Étape 3: Calculer l'indice de performance multi réponses (MRPI) en utilisant l'équation IV.19

$$MRPI = A + B + C + D \quad (\text{IV.19})$$

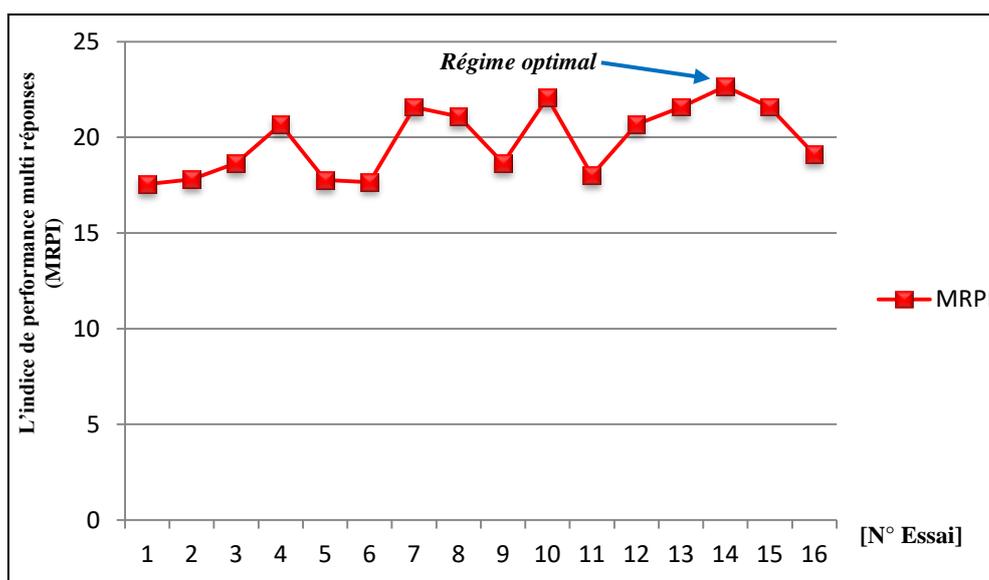
Le [tableau IV.4](#) résume les résultats de l'application des différentes étapes de la méthode (DEAR).

Tableau IV.4: Résultats de l'optimisation par la méthode DEAR.

N°	$W (Ra)$	$W (T^{\circ})$	$W (Pc)$	$W (MRR)$	$MRPI$	$Rank$
1	0.056	0.072	0.194	0.008	17.545	16
2	0.051	0.066	0.097	0.025	17.798	13
3	0.034	0.061	0.062	0.049	18.652	11
4	0.027	0.059	0.038	0.082	20.676	7
5	0.113	0.068	0.099	0.023	17.767	14
6	0.084	0.071	0.108	0.018	17.656	15
7	0.039	0.058	0.034	0.093	21.575	4
8	0.029	0.060	0.037	0.088	21.083	6
9	0.133	0.059	0.046	0.049	18.652	10
10	0.085	0.058	0.032	0.099	22.067	2
11	0.046	0.066	0.090	0.033	18.019	12
12	0.034	0.062	0.035	0.082	20.676	8
13	0.089	0.058	0.030	0.093	21.575	3
14	0.084	0.058	0.030	0.105	22.654	1
15	0.057	0.061	0.031	0.093	21.575	5
16	0.039	0.064	0.039	0.058	19.100	9

Selon les valeurs de MRPI calculées à partir des poids (W) des différentes réponses et pour chaque expérience la combinaison optimale correspond à la plus grande valeur du critère (MRPI) (Rank 1), cela correspond à l'essai numéro 14 (*tableau IV.4* et *figure IV.11*).

La technique DEAR a montré une grande efficacité dans les domaines de la technologie de fabrication avec une méthodologie simple [60]. Plusieurs études indiquent l'efficacité de cette méthode [61-62].

**Fig.IV.11:** Indice de performance multi réponses (MRPI).

Afin de déterminer les résultats d'optimisation, le graphique des effets principaux des différents indices associés à la méthode DEAR ont été tracés (*figure IV.12*). Les

niveaux optimaux des facteurs d'entrée correspondent aux points où les indices atteignent leur valeur maximale. L'analyse montre que les conditions optimales pour la méthode DEAR sont obtenues avec la combinaison suivante : Vc_4, f_4 et ap_4 .

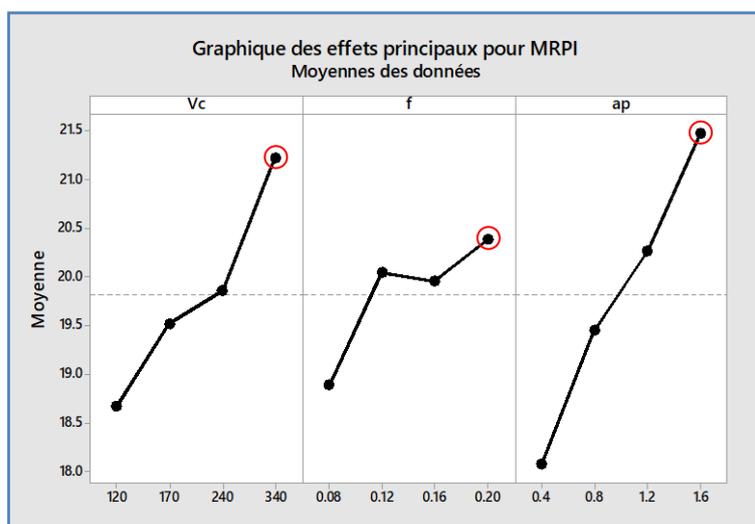


Fig.IV.12: Graphique des effets principaux pour la méthode DEAR.

VI.4. Tests de confirmation

L'application des méthodes d'optimisation (GRA et DEAR) ont permis d'obtenir les résultats résumés dans le [tableau IV.5](#). Les régimes optimaux définis par les deux méthodes sont extraits des graphiques des effets principaux ([figure IV.10 et figure IV.12](#)). Mais les régimes optimaux proposés ne figurent pas dans le [tableau III.1](#), et par conséquent, les sorties ne sont pas définies. À cet effet, l'équation IV.20 a été utilisée pour la prédiction des valeurs des sorties (Ra , T° et Pc) [63]. Les résultats des sorties sont exposés au [tableau IV.5](#).

$$\bar{\varphi} = \varphi_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\varphi}_i - \varphi_m) \quad (IV.20)$$

Où:

- $\bar{\varphi}$: Valeur attendue de la réponse dans les conditions optimales.
- φ_m : La moyenne de chacune des réponses.
- $\bar{\varphi}_i$: La moyenne qui correspond au niveau optimal de chaque paramètre d'entrée.
- q : Le nombre de paramètre d'entrée.

Tableau IV.5: Régimes et réponses optimaux.

Méthodes	Régimes optimaux			Réponses			
	Vc	f	ap	Ra	T°	Pc	MRR
GRA	170	0.08	0.4	1.877	159.75	32.225	5.44
DEAR	340	0.2	1.6	5.237	207.75	259.177	108.8

L'analyse des résultats optimaux obtenus par les méthodes GRA et DEAR montre que la méthode DEAR se distingue par des valeurs nettement plus élevées que la méthode GRA dans tous les paramètres à l'exception de la valeur du MRR. On remarque que la valeur du MRR = 108.8 cm³/min est la plus grande valeur enregistrée car elle prend le maximum des valeurs des conditions de coupe ($V_c = 340$ m/min, $f = 0.2$ mm/tr et $a_p = 1.6$ mm).

En conclusion, cette augmentation suggère que la méthode DEAR favorise des performances intensives, permettant un enlèvement de matière rapide, mais au prix d'une rugosité élevée ($R_a = 5.237$ μm), et d'une température et puissance de coupe plus élevées aussi. En revanche, la méthode GRA privilégie des paramètres modérés, adaptés à des applications où la précision et l'économie d'énergie sont prioritaires. Le choix entre les deux dépendra donc des objectifs spécifiques : productivité maximale (DEAR) ou équilibre entre la qualité, température et consommation d'énergie (GRA).

VI.5. Récapitulatif des résultats

Le *tableau IV.6* présente la comparaison entre les résultats obtenus par les différentes méthodes (DF, GRA et DEAR). La méthode DEAR (prédictions) se démarque par un débit de copeau enlevé (MRR maximal = 108.8 cm³/min) mais engendre une puissance de coupe (P_c) élevée, une rugosité de surface (R_a) élevée ainsi qu'une élévation critique de la température de coupe (T°), ce qui la destine à des applications où la productivité est souhaitée. À l'inverse, la méthode GRA (prédictions) donne des valeurs de sortie minimales concernant (R_a , T° et P_c), par contre le MRR est le plus faible enregistré. Les résultats trouvés, en se basant sur le classement, montrent que la méthode DEAR garde toujours un MRR élevé (MRR = 43.52 cm³/min) avec une rugosité très acceptable ($R_a = 1.99$ μm). Par contre, la méthode GRA a donné une meilleure température et puissance de coupe ($T^\circ = 159$ °C et $P_c = 30.04$ W), avec une valeur élevée de R_a ($R_a = 3.13$ μm) et une valeur basse du MRR (MRR = 3.84 cm³/min). La méthode DF offre un équilibre intermédiaire, combinant une productivité acceptable (MRR = 18.207 cm³/min) avec une meilleure rugosité ($R_a = 1.958$ μm) avec une température de coupe et une consommation d'énergie maîtrisée. Les résultats soulignent ainsi que le choix dépend des priorités opérationnelles : performance maximale (DEAR), qualité de surface (GRA), ou compromis entre les deux premiers (DF).

Tableau IV.6: Comparaison entre les résultats.

Méthodes	Régimes optimaux			Réponses			
	Vc	f	ap	Ra	T°	Pc	MRR
DF	254.545	0.101	0.693	1.958	177.013	84.671	18.207
GRA (classement)	120	0.08	0.4	3.13	159	30.04	3.84
DEAR (classement)	340	0.08	1.6	1.99	200	196.40	43.52
GRA (prédictions)	170	0.08	0.4	1.877	159.75	32.225	5.44
DEAR (prédictions)	340	0.2	1.6	5.237	207.75	259.177	108.8

La *figure IV.13* illustre les valeurs optimales de Ra, T°, Pc et MRR pour les différentes méthodes. En remarque que la valeur optimale de la rugosité de surface (Ra) est obtenue par la méthode GRA (prédictions). Par ailleurs, la méthode GRA (classement) a permis d'identifier les valeurs optimales de la température et de la puissance de coupe (T° et Pc). De plus, la méthode DEAR (prédictions) a été utilisée pour estimer la valeur optimale du débit de copeaux enlevés (MRR).

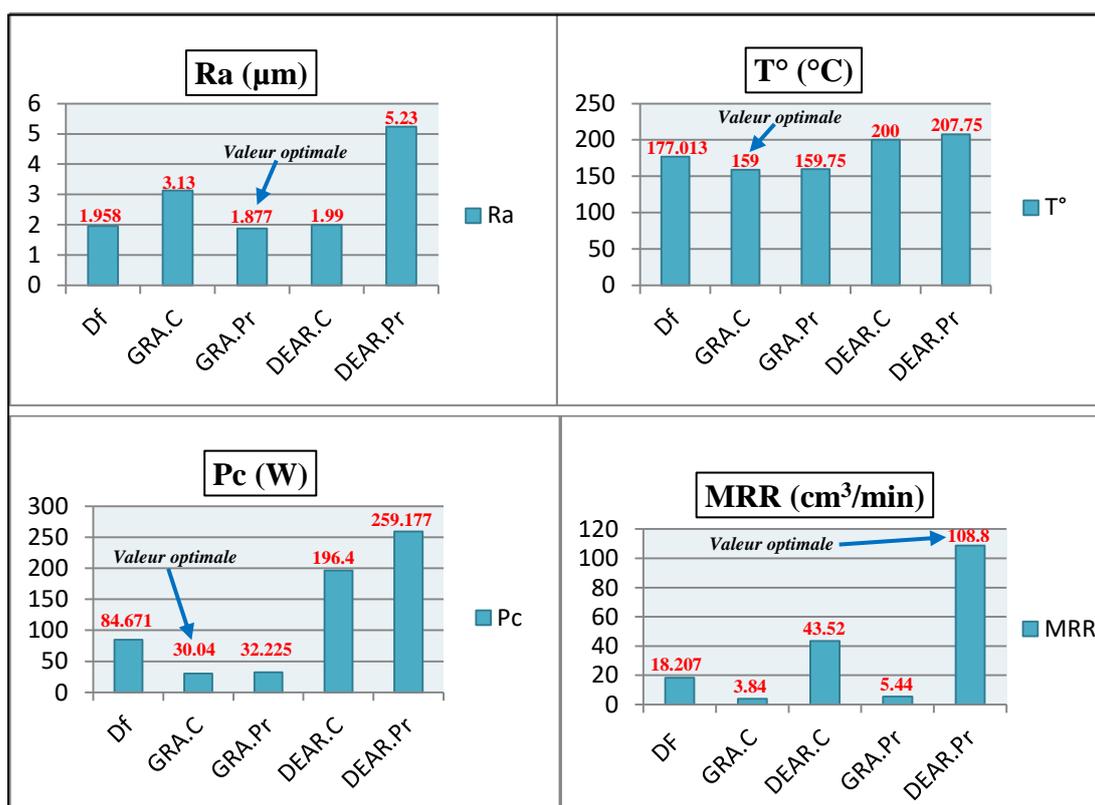


Fig.IV.13: Valeurs optimales de Ra, T°, Pc et MRR pour les différentes méthodes.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une optimisation multi-objective en utilisant les méthodes : DF, GRA et DEAR. Le but est de minimiser la rugosité (Ra), la température

de coupe (T°), la puissance de coupe (P_c) et maximiser le débit du copeau enlevé (MRR) simultanément. A la fin, une comparaison entre les régimes optimaux obtenus par les trois méthodes d'optimisation a été réalisée et discutée.

Conclusion générale

L'étude expérimentale portant sur le tournage du polymère polyétheréthercétone renforcé à 30 % de fibres de verre (PEEK GF 30 %) à l'aide d'un outil de coupe en carbure revêtu, nous a permis de faire une étude statistique suivie par une modélisation des paramètres de performance (R_a), (F_z), (P_c), (T°) et (MRR). Enfin, une optimisation des conditions de coupe en utilisant les méthodes DF, GRA et DEAR a été réalisée. Les résultats trouvés nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- 1) Les résultats de l'étude statistique montrent que :
 - L'ANOVA pour la composante de l'effort de coupe (F_z) indique que (a_p) est le premier paramètre qui agit sur (F_z) avec une contribution de 61.87 %, suivie par (f) avec 29.70 %, puis (V_c) avec 5.18 %.
 - L'ANOVA pour la rugosité de surface (R_a) montre que (f) est le facteur le plus important qui affecte (R_a), sa contribution est de 76.37%, suivie par (V_c) avec 12.54 % et (a_p) avec 1.13%.
 - L'ANOVA pour la température de coupe (T°) montre que (a_p) a la plus grande influence sur (T°), sa contribution est de 73.92 %, suivie par (V_c) avec 14.51 %, l'avance (f) a une contribution plus faible de 5.59 %.
 - L'ANOVA pour la puissance de coupe (P_c) révèle que (a_p) est le facteur le plus influent sur (P_c), sa contribution est de 42.31 %, suivie par (V_c) avec 41.14 %. La contribution de l'avance (f) est relativement faible (11.05%).
- 2) Les modèles mathématiques basés sur la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour l'effort de coupe, la rugosité de surface, la température et la puissance de coupe ayant un (R^2) de 96.75 %, 90.04 %, 94.02 % et 94.50 % respectivement, présentent la bonne concordance avec les données expérimentales.
- 3) Les graphes de contour déterminés dans ce travail permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs des réponses et les conditions d'exploitation souhaitables.
- 4) Les essais de confirmation ont révélé une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par les modèles développés. Les erreurs relatives observées varient de 0.20 à 4.75 % pour F_z , 0.96 à 5.88 % pour R_a et de 0.46 à 0.95 % pour T° . Ces écarts relativement faibles témoignent de la précision et de la fiabilité des modèles établis, confirmant ainsi leur validité pour la prédiction des réponses du processus d'usinage avec une exactitude satisfaisante.
- 5) L'analyse de la formation des copeaux constitue un outil essentiel pour comprendre les mécanismes de coupe. Plusieurs formes de copeaux ont été identifiées conformément à la norme ISO 3685, notamment des copeaux en ruban, hélicoïdaux, spirale conique et tubulaires, avec des variantes enchevêtrées ou courtes.

- 6) L'optimisation multi-objective réalisée avec l'approche de la fonction de désirabilité (DF) a pu donner les régimes optimaux obtenus suivants :
- Les conditions optimales obtenues sans prendre en compte le débit de copeau enlevé (MRR) sont : $V_c = 120$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.4$ mm, avec une rugosité de surface ($R_a = 2.110$ μm), une température de coupe ($T^\circ = 160.151$ $^\circ\text{C}$), une puissance de coupe ($P_c = 34.918$ W).
 - Lorsque le débit de copeau enlevé (MRR) est pris en compte, les conditions optimales obtenues sont : $V_c = 254.545$ m/min, $f = 0.101$ mm/tr et $a_p = 0.693$ mm, avec une rugosité de surface ($R_a = 1.958$ μm), une température de coupe ($T^\circ = 177.013$ $^\circ\text{C}$), une puissance de coupe ($P_c = 84.671$ W) et un débit de copeaux enlevé ($\text{MRR} = 18.207$ cm^3/min).
- 7) La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de l'optimisation multi-objective par l'Analyse Relationnelle Grise (GRA) et l'analyse d'enveloppement des données (DEAR) :
- Selon les résultats de la méthode (GRA), les paramètres optimaux sont : $V_c = 170$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.4$ mm, avec une rugosité de surface ($R_a = 1.877$ μm), une température de coupe ($T^\circ = 159.75$ $^\circ\text{C}$), une puissance de coupe ($P_c = 32.225$ W) et un débit de copeaux enlevé ($\text{MRR} = 5.44$ cm^3/min).
 - Les conditions optimales obtenues à l'aide de la méthode (DEAR) sont : $V_c = 340$ m/min, $f = 0.2$ mm/tr et $a_p = 1.6$ mm, avec une rugosité de surface ($R_a = 5.237$ μm), une température de coupe ($T^\circ = 207.75$ $^\circ\text{C}$), une puissance de coupe ($P_c = 259.177$ W) et un débit de copeaux enlevé ($\text{MRR} = 108.8$ cm^3/min).
- 8) Les résultats comparatifs des trois (03) méthodes obtenues ont montré que chaque méthode présente des avantages et des limites, en fonction des priorités opérationnelles. La méthode DEAR se distingue par sa capacité à maximiser le débit de copeaux enlevés, au prix d'une consommation énergétique et thermique élevée. À l'inverse, la méthode GRA privilégie la stabilité thermique et la qualité de surface, mais avec une productivité nettement réduite. La méthode DF, quant à elle, offre un compromis intéressant entre performance, qualité et efficacité énergétique.

Référence bibliographique

- [1] DAVIM, J. Paulo et MATA, Francisco. A comparative evaluation of the turning of reinforced and unreinforced polyamide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 33, p. 911–914.
- [2] ENSINGER. Plastiques hautes performances – PEEK [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.ensingerplastics.com/fr-fr/produits-semi-finis/plastiques-hautes-performances/peek> (consulté le 23 février 2025).
- [3] DAVIM, J. Paulo (éd.). *Machining: fundamentals and recent advances*. London : Springer, 2008.
- [4] BERKANI, Sofiane. *Comportement des carbures métalliques lors de l'usinage des aciers inoxydables : application aux austénitiques et martensitiques*. Thèse de doctorat. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2015. 179 p.
- [5] CZAPLICKI, A. L'usinabilité et la coupe des métaux. *Revue de la Société Royale Belge des Ingénieurs et des Industries*, 1962, vol. 12, p. 708–736.
- [6] GRUBER, B. *Outillage et mesure*. 2e éd. Lausanne : Dunod, 1981, p. 51–63.
- [7] TOUMINE, Alexandre. *Cours d'usinage*. Groupe Conception Production. Lyon : INSA de Lyon, s.d.
- [8] TROMBERT, Christian. Usinabilité des aciers inoxydables. *Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques*, 1998, no M726, p. M726.1–M726.12.
- [9] CUNAT, Pierre-Jean. Aciers inoxydables. Mise en œuvre. *Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques*, 2000, no M4542, p. M4542.1–M4542.24.
- [10] CORDEBOIS, Jean-Pierre. *Fabrication par usinage*. Paris : Dunod, 2003.
- [11] ZAIDI, Ahmed. *Investigation expérimentale et modélisation du processus de coupe en utilisant les plans d'expériences : application lors du tournage du polyamide*. Thèse de doctorat. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2024. 182 p.
- [12] SCHOEFS, J.-C. et FOURNIER, Y. *Productique mécanique*. France : Delagrave, 1994.
- [13] BERGHIDA, Riad et BOUGHOUAS, Hamlaoui. Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la géométrie des pièces mécaniques. Communication interne ou rapport non publié, 2006.
- [14] GRUESCU, C., DEFOURNE, F., QUAEGEBEUR, P., et al. *Préparation de production en productique mécanique – étude de fabrication et analyse d'usinage (3PMEFAU)*. Lille : SEMM/Université Lille 1, 2015.

- [15] SERGE79. La vitesse de coupe – Utilisation d'un tour [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://serge79.over-blog.com/article-la-vitesse-de-coupe-45528985.html> (consulté le 24 février 2025).
- [16] PANTALÉ, Olivier. Modélisation et simulation tridimensionnelles de la coupe des métaux. Thèse de doctorat. Bordeaux : Université de Bordeaux 1, 1996. 276 p.
- [17] HAMDY, Aouici. Étude de l'usinabilité de l'acier AISI H11 à l'état traité par le CBN7020. Thèse de doctorat. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2024. 198 p.
- [18] MEKNASSI, Raid Fekhriddine. Étude de l'impact des conditions de coupe lors du tournage des polyamides avec renfort en fibre de verre (PA66/GF30) en utilisant les méthodes RSM et ANN. Mémoire de master. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2019.
- [19] WIKIPÉDIA. Chapitre 4 : Matériaux polymères 1. Éléments de classification : les polymères organiques [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://en.wikipedia.org> (consulté le 25 février 2025).
- [20] REUSSER, P. Couple Outil – Matière (COM) au fraisage et perçage. Note technique ou document interne
- [21] OKE, Sunday Ayoola et ODUSORO, Salome Ifeoluwa. Factor selection in drilling unidirectional carbon fiber reinforced plastic composite plates with the HSS drill bit using analytic hierarchy process. International Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2021, vol. 3, no 1, p. 1–15.
- [22] ABHISHEK, Kumar. Turning of polymers: a novel multi-objective approach for parametric optimization. Thèse de doctorat. Rourkela : National Institute of Technology Rourkela, 2012. 155 p.
- [23] CHABBI, Amel. Modélisation et optimisation des paramètres d'usinage lors du tournage du polyacétal POM C. Thèse de doctorat. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2024. 182 p.
- [24] CARREGA, Marc. Les polymères : de la molécule à l'objet. Paris : EDP Sciences, 1999.
- [25] REYNE, Maurice. Technologie des plastiques. 3e éd. revue et augmentée. Paris : Hermès, 1998, p. 17.
- [26] AGORA. Conditions de coupe des polymères. Réf. : IT-conditions de coupe polymère. [éditeur et date non précisés].
- [27] EHRENSTEIN, Gottfried W. et MONTAGNE, Fabienne. Matériaux polymères : structure, propriétés et applications. Paris : Hermès Science Publications, 2000.
- [28] BOST, Jean et PIGANIOL, P. Matières plastiques : chimie – applications. Paris : Technique et Documentation, 1980.

- [29] SLIDEPLAYER. [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://slideplayer.fr/slide/3706383/> (consulté le 27 février 2025).
- [30] VICTREX ; ENSINGER. PEEK GF30 – A material for high-performance applications [en ligne]. Disponible sur les fiches techniques des fournisseurs (consulté le 26 février 2025).
- [31] WIKIPÉDIA. Polyétheréthercétone [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Poly%C3%A9ther%C3%A9therc%C3%A9tone> (consulté le 27 février 2025).
- [32] DAVIM, J. Paulo et REIS, Pedro. Machinability study on composite (polyetheretherketone reinforced with 30% glass fibre – PEEK GF 30) using polycrystalline diamond (PCD) and cemented carbide (K20) tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, vol. 23, p. 412–418.
- [33] DAVIM, J. Paulo, REIS, Pedro, LAPA, Vítor, et al. Machinability study on polyetheretherketone (PEEK) unreinforced and reinforced (GF30) for applications in structural components. *Composite Structures*, 2003, vol. 62, no 1, p. 67–73.
- [34] ÖZDEN, Gökçe, ÖTEYAKA, Mustafa Özgür, et CABRERA, Francisco Mata. Modeling of cutting parameters in turning of PEEK composite using artificial neural networks and adaptive-neural fuzzy inference systems. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2023, vol. 36, no 2, p. 493–509.
- [35] GAO, Shang, QU, Jialu, LI, Honggang, et al. Effect of fiber type and content on mechanical property and lapping machinability of fiber-reinforced polyetheretherketone. *Polymers*, 2022, vol. 14, no 6, p. 1079.
- [36] MATA, Francisco, GAITONDE, V. N., KARNIK, S. R., et al. Influence of cutting conditions on machinability aspects of PEEK, PEEK CF30 and PEEK GF30 composites using PCD tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no 4, p. 1980–1987.
- [37] NEWNAS. Site officiel de Newnas [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.newnas.net> (consulté le 17 mars 2025).
- [38] SANDVIK COROMANT. Fiche produit : TCMT 16 T3 04 4325 [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.sandvik.coromant.com/frfr/productdetails?c=TCMT%2016%20T3%2004%2020%2020%204325> (consulté le 18 mars 2025).
- [39] ATALLAH, Hichem. Modélisation des paramètres technologiques dans l'usinage du polymère POM-C en utilisant les méthodes RMS et ANN. Mémoire de master. Guelma : Université 08 Mai 1945, 2016.

- [40] SAFI, Khaoula. Étude statistique des performances des matériaux de coupe avec différents revêtements lors du tournage dans un environnement à sec et lubrifié. Thèse de doctorat. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2024. 187 p.
- [41] BOUZID, Lakhdar, YALLESE, Mohamed Athmane, CHAOUI, Kamel, et al. Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, vol. 229, no 1, p. 45–61.
- [42] HARRINGTON, J. The desirability function. *Industrial Quality Control*, 1965, vol. 21, no 10, p. 494–498 [en ligne].
- [43]..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.
- [44] HAOUES, Sabrina, YALLESE, Mohamed Athmane, BELHADI, Salim, et al. Modeling and optimization in turning of PA66-GF30% and PA66 using multi-criteria decision-making (PSI, MABAC, and MAIRCA) methods: a comparative study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 124, no 7, p. 2401–2421.
- [45] BOUZID, Lakhdar, CHABBI, Amel, et YALLESE, Mohamed Athmane. Comparative study when modeling and multi-objective optimization of machining parameters during turning Polyoxymethylene polymer using DFA, GRA and TOPSIS technics. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 2024, vol. 5, no 3, p. e12893.
- [46] GÓMEZ-GARCÍA, D., DÍAZ-ÁLVAREZ, A., YOUSSEF, George, et al. Machinability of 3D printed PEEK reinforced with short carbon fiber. *Composites Part C: Open Access*, 2023, vol. 12, p. 100387.
- [47] HAMLAOUI, N., AZZOUZ, S., CHAOUI, K., et al. Machining of tough polyethylene pipe material: surface roughness and cutting temperature optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 92, p. 2231–2245.
- [48] CHABBI, Amel, YALLESE, Mohamed Athmane, MEDDOUR, Ikhlas, et al. Predictive modeling and multi-response optimization of technological parameters in turning of Polyoxymethylene polymer (POM C) using RSM and desirability function. *Measurement*, 2017, vol. 95, p. 99–115.
- [49] FABRICATION1. Les différents types de copeaux [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://fabrication1.blogspot.com/2013/09/les-differents-types-de-copeaux.html> (consulté le 20 avril 2025).
- [50] PADILLA-ATONDO, Jesus M., LIMON-ROMERO, Jorge, PEREZ-SANCHEZ, Armando, et al. The impact of hydrogen on a stationary gasoline-based engine through multi-

response optimization: A desirability function approach. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no 3, p. 1385.

[51] KUMAR SAHU, Anshuman, CHATTERJEE, Suman, KUMAR NAYAK, Praveen, et al. Study on effect of tool electrodes on surface finish during electrical discharge machining of Nitinol. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Bristol: IOP Publishing, 2018, p. 012033.

[52] ZEMITI, Salah. Application des méthodes MCDM pour l'optimisation de l'usinage d'un acier fortement allié traité. Mémoire de master. Guelma : Université 8 Mai 1945, 2022.

[53] BOUZID, Lakhdar. Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage – Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13. Thèse de doctorat. Guelma: Université 8 Mai 1945, 2015. 189 p.

[54] HAQ, A. Noorul, MARIMUTHU, P., et JEYAPPAUL, R. Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 37, p. 250–255.

[55] LIN, C. L. Use of the Taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics. *Materials and Manufacturing Processes*, 2004, vol. 19, no 2, p. 209–220.

[56] TOSUN, Nihat. Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 28, p. 450–455.

[57] MERAL, Güven, SARIKAYA, Murat, MIA, Mozammel, et al. Multi-objective optimization of surface roughness, thrust force, and torque produced by novel drill geometries using Taguchi-based GRA. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101, p. 1595–1610.

[58] RAJESWARI, B. et AMIRTHAGADESWARAN, K. S. Experimental investigation of machinability characteristics and multi-response optimization of end milling in aluminium composites using RSM based grey relational analysis. *Measurement*, 2017, vol. 105, p. 78–86.

[59] MOGANAPRIYA, C., RAJASEKAR, R., MOHANRAJ, T., et al. Dry machining performance studies on TiAlSiN coated inserts in turning of AISI 420 martensitic stainless steel and multi-criteria decision making using Taguchi-DEAR approach. *Silicon*, 2021, [en ligne], p. 1–14.

- [60] MANOJ, M., JINU, G. R., et MUTHURAMALINGAM, T. Multi response optimization of AWJM process parameters on machining TiB₂ particles reinforced Al7075 composite using Taguchi-DEAR methodology. *Silicon*, 2018, vol. 10, no 5, p. 2287–2293.
- [61] HUU PHAN, Nguyen 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.
- [62] LAKSHMI, Vennela VK, SUBBAIAH, Kambagowni Venkata, KOTHAPALLI, Arun Vikram, et al. Parametric optimization while turning Ti-6Al-4V alloy in Mist-MQCL (Green environment) using the DEAR method. *Manufacturing Review*, 2020, vol. 7, p. 38.
- [63] SHARMA, Pankaj et BHAMBRI, Kamaljeet. Multi-response optimization by experimental investigation of machining parameters in CNC turning by Taguchi based grey relational analysis. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, vol. 2, no 5, p. 1594–1602.