

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 : BRAHMIA YOUSOUF

=====
**Maximisation de la productivité et minimisation de la
rugosité de surface lors de l'usinage du Polyamide PA6**
=====

Sous la Direction de :

Dr. KADDECHE Mounia

Pr. YALLESE Mohamed Athmane

Année universitaire 2019/2020

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail à :

Ma chère mère pour son affection

Mon père pour son encouragement

Mes frères et sœurs et leurs enfants

A toute ma famille

A tous mes amis et mes collègues

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 encadrateurs, Dr. KADDECHE Mounia et Pr. YALLESE Mohamed Athmane, à qui je tiens à exprimer m'a 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 à Dr. 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 ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

ملخص

إن المواد البلاستيكية تلعب دوراً بالغ الأهمية في صناعة اليوم، وهي موجودة في العديد من القطاعات الصناعية. بعض المواد البلاستيكية لها مزايا استثنائية مثل: الكثافات المنخفضة، وإمكانية الإنتاج الضخم، والمعاملات الاحتكاكية المنخفضة، لا سيما البولي أميدات التي تتمتع بمقاومة عالية للكشط ودرجات الحرارة المنخفضة، وهذه الأخيرة تمثل صعوبات أثناء القطع بسبب خصائصها الفيزيائية والميكانيكية. ومن هناك، من المثير للاهتمام للغاية إيجاد ظروف لنظام القطع حيث يمكن لأدوات القطع أن تعمل على تصنيع هذه البولي أميدات بشكل منتج وفعال.

يتعلق هذا العمل بتحويل مادة البولي أميد 6 باستخدام أداة قطع من الكربيد. وينقسم هذا العمل إلى قسمين الأول يتمثل في نمذجة ردود الناتج من ذلك: خشونة السطح (Ra) وإزالة تدفق القطع (MRR)، وذلك باستخدام منهجية سطح الإستجابة (RSM). يستخدم تحليل التباين (ANOVA) لتقييم تأثير معالم القطع، وهي: سرعة القطع (Vc)، التغذية (f)، وعمق القطع (ap) على معالم الإخراج. الجزء الأخير من العمل محجوز للتحسين الأحادي ومتعدد الأهداف من أجل العثور على القيم المثلى لمعلمت القطع مقارنة بأهداف التحسين. في هذا السياق، تم استخدام ثلاث تقنيات للتحسين: طريقة تاجوشي (Taguchi)، منهجية استجابة السطح بالتحليل التحسيني (DF) والتحليل العلائقي الرمادي (GRA). وقد أثبتت النتائج أن طريقة Taguchi يمكن أن تكون أكثر فعالية في حالة الاستجابة الوحيدة، ولكن طرق GRA و DF هي أفضل الطرق لتحقيق أفضل أداء متعدد الأهداف.

كلمات البحث:

خرائطة، 6PA، تصميم التجارب، ANOVA، التحسينية العملية، RSM، Taguchi، DF، GRA.

Résumé

Les polymères jouent un rôle extrêmement important dans l'industrie d'aujourd'hui, ils sont présents dans de nombreux secteurs industriels. Certains matériaux polymères ont des avantages extraordinaires tels que : leurs faibles densités, la possibilité de production en série, leurs faibles coefficients de frottement, spécialement les polyamides qui ont une grande résistance à l'abrasion et aux faibles températures, Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques physiques et mécaniques. De là, il est très intéressant de trouver des conditions du régime de coupe où les outils de coupe peuvent productivement et efficacement usiner ces polyamides.

Le présent travail concerne le tournage de polyamide 6 (PA6) avec une plaquette en carbure (**SPMR 120308**). Ce travail est divisé en deux parties. La première concerne la modélisation des réponses de sortie à savoir : La rugosité de surface (R_a) et le débit de copeau enlevé (MRR), en utilisant la méthodologie de la surface de réponse (RSM). L'analyse de la variance (ANOVA) est utilisée afin d'évaluer l'influence des paramètres de coupe, à savoir : Vitesse de coupe (V_c), avance (f) et profondeur de passe (a_p) sur les paramètres de sortie. La dernière partie du travail est réservée à l'optimisation mono et multi-objective afin de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs de l'optimisation. Dans ce cadre, trois techniques d'optimisation ont été utilisées : La méthode de Taguchi, la fonction de désirabilité (DF) et l'analyse relationnelle grise (GRA). Les résultats trouvés prouvent que la méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse, par contre les méthodes GRA et DF sont les meilleurs pour l'optimisation multi-objectif.

Mots clés : Tournage, PA6, Plans d'expérience, ANOVA, optimisation, Taguchi, RSM, GRA, DF.

Abstract

Polymers play an extremely important role in the industry today. They are present in many industrial sectors. Some polymeric materials have extraordinary advantages such as : their low densities, the possibility of mass production, their low friction coefficients, especially polyamides that have a high resistance to abrasion and low temperatures, The latter present difficulties during cutting because of their physical and mechanical characteristics. From there, it is very interesting to find conditions of the cutting regime where the cutting tools can productively and efficiently machine these polyamides.

This work concerns the turning of polyamide 6 (PA6) with a carbide plate (SPMR 120308). This work is divided into two parts. The first part concerns the modelling of the output responses, namely : Surface roughness (Ra) and the removed chip flow (MRR), using the Response Surface Methodology (RSM). Variance analysis (ANOVA) is used to evaluate the influence of the slice parameters, namely : Cutting speed (V_c), feed rate (f) and depth of cut (a_p) on the output parameters. The last part of the work is reserved to mono and multi objective optimization in order to find the optimal values of the cutting parameters compared to the optimization objectives. In this context, three optimization techniques were used : the Taguchi method, the desirability function (DF) and the grey relational analysis (GRA). The results found prove that the Taguchi method can be more effective in the case of a single response, but the GRA and DF methods are the best for multi objective optimization.

Keywords : PA6, Experiment plans, ANOVA, optimization, Taguchi, RSM, GRA, DF.

Index des figures

Figure I.1	Vitesse de coupe (V_c).	05
Figure I.2	Vitesse d'avance V_f , Avance par tour f .	06
Figure I.3	Profondeur de passe (d).	07
Figure I.4	Principaux critères de rugosité.	08
Figure I.5	Défauts Macro géométriques et Micro géométriques.	08
Figure I.6	Sillons théoriques.	10
Figure I.7	Usure en dépouille.	12
Figure I.8	Usure en cratère.	12
Figure I.9	Usure par déformation plastique.	13
Figure I.10.a	Usure en chocs mécaniques.	13
Figure I.10.b	Usure en chocs thermiques.	13
Figure I.11	Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.	14
Figure I.12	Exemple de polyaddition.	15
Figure I.13	Exemple de polycondensation.	15
Figure I.14	Classification des plastiques.	16
Figure I.15	Exemples d'utilisation des polymères.	19
Figure I.16	Formule chimique du polyamide 6.	21
Figure I.17	Exemples d'utilisation du polyamide 6.	22
Figure I.18	Graphe des conditions de coupe sur R_a .	23
Figure I.19	Effet principal pour la rugosité de surface.	25
Figure I.20	L'architecture ANN pour l'obtention de R_a .	26
Figure I.21	Influence de l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité de surface à des différentes combinaisons de V_c et r .	27
Figure I.22	La relation entre R_a et la vitesse d'avance a) outil avec rayon de bec =1 ; b) outil avec rayon de bec =0,4	28
Figure I.23	La relation entre R_a et la vitesse de coupe a) outil avec rayon de bec =1 ; b) outil avec rayon de bec =0,4	28
Figure I.24	Valeurs des Relationnelle Gris selon les expériences	30
Figure I.25	Effet de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE : a) Pur, b) %25 chargé de carbone, c) %25 chargé de fibres de verre.	31
Figure I.26	Effet de la vitesse d'avance et des matériaux chargés sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE : a) 1mm de profondeur de coupe, b) 2mm de profondeur de coupe, c) 3mm de profondeur de coupe.	32

Figure I.27	Effet de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE : a) Pur (non chargé), b) 25% chargé de carbone, c) 25% chargé de fibres de verre.	33
Figure I.28	Effet de la vitesse d'avance et des matériaux chargés sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE : a) 1 mm de profondeur de coupe, b) 2 mm de profondeur de coupe, c) 3 mm de profondeur de coupe.	34
Figure I.29	Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE : a) pur (non chargé), b) chargé de carbone à 25 %, c) chargé de fibres de verre à 25%.	35
Figure II.1	Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.	37
Figure II.2	Variateur de fréquence ABB ACS355.	38
Figure II.3	Capteur de vitesse.	38
Figure II.4	Eprouvette utilisée pour différents essais.	39
Figure II.5	Plaquette de coupe utilisée	40
Figure II.6	Porte outil utilisé (CSDPN25x25M12).	40
Figure II.7	Rugosimètre 2D.	41
Figure II.8	Interface de logiciel MiniTAB18.	43
Figure II.9	Interface de logiciel Design Expert 10 développé par Stat-ease.	43
Figure III.1	Graphique des effets principaux pour (Ra).	54
Figure III.2	Diagramme d'interaction pour (Ra).	54
Figure III.3	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra).	55
Figure III.4	Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour (Ra).	56
Figure III.5	Diagrammes (3D) de la rugosité(Ra) en fonction de V_c , f et ap .	57
Figure III.6	Graphique de Contour de (Ra) en fonction de V_c , f , ap .	58
Figure III.7	Graphique des effets principaux pour le débit du copeau enlevé.	60
Figure III.8	Diagramme d'interaction pour le débit du copeau enlevé.	60
Figure III.9	Comparaison entre les valeurs calculées et prédites pour (MMR).	61
Figure III.10	Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour (MMR).	62
Figure III.11	Diagrammes de surfaces de(MRR)en fonction de (V_c , f et ap).	63
Figure III.12	Graphique de Contour de (MRR) en fonction de V_c , f et ap .	64
Figure IV.1	Graphique des effets principaux de V_c , f et ap sur (Ra).	70
Figure IV.2	Graphique des effets principaux de V_c , f et ap sur (MRR).	71
Figure IV.3	Qualité Relationnelle Grise (GRG).	75
Figure IV.4	Graph de désirabilité de Ra et MRR (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 1 ^{er} cas.	80

Figure IV.5	Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et le débit du copeau enlevé (MRR) pour le 1 ^{er} cas.	81
Figure IV.6	Graph de désirabilité de Ra et MRR (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 2 ^{ème} cas.	82
Figure IV.7	Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et le débit du copeau enlevé (MRR) pour le 2 ^{ème} cas.	83
Figure IV.8	Graph de désirabilité de Ra et MRR (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 3 ^{ème} cas.	84
Figure IV.9	Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et le débit du copeau enlevé (MRR) pour le 3 ^{ème} cas.	85

Index des tableaux

Tableau I.1	Différents paramètres de coupe utilisés.	23
Tableau I.2	Différents niveaux et facteurs utilisé.	24
Tableau II.1	Propriété technique du PA6.	39
Tableau II.2	Informations relatives aux plaquettes de coupe	40
Tableau II.3	Table orthogonale de Taguchi pour un plan de 27.	45
Tableau II.4	Matrice de planification pour un plan Taguchi (L27).	46
Tableau III.1	Résultats expérimentaux pour un plan (L27).	49
Tableau III.2	Résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra).	53
Tableau III.3	Analyse de la variance (ANOVA) pour le (MRR).	59
Tableau IV.1	Résultats expérimentaux et S/B pour (Ra) et (MRR).	68
Tableau IV.2	Moyenne des ratios S/B(Ra) pour chaque niveau des facteurs.	69
Tableau IV.3	Moyenne des ratios S/B(MRR) pour chaque niveau des facteurs.	70
Tableau IV.4	Résultats expérimentale normalisé ($\xi_0(k)$).	73
Tableau IV.5	Coefficients du GR ($\xi_i(k)$).	74
Tableau IV.6	Niveau relationnel gris et son ordre (Grey relational grade (GRG)).	76
Tableau IV.7	Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade).	77
Tableau IV.8	Réponses pour la catégorie relationnelle grise (Grey Grade).	77
Tableau IV.9	But et gamme de paramètres d'optimisation (cas 1).	80
Tableau IV.10	Réponse de la surface de rugosité et de débit de copaux enlevé (cas 1).	80
Tableau IV.11	But et gamme de paramètres d'optimisation (cas 2).	82
Tableau IV.12	Réponse de la surface de rugosité et de débit de copaux enlevé (cas 2).	82
Tableau IV.13	But et gamme de paramètres d'optimisation (cas 3).	84
Tableau IV.14	Réponse de la surface de rugosité et de débit de copaux enlevé (cas 1).	84

Nomenclature

<i>f</i>	Avance (tr/min).
Vc	Vitesse de coupe (m/min).
ap	profondeur de coupe (mm).
Ra	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
Rt	Rugosité totale (μm).
MRR	Débit du copeau enlevé (cm^3/min).
R²	Coefficient de détermination.
ANOVA	Analyse de variance.
RSM	Méthodologie de surface de réponse.
ANN	Réseaux de neurones artificiels.
GRA	Analyse Relationnelle Gris.
Des	Désirabilité.
DF	Fonction désirabilité.
Cont%	Pourcentage de contribution (%).

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Etude bibliographique	
I.1. Introduction	3
I.2. Généralités Sur La Coupe Des Métaux	3
I.2.1. Définitions	3
I.2.2. La coupe des métaux	4
I.2.2.1. Définition de l'usinabilité	4
I.2.2.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité	5
I.2.2.3. Les paramètres de coupe	5
I.2.2.4. Etats de surface	7
I.2.2.4.2. Critères de la rugosité	8
I.2.2.5. Usure des outils de coupe	11
I.3. Généralité sur les polymères	14
I.3.1. Définition des polymères	14
I.3.2. Obtention des polymères	15
I.3.3. Classification des polymères	15
I.3.4. Comportement mécanique des polymères	17
I.3.5. Les propriétés des polymères	17
I.3.5.1. Propriétés physiques des polymères	17
I.3.5.2. Propriétés thermiques des polymères	18
I.3.6. Domaines d'utilisation des polymères	18
I.4. Les Polyamides	19
I.4.1. Définition	19
I.4.2. Propriétés des polyamides	20
I.4.3. Utilisations des polyamides	20
I.4.4. Avantages et inconvénients des polyamides	20
I.4.5. Le polyamide 6 (PA6)	21
I.4.5.1. Définition	21
I.4.5.2. Les propriétés des polyamide 6	21

I.4.5.3. Applications des polyamide 6.....	21
I.5. Etat de l'art sur l'usinage des polymères.....	22
I.6. Conclusion	36

Chapitre II : Procédures expérimentales

II.1 Introduction	37
II.2. Matériels utilisé	37
II.2.1. Machine-outil.....	37
II.2.2. Matériau à usiné.....	38
II.2.3. Outils de coupe	40
II.2.3.1. Plaquette de coupe.....	40
II.2.3.2. Porte outil	40
II.2.4. Chaîne de mesure utilisée et paramètres de sortie	41
II.2.4.1. Rugosimètre 2D pour la mesure de la rugosité	41
II.2.4.2. Débit de copeau enlever (MRR).....	41
II.3. Autres équipements	42
II.4. Planification des expériences	44
II.4.1. Plans de Taguchi	44
II.5. Lubrification.....	47
II.6. Conclusion.....	47

Chapitre III : Modélisation par L'analyse de Variance et La Méthodologie des Surfaces de Réponse

III.1. Introduction.....	48
III.2. Résultats expérimentaux	48
III.3. Analyse de variance et Méthodologie des surfaces de réponse	50
III.3.1. Analyse de variance (ANOVA).....	50
III.3.2. Méthodologie des surfaces de réponses	51
III.4. Analyse statistique et modélisation des paramètres technologiques	52
III.4.1. Analyse des résultats de la rugosité de surface (Ra)	52
III.4.1.1. Analyse de la variance ANOVA pour (Ra)	52
III.4.1.2. Graphique des effets moyens et diagramme d'interaction pour (Ra)	53
III.4.1.3. Equation de régression pour (Ra).....	55
III.4.1.4. Diagramme de surface 3D et graphique de contour (Ra)	56
III.4.2. Analyse des résultats du débit de copeau enlevé (MRR)	58

III.4.2.1. Analyse de variance ANOVA pour (MRR)	58
III.4.2.2. Graphique des effets moyens et diagramme d'interaction pour MRR ...	59
III.4.2.3. Equation de régression pour la quantité du copeau enlevé (MRR)	61
III.4.2.4. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (MRR).....	62
III.5. Conclusion	64

Chapitre IV : Optimisation par La Méthode de Taguchi et L'analyse Relationnelle Grise et La Fonction Désirabilité

IV.1. Introduction.....	66
IV.2. Optimisation mono-objectif par la méthode de Taguchi	66
IV.2.1. La méthode de Taguchi	66
IV.2.1.1. La démarche de la méthode de Taguchi	66
IV.2.1.2. Apport de la méthode Taguchi.....	67
IV.2.2. Résultats et Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs	68
IV.2.2.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra).....	69
IV.2.2.2. Analyse des effets principaux sur la quantité de copeau enlevé (MRR) 70	
IV.3. Optimisation multi-objectif par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise	71
IV.3.1. La normalisation.....	72
IV.3.2. Calcul des coefficients du Relationnel Gris (GRC)	73
IV.3.3. Calcul du GRG (Grey relational grade)	75
IV.4. Optimisation multi-objectif par la méthode de la fonction désirabilité (DF).....	78
IV.4.1. Introduction	78
IV.4.2. Les cas d'optimisation étudiés	79
Cas 1 : Rugosité minimale	79
Cas 2 : productivité maximale.....	81
Cas 3 : compromis entre rugosité et productivité	83
IV.5. Conclusion	85
Conclusion générale	86
Références bibliographique	88

Introduction générale

Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets de la vie courante. Ils ont remplacé les substances naturelles et sont présents dans de nombreux domaines industriels (Automobile, l'aviation etc...). Parmi ces polymères il y a les thermodurcissables, les élastomères et les thermoplastiques.

Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques distinguées telles que le faible module d'élasticité, le taux d'absorption d'humidité, le coefficient de dilatation thermique et les contraintes internes.

Par le volume annuel de production, le nombre de polymères différents et la variété des applications, la famille des polyamides est la plus importante des cinq grandes familles de polymères techniques. Historiquement la plus ancienne, elle a bénéficié de l'effet de taille sur le coût des monomères en raison de l'importance des tonnages de polyamides 6 produits pour l'industrie textile. Les polyamides, sont aussi des matériaux techniques utilisés dans plusieurs domaines, tels que l'automobile, l'électronique, l'industrie des sports et des loisirs...etc.

Le (PA 6) a pour avantage une résistance à l'abrasion et aux faibles températures. Cependant les travaux scientifiques concernant l'usinage de ce polyamide sont très peu nombreux, puisqu'ils sont très compliqués à usiner, exposés à des déformations compliquées et leurs copeaux sont d'autant plus durs à maîtriser. Aussi, pour Pouvoir produire plus rapidement et en plus grande quantité avec une meilleure qualité de surface, nous nous intéressons à la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et à l'optimisation des conditions de coupe. C'est dans ce cadre 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 sur la coupe des métaux tels que la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité, les paramètres technologiques d'usinage. En deuxième lieu, nous présentons, une étude sur les polymères et particulièrement le polyamide PA6. Finalement, une présentation des travaux de recherche relatifs au tournage de quelques polymères proches du cas de notre étude.

Dans le second chapitre, nous exposons les équipements utilisés et les conditions expérimentales pour mener cette recherche. Les dispositifs de mesure et le couple outil - matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale des phénomènes de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expériences sont également exposés.

Dans le troisième chapitre, nous exposons les résultats expérimentaux des essais réalisés pour un plan de Taguchi (L27) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiées, ces modèles exprimant la relation entre les paramètres de sortie (Ra et MRR) et les paramètres d'entrée (V_c , f et a_p). Nous

avons utilisé la méthodologie de surface de réponse RSM et l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (V_c , f , et a_p) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Pour cela nous avons utilisé deux logiciels de statistique appelé «Design-Expert-10» et «Minitab-18» Pour le calcul des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse.

Dans le quatrième chapitre, nous appliquons deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objectif, en utilisant la méthode de Taguchi et l'analyse signal/bruit pour les paramètres technologiques d'usinage (R_a et MRR), et l'optimisation multi-objectif, en utilisant l'analyse relationnelle grise (Grey method) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) en utilisant l'approche de la fonction désirabilité (DF) pour optimiser la productivité et la qualité de surface simultanément. Ainsi, les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs d'optimisation ont été calculées pour chacun des paramètres technologiques d'usinage (rugosité de surface et volume de copeau enlevé).

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

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1. Introduction

Les polymères fournissent une grande partie de la structure physique du monde dans lequel nous vivons. De nombreux polymères ont des applications structurelles importantes en raison de leur faible densité et de leur grande force. Certains matériaux polymères ont des propriétés physiques extraordinaires ce qui les rend particulièrement utiles dans la vie de tous les jours, comme l'aptitude au glissement et l'adhérence [1]. Ils sont de plus en plus employés dans l'industrie en raison de plusieurs avantages tels que le fonctionnement silencieux, le poids léger, la résistance à la corrosion, la facilité de production en série, le faible coefficient de frottement, et la capacité de fonctionner sans lubrification externe [2].

Parmi ces matériaux polymères, nous intéressons au Polyamide 6 (PA6) utilisé dans plusieurs domaines : Automobile, Électricité, Emballage médical, Industrie agro-alimentaire, Électroménager, Sports et loisirs...etc.

Les opérations de tournage des matériaux thermoplastiques techniques ne présentent pas de difficulté particulière. Comme pour toutes les autres opérations d'usinage, il est important de respecter le bon affûtage des outils, vitesses de coupe et d'avance. Dans la majorité des cas avec les 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 conseillées [3].

Dans ce chapitre nous allons présenter un résumé de la recherche bibliographique faite lors de notre étude. En effet une première partie est consacrée à la coupe des métaux avec ces paramètres et phénomènes. Une seconde partie est dédiée aux matériaux polymères pur avec leurs propriétés, domaines d'utilisations et mode de fabrication.

L'état de l'art est axé sur les sept articles les plus importants que nous avons rencontrés dans la littérature sur l'usinage des polymères proche du matériau de notre étude.

Le chapitre a abouti à une quelques conclusions à prendre en compte lors de notre étude expérimentale et théorique.

I.2. Généralités Sur La Coupe Des Métaux

I.2.1. Définitions

Afin de mieux situer les techniques d'usinage, on peut affirmer que la coupe des métaux intervient dans un ensemble de procédés d'élaboration de pièces, par enlèvement de matière en quantités pouvant représenter une proportion notable du matériau brut. Cet enlèvement de matière est alors réalisé par l'action d'un outil possédant un ou plusieurs tranchants de section convexe animé d'un mouvement relatif à la pièce appropriée. Une machine-outil fournit à la fois la puissance mécanique nécessaire et réalise le contrôle du mouvement relatif.

Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leurs formes, adaptées à une opération d'usinage, et leur matière. La partie active, le plus souvent amovible (alors appelée plaquette) est maintenue sur le corps d'outil par un moyen de fixation approprié. Qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de matière à l'aide d'un outil tranchant. Cet ensemble constitue un système qui doit être considéré de plusieurs points de vue cinématique et dynamique [4].

I.2.2. La coupe des métaux

Grâce aux technologies diversifiées de fabrication de pièces l'industrie mécanique s'est développée. Cependant les techniques de moulage n'arrivent pas à satisfaire les besoins mécaniques en pièces et composants spécifiques, alors qu'il est indispensable d'en citer l'usinage des métaux parmi les autres principaux procédés de fabrication mécanique qui a contribué le plus dans la fabrication et la finition des pièces de précision.

La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, etc...) sur le comportement d'un matériau en utilisant des outils différents dans la composition et la géométrie (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN). Au contraire, l'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème et l'autre part l'aspect mécanique du problème [5].

I.2.2.1. Définition de l'usinabilité

L'usinabilité est la capacité d'un matériau coupé par un autre matériau. On peut déterminer l'usinabilité de chaque matériau grâce à plusieurs critères qui dépendent du rendu final voulu et aussi du type de l'opération.

L'usinabilité possède plusieurs définitions

- ✓ Selon Bernard Gruber : l'usinabilité ou l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et 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 cotes fixes. [6]
- ✓ Selon A. Czaplicki : 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. [7]

I.2.2.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont [8] :

- ✓ 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 sur la pièce, dont la rugosité.
- ✓ La température de coupe.
- ✓ La rugosité de la surface usinée.
- ✓ La productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités.

I.2.2.3. Les paramètres de coupe

I.2.2.3.1. Vitesse de coupe (V_c)

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse ω rad/s (soit N tr/min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce (**Figure I.1**). Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre D , la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut [9].

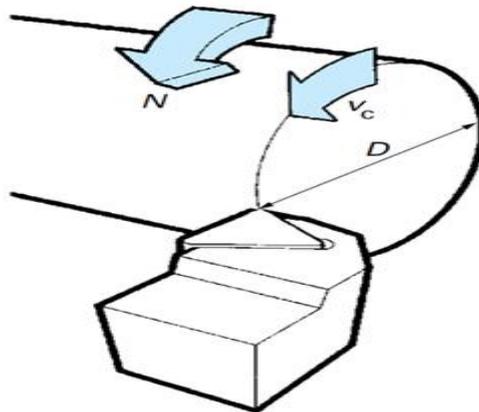


Figure I.1: Vitesse de coupe (V_c) [9].

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

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe avec :

V_c : vitesse de coupe (m / min).

D : Diamètre de la pièce (mm).

N : Fréquence de rotation (tr / min).

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés. En dressage, par exemple où l'outil se déplace en direction du centre, la vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante. Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante.

Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines. La fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante. Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment [9] :

- ✓ Des matériaux de la pièce et de l'outil.
- ✓ De la lubrification.
- ✓ De la durée de vie souhaitée pour l'outil.

I.2.2.3.2 Vitesse d'avance (V_f)

La vitesse d'avance V_f (mm/min) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour f (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent (**Figure I.2**).

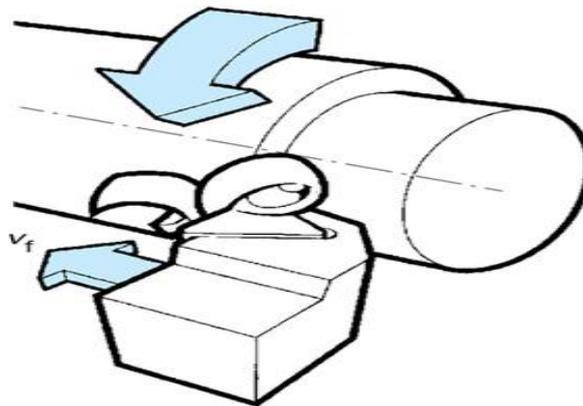


Figure I.2: Vitesse d'avance V_f , Avance par tour f [9].

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

- ✓ V_f : vitesse d'avance (mm / min).
- ✓ f : L'avance (mm).
- ✓ N : Fréquence de rotation (tr / min).

I.2.2.3.3. Profondeur de passe (ap)

La profondeur de passe est la quantité de la matière que va prendre l'outil de coupe lors d'un usinage sur un tour ou bien sur un centre d'usinage (**Figure I.3**), dépend de la surépaisseur de matière à usiner ainsi que de la nature de l'opération (ébauche ou finition). Elle varie selon la vitesse de coupe ainsi que la vitesse d'avance de l'outil [10].

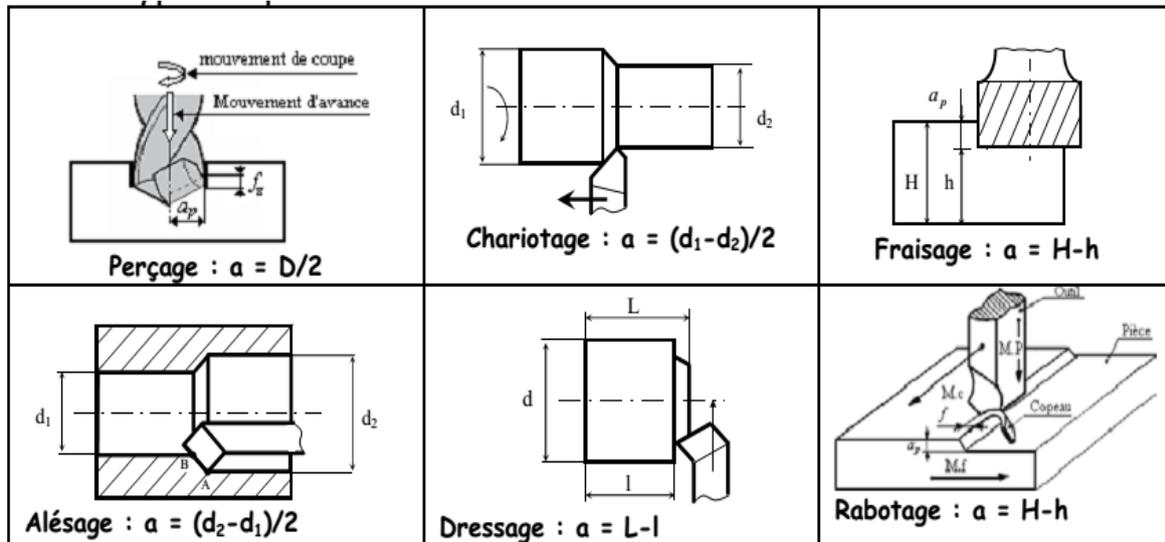


Figure I.3: Profondeur de passe [5].

I.2.2.4. Etats de surface

I.2.2.4.1. Définition

Une surface réelle usinée n'est jamais parfaite, elle présente toujours des défauts par suite des erreurs systématiques d'imperfections, admissibles dans la fabrication.

Les défauts peuvent être de forme (défauts macro-géométriques, ondulations) ou de petits défauts (défauts micro-géométriques) désignés plus communément sous le nom de rugosité.

Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération (**Figure I.4**).

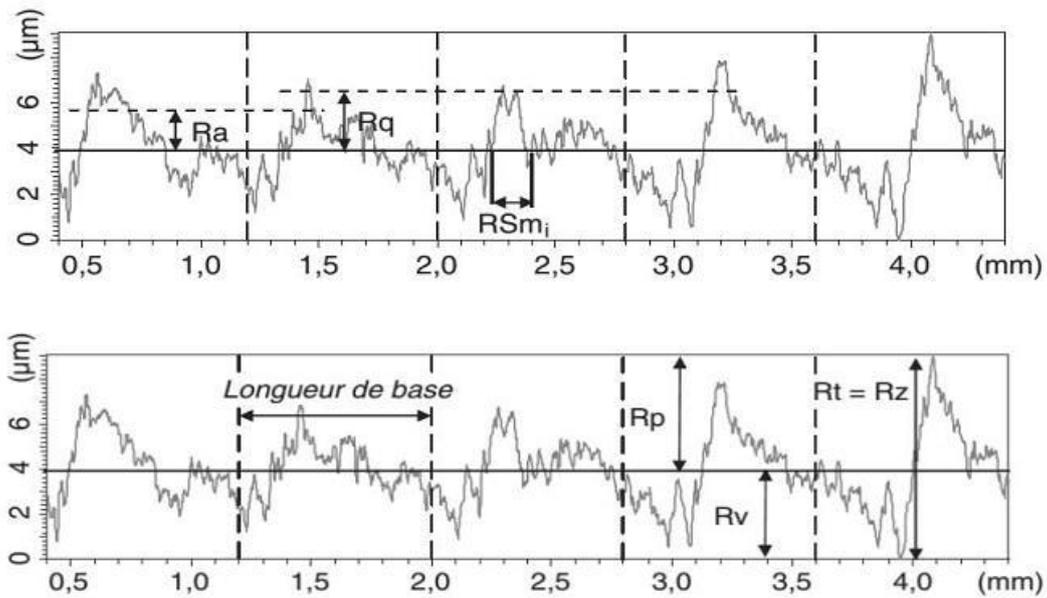


Figure I.4: Principaux critères de rugosité [11].

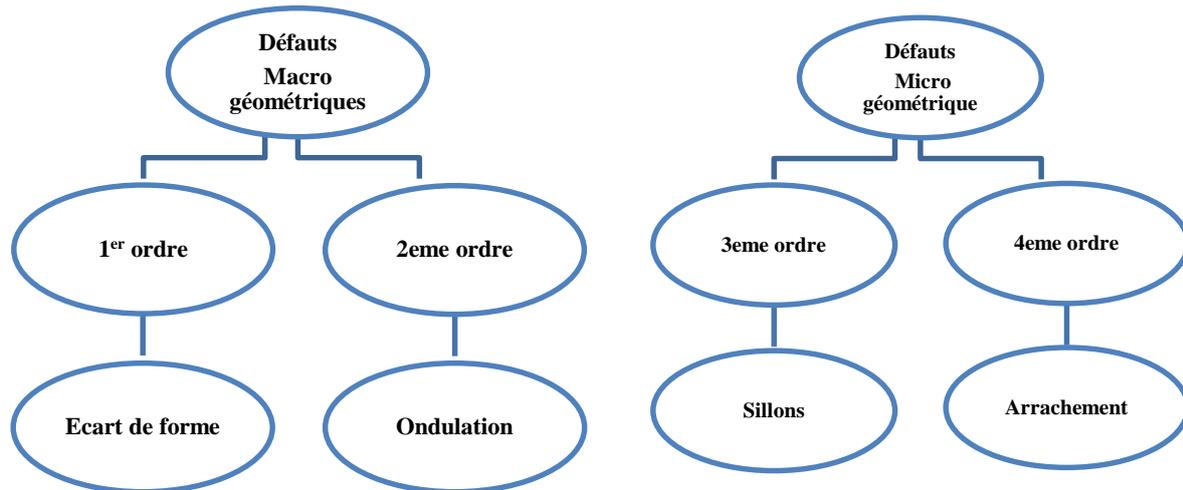


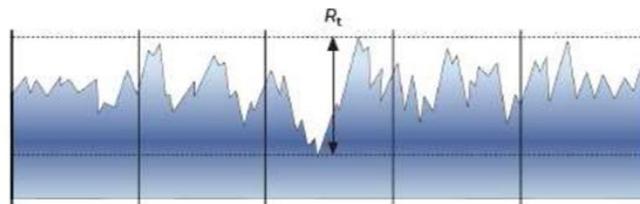
Figure I.5: Défauts Macro géométriques et Micro géométriques.

I.2.2.4.2. 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 [12] :

- **Rugosité totale Rt**

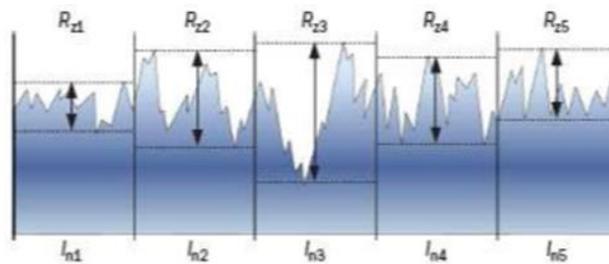
Rt représente l'écart total entre le point le plus haute et le pointe le plus bas de profile.



Rt : hauteur de profil total [12].

- **Rugosité Rz**

Rz représente la distance moyenne entre les sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.



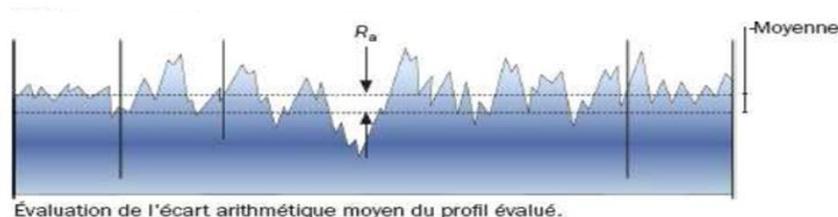
Rz : hauteur de profil maximum [12].

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5} \tag{I.3}$$

- **Rugosité moyenne arithmétique Ra**

Ra Représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX

Ra : est calculée sur une longueur d'évaluation.



Ra : rugosité moyenne du profil [12].

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L Y dx \tag{I.4}$$

✓ **Rugosité maximum Rmax**

Rmax est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité Rmax étant prise sur une saillie et un creux consécutif.

✓ **Rugosité Rp**

Rp est la hauteur maximum de saillie de rugosité. Rp est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

I.2.2.4.3. Evaluation de la rugosité

Théoriquement la connaissance de l'avance (f) ainsi que la géométrie de l'outil permettent de calculer la profondeur maximale des sillons marqués sur la surface usinée. En tournage par exemple, la rugosité totale Rt de la surface obtenue peut être déterminée à partir d'un profil géométrique idéal donné par la **Figure I.6** [13], [14].

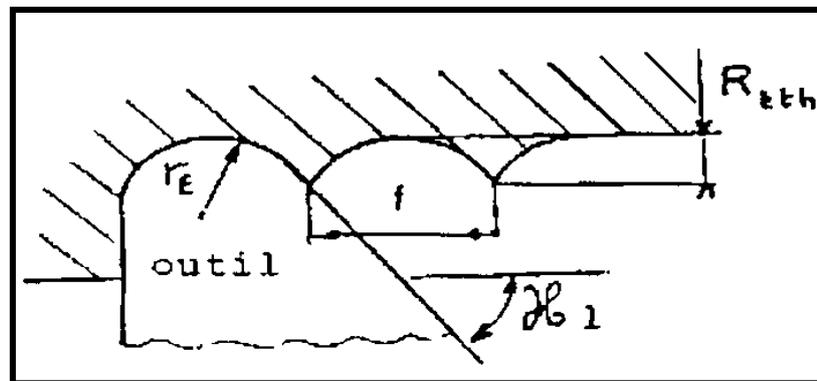


Figure I.6: Sillons théoriques [13].

$$R_t (\text{théorique}) = r_\varepsilon \left[1 - \sqrt{1 - \frac{F^2}{4r_\varepsilon^2}} \right] \quad (\text{I.5})$$

Avec r_ε le rayon de pointe d'un outil rond. Dans le cas où l'avance serait suffisamment petite devant la valeur de r . L'équation (I.2) pourrait être remplacée par l'approximation :

$$R_t (\text{théorique}) \approx \frac{F^2}{8r_\varepsilon} \quad (\text{I.6})$$

En utilisant un certain nombre d'expériences, il est possible de mettre au point expérimentalement des relations mathématiques entre la rugosité obtenue par usinage et les paramètres usuels de coupe [14].

Ces relations sont généralement de la forme :

$$Ra = K_1 \cdot r_\varepsilon \cdot HB^{K_3} \cdot ap^{K_4} \cdot F^{K_5} \cdot V_C^{K_6} \quad (\text{I.7})$$

Avec les K_i des coefficients déterminés pour les conditions expérimentales choisies. En général, $K_4 \approx 0$ et pour un matériau et un outil bien spécifié, il vient que :

$$Ra = CF^{K_5} \cdot V_C^{K_6} \quad (\text{I.8})$$

Où : C est une constante et $K_5 > 0$ et $K_6 < 0$.

I.2.2.5. Usure des outils de coupe

Le développement des matériaux d'outil de coupe était associé à l'absence d'une complète compréhension du phénomène d'usure. L'expérience a montré que dans plusieurs cas les matériaux durs possèdent une meilleure résistance à l'usure. Cette observation a laissé croire que les matériaux durs sont dans tous les cas plus résistants à l'usure. Seulement dans ces dernières années, on a réalisé que cette simple corrélation entre la résistance à l'usure et la dureté n'était pas valide à des vitesses de coupe élevées. Quand la dureté de l'outil de coupe excède 4.5 fois la dureté de matériau à usiner, l'usure de l'outil ne dépendra pas de la dureté mais de la stabilité chimique du matériau de l'outil de coupe qui engendrera une usure en cratère (à partir de certaine valeur de vitesse de coupe) [15].

I.2.2.5.1. Les formes d'usures des outils de coupe

Les formes d'usure d'outils de coupe dépendent des paramètres essentiels (couple outil - matière, conditions d'usinage) on répertorie globalement quatre zones principales d'usure, Nous pouvons rencontrer les formes suivantes [16] :

a) Usure en dépouille ou usure frontale :

Elle est due au frottement de la pièce sur la face en dépouille principale de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête de coupe. Elle se caractérise par une largeur moyenne VB (**Figure I.7**). Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer, puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce à usiner et la précision dimensionnelle.

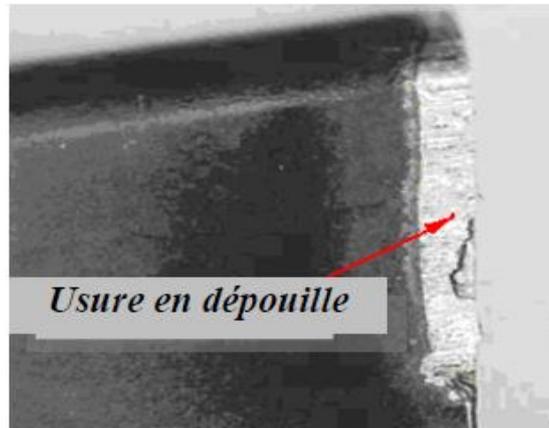


Figure I.7: Usure en dépouille [17].

b) Usure en cratère :

Elle est caractérisée par une cuvette formée sur la face d'attaque de l'outil par frottement du copeau. Au cours de l'usure, les dimensions du cratère ainsi que sa position évoluent et influent particulièrement sur le rayon d'enroulement du copeau. Le flanc arrière du cratère peut jouer le rôle de brise-copeaux naturel. Cette forme d'usure est due à l'existence de température élevée au contact copeau - outil provoquant une diffusion importante. Elle se manifeste essentiellement dans le cas de l'utilisation des outils en carbure. La forme du cratère est définie par sa profondeur maximale KT et le rapport de cratérisation KT/KM ou par l'angle de cratérisation γ_c (**Figure I.8**).

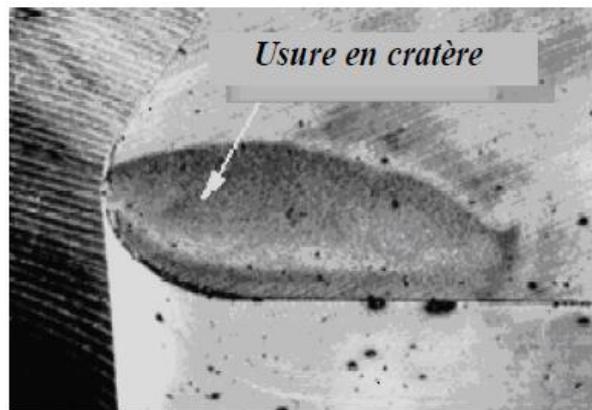


Figure I.8: Usure en cratère [17].

c) Usure en entaille :

Dans le cas des outils en acier rapide et des outils carbures et dans certaines conditions de coupe, il se produit une entaille sur l'arête tranchante, à la hauteur du diamètre périphérique de la pièce, due à l'écroûissage de celle-ci, ou au mode d'évacuation de l'arête rapportée. Au niveau de cette entaille, les conditions de coupe devenant mauvaises, le refoulement de matière sur le périphérique de la pièce provoque une auto accélération du phénomène d'usure. L'entaille peut alors atteindre une valeur VN importante par rapport à la valeur de l'usure VB et par suite affaiblir considérablement le bec de l'outil. Dans le cas des outils en carbure, elle se manifeste lors de l'usinage des métaux ductiles aux faibles vitesses de coupe.

d) Usure par déformation plastique :

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions régnant dans la zone de coupe (**Figure I.9**). Cette déformation se traduit par un affaissement plastique de la pointe de l'outil, une déformation permanente et un refoulement sur les faces de dépouille.

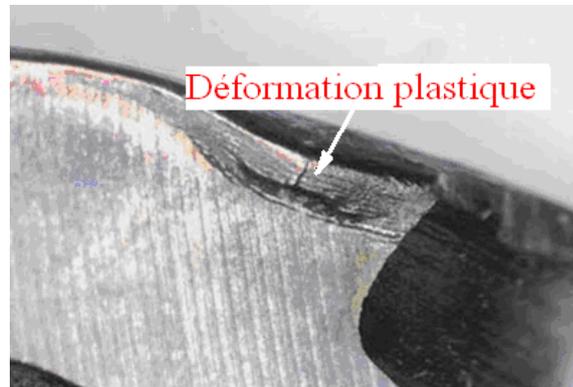


Figure I.9: Usure par déformation plastique [17].

e) Usure Ebréchures et fissuration d'arête :

Dans le cas d'usinage avec chocs mécaniques (**Figure I.10.a**) ou thermiques (**Figure I.10.b**) ou avec des variations périodiques des efforts, provoqués par une coupe discontinue ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures ou d'ébréchures sur l'arête de coupe qui diminuent considérablement la vie de l'outil. Cette forme d'usure se manifeste dans le cas de l'usinage des alliages réfractaires [18].

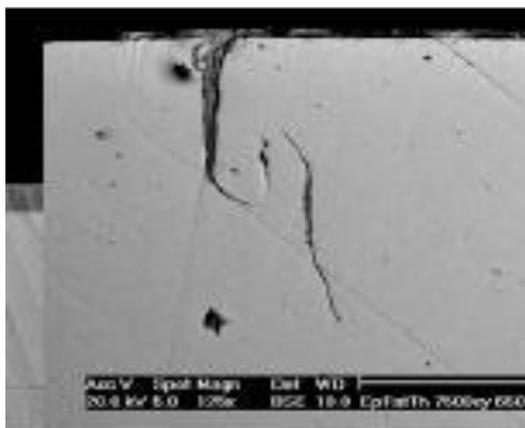


Figure I.10.a: Usure en chocs mécaniques [17].

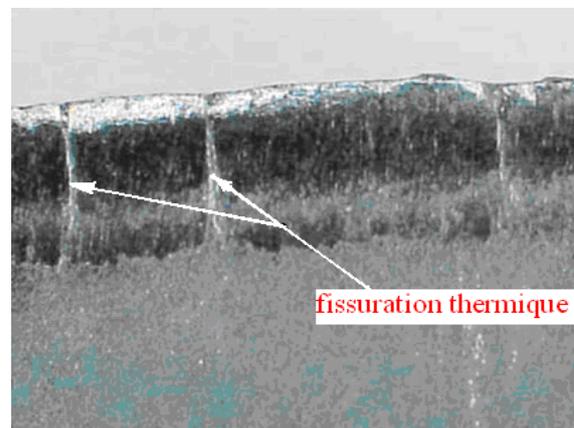


Figure I.10.b: Usure en chocs thermiques [17].

I.2.2.5.2. Mécanismes d'usure des outils de coupe

Les derniers développements des matériaux d'outils de coupe n'étaient pas complets à cause de l'absence d'une bonne compréhension du mécanisme d'usure qui était basée sur l'intuition et l'empirisme. Les mécanismes d'usure les plus importants sont : l'usure par abrasion, l'usure par adhésion et l'usure par diffusion [17] :

• **L'usure par abrasion** : résulte de l'arrachement sur leur surface de micro copeaux produit par des particules souvent angleuses et de grande dureté qui peuvent être contenues dans le matériau à usiner (inclusions). Ces particules sont toujours renouvelées, les produits d'abrasion sont éliminés en continu avec les copeaux. La vitesse d'usure abrasive croît avec la quantité de particules abrasives qui entrent en contact avec l'outil par unité de temps [19].

• **L'usure par adhésion** : dépend de la pression appliquée au contact copeau - outil et par conséquent des caractéristiques de dureté et d'écrouissabilité du matériau usiné, de l'épaisseur de copeau et de la rigidité de liaison outil - pièce. L'usure par adhésion dépend aussi de la vitesse de coupe, un accroissement de la vitesse de coupe provoque une moindre résistance à l'écrasement des aspérités du copeau mais aussi une moindre résistance au cisaillement des jonctions établies par effets thermiques. L'usure par adhésion est caractéristique des usinages à vitesse de coupe modestes (généralement inférieures à 50 m/min).

• **L'usure par diffusion** : aux grandes vitesses de coupe, le gradient de température à l'interface copeau - outil est particulièrement important : une couche de glissement facile se constitue avec fluage du matériau du copeau. La vitesse de diffusion éventuelle d'un élément d'alliage de l'outil dans le copeau est très grande en raison des températures atteintes, d'autant plus que cet élément est absent du matériau usiné. Comme il y a renouvellement continu du copeau, la demande en élément diffusant reste constante au cours de l'opération.

I.3. Généralité sur les polymères

I.3.1. Définition des polymères

Le centre d'étude des matières plastiques donne une définition acceptable qui est la suivante : " *Une matière plastique est un mélange contenant une matière de base qui est susceptible d'être moulé ou qui a été moulé. La matière de base est en général un mélange de macromolécules au hauts polymères organiques ou semi organique à caractère résineux, résultat le plus souvent d'une réaction naturelle ou artificielle de polycondensation ou de polymérisation* " [20].

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomères.

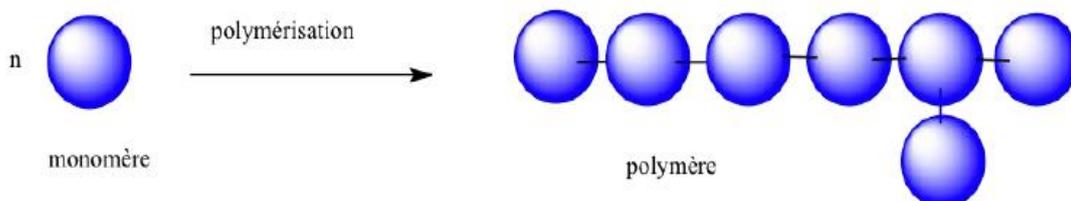


Figure I.11: Modèle schématique de la synthèse d'un polymère [5].

I.3.2. Obtention des polymères

On les obtient de deux façons différentes :

- ✓ **Polyaddition** : on additionne les monomères : il n'y a pas de pertes d'atomes. (Figure I.12)

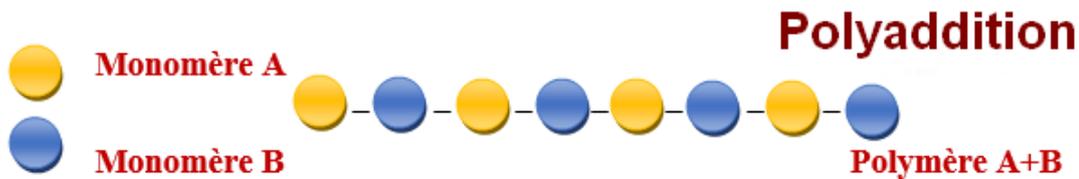


Figure I.12: Exemple de polyaddition.

- ✓ **Polycondensation** : les monomères réagissent entre eux pour former le polymère et (le plus souvent) une petite molécule (Figure I.13).

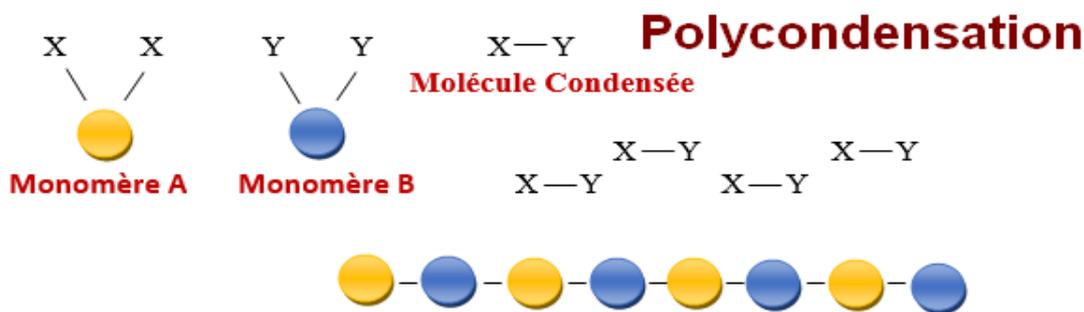


Figure I.13: Exemple de polycondensation.

I.3.3. Classification des polymères

Les polymères sont classés *en fonction de leur structure, des propriétés* en résultant et de leur comportement à l'échauffement. L'on distingue généralement trois types des polymères [21] :

- ✓ **Thermoplastique** (le polymère devient ductile à haute température, thermoplastiques ou plastomères)
- ✓ **Thermodurcisseur** (le polymère se décompose à haute température sans devenir ductile au préalable, résines thermodurcissables)
- ✓ **Elastomérique** (le polymère présente déjà à température ambiante un comportement caoutchouc élastique, élastomères).

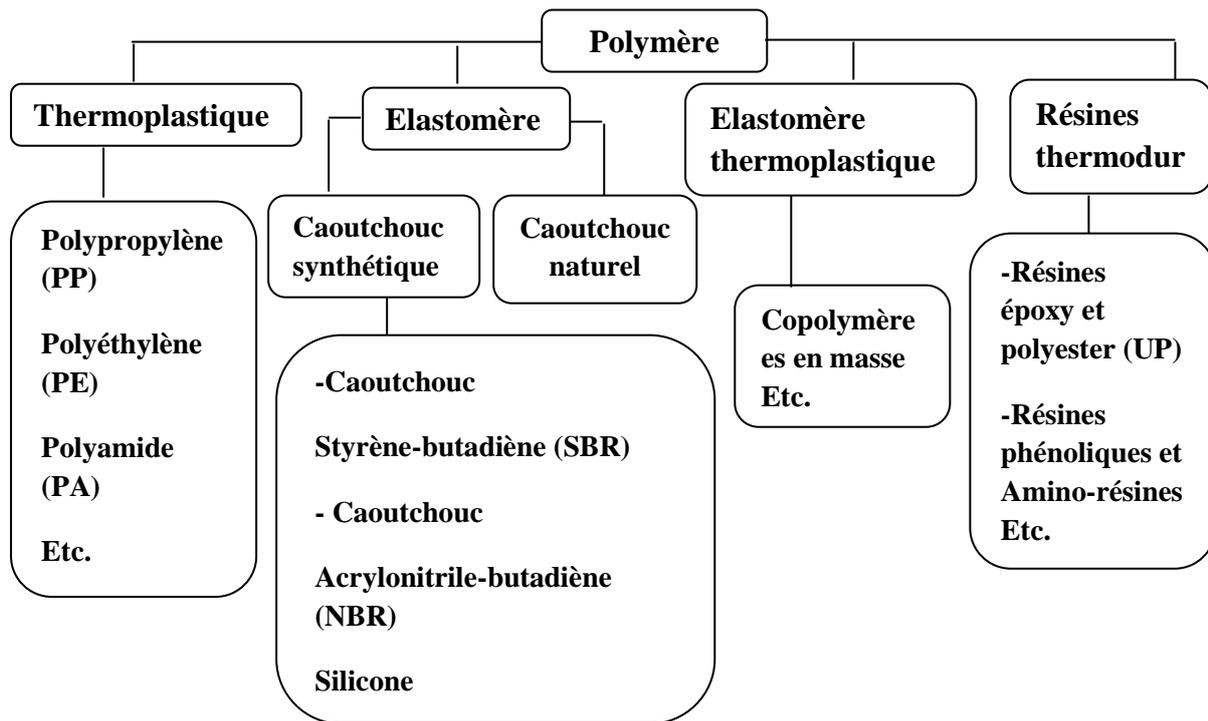


Figure I.14: Classification des plastiques

Les polymères peuvent être classés selon divers critères, qui ne s'excluent pas les uns l'autres :

Un second classement se fait Selon les propriétés :

- ✓ Les différences de propriétés résultent de la différence de structure des polymères et des interactions ou véritables liaisons entre les chaînes.

Un troisième classement se fait Selon la structure chimique on distingue :

- ✓ Les homopolymères : formés à partir d'un unique monomère.
- ✓ Les copolymères : formés à partir de monomères différents.

On distingue aussi les polymères :

- ✓ Linéaires
- ✓ Ramifiés
- ✓ Réticulés

Le classement Selon l'origine permet de classer les polymères en trois groupes :

- ✓ Les polymères naturels
- ✓ Les polymères artificiels dérivés des polymères naturels
- ✓ Les polymères synthétiques

I.3.4. 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 [22].

I.3.5. Les propriétés des polymères

À température ambiante, les polymères peuvent être liquides ou solides. De manière générale, les polymères sont légers. Ils sont aussi souples et ne sont stables qu'à des températures modérées. Sauf exception, ce sont des isolants électriques et thermiques.

De manière plus précise, les propriétés des polymères dépendent [23] :

- ✓ Du type d'assemblage (liaisons et formes) et de la nature chimique des monomères qui les constituent.
- ✓ Du degré de polymérisation.
- ✓ De la formulation, c'est-à-dire de la nature et du taux des ingrédients que l'on introduit.

On distingue par ailleurs :

- ✓ Les homopolymères (linéaires, branchés ou étoilés), comme le polystyrène, qui sont des polymères constitués par l'association de molécules provenant d'un seul motif monomère.
- ✓ Les copolymères lorsque la polymérisation s'effectue sur deux ou plusieurs monomères différents.
- ✓ Les polymères réticulés pour lesquels les macromolécules s'enchaînent dans les trois directions de l'espace (macromolécules réticulées).

Cela donne aux polymères des propriétés distingués et particuliers. Nous citons les propriétés les plus pertinentes pour le domaine de la coupe.

I.3.5.1. Propriétés physiques des polymères

Avant tout, rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques, une des caractéristiques physiques générales des polymères est : La masse volumique des matières plastiques est peu élevée. La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion. En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques. La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone) [24].

I.3.5.2. Propriétés thermiques des polymères

❖ La température

La température de transition vitreuse "T_g" et la température de fusion "T_f" sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères. La température de transition vitreuse est partiellement importante pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes, pour lesquels, il n'existe aucune force de cohésion importante autre que l'enchevêtrement. Les zones cristallines ne fondent que bien au-delà de la température de transition vitreuse. Les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante [25] :

Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique.

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques différents. Ceci peut se produire pour les thermoplastiques semi cristallins dans un domaine même étroit de la température [25].

I.3.6. Domaines d'utilisation des polymères

Les polymères ont envahi tous les domaines de notre vie quotidienne. C'est pourquoi les exemples ci-dessous n'offrent qu'une vue très partielle de la réalité [26] :

- ✓ Vêtements et textiles : fibres textiles naturelles et synthétiques, non tissés, skaï, simili cuir.
- ✓ Maroquinerie chaussure : skaï, simili cuir, mousses isolantes.
- ✓ Ameublement : skaï, simili cuir, colles, vernis, mousses.
- ✓ Articles ménagers : Tupperware, poubelles, seaux, vaisselle.
- ✓ Sports-loisirs : cannes à pêche, coques de bateaux, piscines, bandes magnétiques, DVD.
- ✓ Emballage alimentaire (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boîtes à oeufs) ou industriel (flacons de détergents, sachets et sacs, casiers, sacs poubelles) ;
- ✓ Transports et en particulier l'automobile (boucliers, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, réservoirs d'essence) ;
- ✓ Industrie électrique et électronique : boîtiers, gainage de câbles, façades de téléviseurs.
- ✓ Industrie chimique : tuyauteries, cuves, revêtements ;
- ✓ Bâtiment-travaux publics : peintures, isolation, revêtement de sol, tuyauteries, géotextiles ;
- ✓ Agriculture : irrigation, arrosage, serres, bâches ;
- ✓ Hygiène : verres de lunettes, lentilles de contact, prothèses, matériel hospitalier (seringues, poches, tubes pour transfusion), couches.



Figure I.15: Exemples d'utilisation des polymères [27].

I.4. Les Polyamides

I.4.1. Définition

Les polyamides (PA) sont des polymères semi-cristallins ou amorphes dont la formule chimique contient de façon régulière la fonction amide $-(CO-NH)-$ dans la chaîne carbonée [28].

Ces polymères sont obtenus par polyaddition à partir d'acides-amino, ou par polycondensation à partir de diamines et de diacides [29].

Les polyamides linéaires, communément appelés « nylons » et brevetés à l'origine par la marque commerciale Dupont, constituent la catégorie la plus répandue de cette famille de composés [30].

L'historique raconte que nylon est un acronyme issu de la contraction de New York pour 'ny' et London pour 'lon' les deux villes où le matériau étant soi-disant produit. On trouve également des documents qui décomposent nylon en 'nyl' tiré de famille des vinylique dont il ne fait pas parti. Le suffixe on viendrait du mot américain Cotton pour se rapprocher phonétiquement des fibres du coton [31].

I.4.2. Propriétés des polyamides

Les propriétés générales des polyamides sont :

- ✓ De bonnes propriétés mécaniques
- ✓ Une résistance à la fatigue dynamique et à l'usure
- ✓ Un faible coefficient de frottement
- ✓ Un bon comportement à la chaleur et au froid ainsi qu'à bon nombre de produits chimiques
- ✓ Une sensibilité et gonflement à l'eau
- ✓ Un retrait important.

I.4.3. Utilisations des polyamides

Les polyamides sont utilisés dans plusieurs domaines : Automobile, Électricité, Emballage médical, Industrie agro-alimentaire, Électroménager, Sports et loisirs...etc. sont utilisés dans la production du :

- ✓ Roues dentées (essuie-glaces, compteurs, mixers...).
- ✓ Éléments de pompe à essence et de carburateur, cartouches de briquets jetables, valves...
- ✓ Boîtes à eau de radiateur d'automobiles.
- ✓ Micro-mécanismes, moulinets de canne à pêche, serrurerie.
- ✓ Cycle : roues de vélo, jantes, pédaliers.
- ✓ Paliers lisses de roulements.

Et de nombreuses pièces fonctionnelles et structurelles réalisées en PA renforcé de fibre de verre [29].

I.4.4. Avantages et inconvénients des polyamides

Les polyamides comptent parmi les matières plus utilisées en raison de la disponibilité importante de matières premières, de la vaste gamme d'applications et de sa facilité de production, de transformation et de recyclage, qui font de lui un produit à la fois simple d'utilisation et économiquement viable [30].

• Les avantages

- ✓ Tenue aux chocs, à fatigue et fissuration sous charge.
- ✓ Résistance à l'abrasion, insensible au rayage.
- ✓ Faible coefficient de frottement.
- ✓ Bonne tenue aux hydrocarbures et aux solvants.

• Les inconvénients

- ✓ Teneur en eau non négligeable (sauf PA11 et 12).
- ✓ Perméabilité à la vapeur d'eau.
- ✓ Mauvaise tenue à la chaleur humide et en atmosphère desséchée [29].

I.4.5. Le polyamide 6 (PA6)

I.4.5.1. Définition

Le Polyamide 6 est un polymère semi cristallin. Ayant une température de fusion d'environ 220 C, et une température de transition vitreuse d'environ 120°C. Le polyamide 6 est un polymère dans lequel le motif structural répété dans la chaîne contient la fonction amide [32]. La formule chimique du polyamide 6 est présentée dans la Figure I.16.

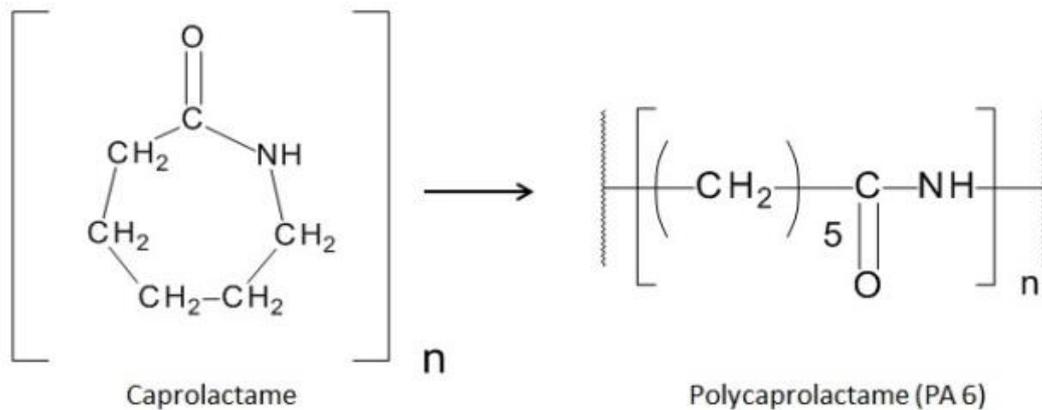


Figure I.16: Formule chimique du polyamide 6 [33].

I.4.5.2. Les propriétés des polyamide 6

Le Polyamide 6 est un polymère semi cristallin, C'est un matériau solide qui possède une grande résistance à la traction et une bonne résistance à l'abrasion.

Le polyamide 6 possède de bonnes propriétés électriques ce qui lui offre un domaine large dans les applications électriques.

Le polyamide 6 résiste aux acides organiques, aux alcalis caustiques, mais il est attaqué par les acides minéraux concentrés à la température ambiante [32].

I.4.5.3. Applications des polyamide PA6

Le polyamide 6 peut être utilisé comme fibres et mono-filaments. En effet sa première application était les soies des brosses à dents en 1938, puis le bas en nylon en 1939. Ces applications des fibres ont été suivies de très près par d'autres telles que les cordes de parachutes et les ceintures de sécurités. Ces applications textiles sont bien connues, où il est utilisé seul ou en mélange avec d'autres fibres dans la fabrication des vêtements des parapluies...etc. Comme pièces moulées, ces applications mécaniques sont nombreuses les hélices de pompe, les engrenages des indicateurs de vitesse, les roues de compteur, les chaînes de courroies transporteuses...etc. Ces grandes propriétés électriques lui permettent d'être utilisé pour les douilles, les interrupteurs, les prises et les disjoncteurs [32].



Figure I.17: Exemples d'utilisation du polyamide 6 (PA6) [34].

I.5. Etat de l'art sur l'usinage des polymères

I.5.1. Etude de la minimisation de la rugosité des surfaces lors du tournage du polyamide PA-6 selon la méthode Taguchi :

Dans tout processus d'usinage, il est très important de déterminer les valeurs optimales des paramètres d'usinage visant à réduire les coûts de production et à atteindre la qualité désirée du produit. **Dragoljub. L et al [35]** ont réalisé une étude du tournage du polyamide 6 (PA6) afin d'analyser l'effet des paramètres d'usinage sur la rugosité de la surface. Les auteurs ont utilisé la méthode Taguchi pour minimiser la rugosité de surface dans le tournage du polyamide PA-6. L'influence de quatre paramètres de coupe, la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de coupe et le rayon du nez de l'outil et leur interaction sur la rugosité moyenne de la surface (R_a) a été analysée sur la base de la matrice orthogonale standard L27 de Taguchi.

Les essais d'usinage ont été réalisés sur des éprouvettes en forme de barre, ayant 92 mm de diamètre et 50 mm de longueur, suivant le plan de Taguchi L27 (3^{13}). L'outil de coupe était le porte-outils SANDVIK chromant SVJBR 3225P 16. La géométrie de l'outil était la suivante : angle de rainure $\gamma = 7^\circ$, angle de dégagement $\alpha = 7^\circ$, angle de tranchant $\chi = 93^\circ$ et angle d'inclinaison du tranchant $\lambda = 0^\circ$. Les paramètres de coupe utilisés sont dans le **tableau I.1**.

Tableau I.1: Différents paramètres de coupe utilisés [35].

Paramètres de coupe	Niveaux		
	1 (faible)	2 (moyen)	3 (haut)
A – V_c (m/min)	65.03	115.61	213.88
B – f (mm/rev)	0.049	0.098	0.196
C – a_p (mm)	1	2	4
D – r (mm)	0.4	0.8	-

À partir de l'analyse du **Figure I.18**. On peut observer que la combinaison optimale ANN des niveaux de paramètres de coupe est A1, B1, C1, D1. En d'autres termes, la valeur optimale de chaque paramètre de coupe est (A) vitesse de coupe, 65,03 m/min, (B) vitesse d'alimentation, 0,049 mm/tour, (C) profondeur de coupe, 1 mm, et (D) rayon de nez d'outil, 0,4 mm.

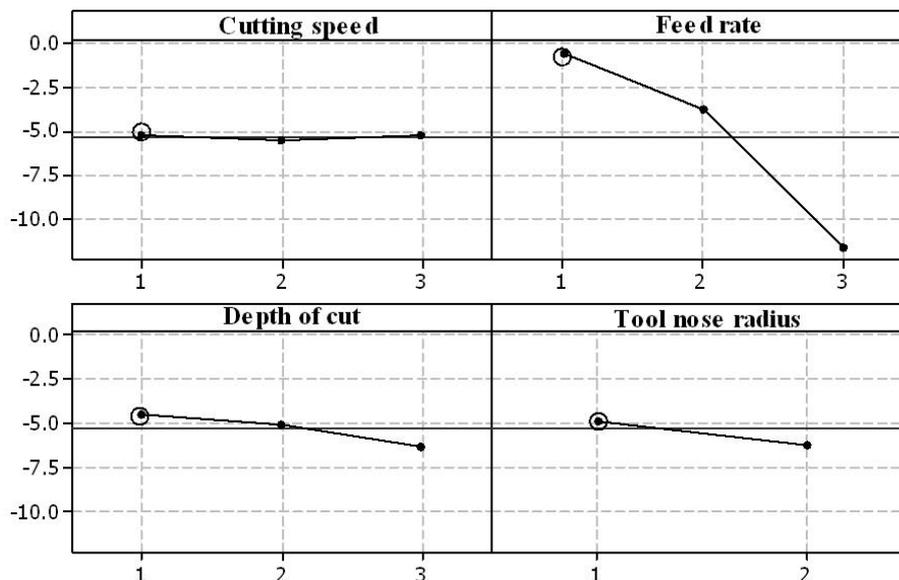


Figure I.18. Graphe des conditions de coupe sur Ra [35].

Les auteurs ont trouvé qu'à partir des résultats ANOVA que la combinaison de faibles niveaux de paramètres de coupe était bénéfique pour minimiser la rugosité de surface (Ra). Ils ont aussi indiqué que l'avance était le paramètre le plus important,

suivi par le rayon de la pointe de l'outil et la profondeur de coupe alors que l'influence de la vitesse de coupe était négligeable. Pour conclure, les auteurs affirment que la méthode Taguchi est relativement simple et aussi une puissante approche d'optimisation qui pourrait être efficacement appliquée.

I.5.2. Analyse expérimentale de l'effet des paramètres du tournage CNC du nylon -6/6 par un outil en carbure de tungstène :

La qualité et la productivité des pièces usinées sont les principaux défis de l'industrie de la découpe métallique pendant le processus de tournage. Nous devons donc optimiser et analyser les paramètres de coupe de manière à pouvoir contrôler la qualité de surface requise. **Manas Ranjan Panda et al [36]** ont effectué une étude expérimentale sur l'influence des paramètres de coupes (V_c , f , a_p) sur la rugosité de surface (R_a) et le débit de copeau enlevé (MRR) pendant le tournage CNC sur polyamide PA 6.6. L'expérience est menée selon le tableau orthogonal de Taguchi qui a réduit le nombre d'expériences. Une gamme de niveaux a été déterminée pour les paramètres individuels à l'aide d'expériences d'essai, comme le montre le **tableau I.2**. Les auteurs ont utilisé des éprouvettes de 30 mm de diamètre et de 95 mm de longueur, l'outil de coupe choisi est un carbure de tungstène et le plan utilisé est un plan Taguchi L9.

Tableau I.2: Différents niveaux et facteurs utilisé [36].

Niveaux	Vitesse de coupe (m/min)	Avance (mm/tr)	Profondeur de passe (mm)
1	1000	0.1	0.1
2	1200	0.2	0.2
3	1400	0.3	0.3

La **figure I.19** présente les graphiques d'effets principaux pour cette expérience. Après l'analyse du graphe, nous remarquons que chaque fois la vitesse de coupe augmente la rugosité de la surface (R_a) diminue, lorsque la profondeur de passe augmente la rugosité de la surface augmente légèrement jusqu'à une certaine valeur, puis diminue, mais lorsque l'avance augmente la rugosité de la surface (R_a), augmente aussi.

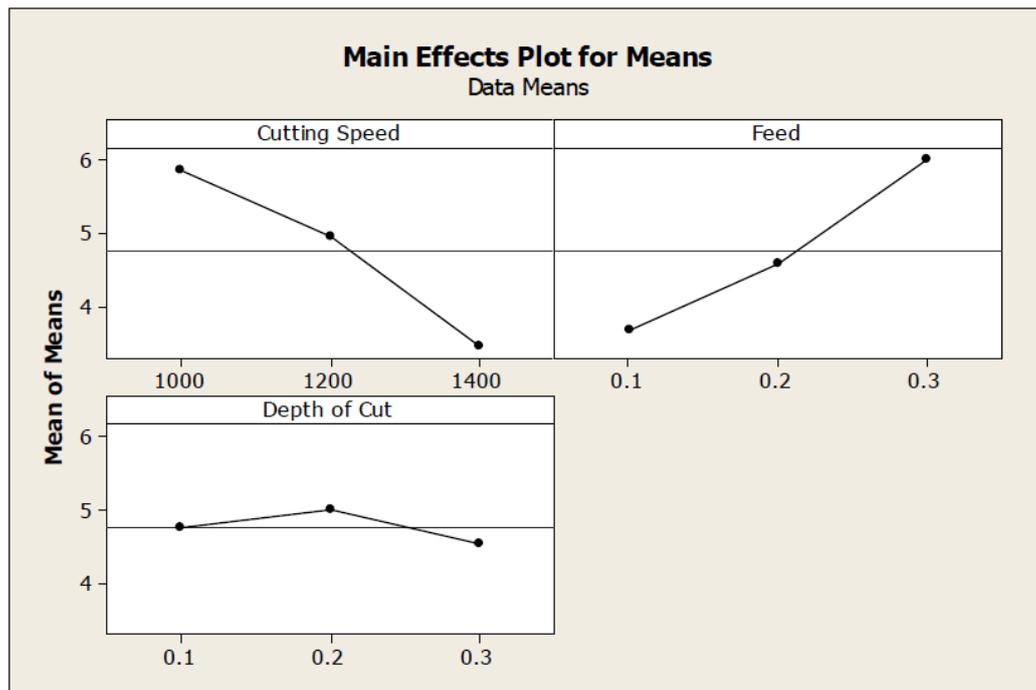


Figure I.19: Effet principal pour la rugosité de surface [36].

Les auteurs de cette étude ont trouvé que la rugosité de surface diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Ceci montre que le facteur qui diminue la rugosité est la vitesse de coupe, alors que la rugosité de la surface augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance, La profondeur de coupe n'a pas une grande d'influence. Comme la rugosité de surface répond au critère dit « plus petits les meilleurs », les points optimaux pour les paramètres de processus sont ; Vitesse de coupe 1400 (m/min), Avance 0,1 (mm/tr) et Profondeur de coupe 0,3 (mm).

I.5.3. Modélisation mathématique et optimisation de la rugosité de surface lors du tournage du polyamide sur base des ANN :

Le travail de recherche réalisé par **Madic et al** [37] présente une méthodologie mathématique de modélisation de la rugosité de surface lors du tournage du polyamide (PA 6) avec des outils en chromant. Les auteurs ont choisi de travailler avec une approche de réseaux de neurones artificiels.

Le modèle de la rugosité de surface développé par les auteurs prend en considération les termes principaux des paramètres de coupe, tels que l'avance par tours, la vitesse de coupe, la profondeur de passe et le rayon de bec de l'outil.

Les auteurs ont utilisé un plan d'expérience de Taguchi L27, avec quatre facteurs d'entrée (V_c , f , a_p et r) qui varient en trois niveaux, ce plan Taguchi va minimiser le nombre d'expérience en conservant les informations recherchées, ce qui rend ce type de plans l'un des plus robuste.

En plus de la modélisation par ANN, (**Figure I.20**) les auteurs ont appliqué une méthode d'optimisation simple afin de minimiser la rugosité de surface et par la suite le régime optimal a été déterminé.

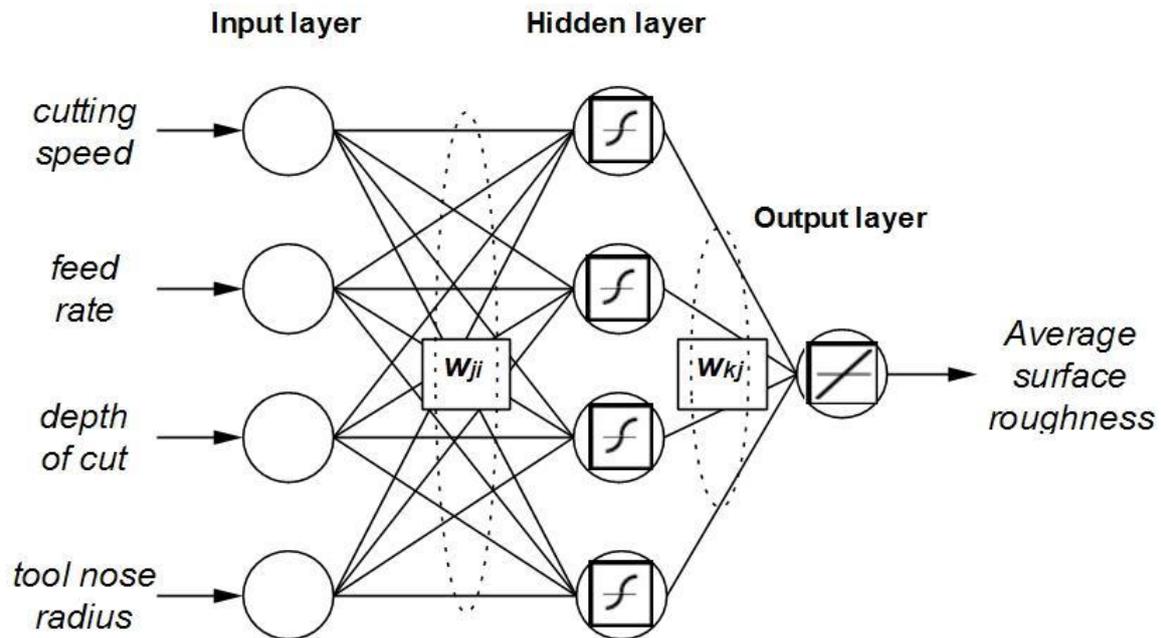


Figure I.20: L'architecture ANN pour l'obtention de Ra [37].

Il est à noter que le modèle ANN utilise une fonction d'activation de type tangent hyperbolique équation (I.9) dans la couche cachée, et une autre fonction linéaire pour la couche de sortie, l'emploi du logiciel MATLAB s'avère approprié pour le traitement de tel problème.

$$a = \text{tansig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-2n}} - 1$$

(I.9)

Le modèle réalisé a été employé afin de tracer les réponses graphiques en 3D, **Figure I.21**, les tracés ont pris en considération la combinaison entre l'avance par tour et la profondeur de passe en variant la vitesse de coupe et le rayon de l'outil entre (65.03-213.88 m/min) et (0.4-0.8 mm), respectivement.

Les conclusions tirées de ce travail, montrent que l'avance est le facteur dominant qui affecte la rugosité de surface, suivi par le rayon d'outil et la profondeur de passe, quant à la vitesse de coupe, son effet n'est pas significatif comparé aux paramètres précédents.

Les résultats de rugosité de surface minimale sont obtenus avec la combinaison de la faible avance, une faible profondeur de passe, faible vitesse de coupe et un grand rayon de bec de l'outil.

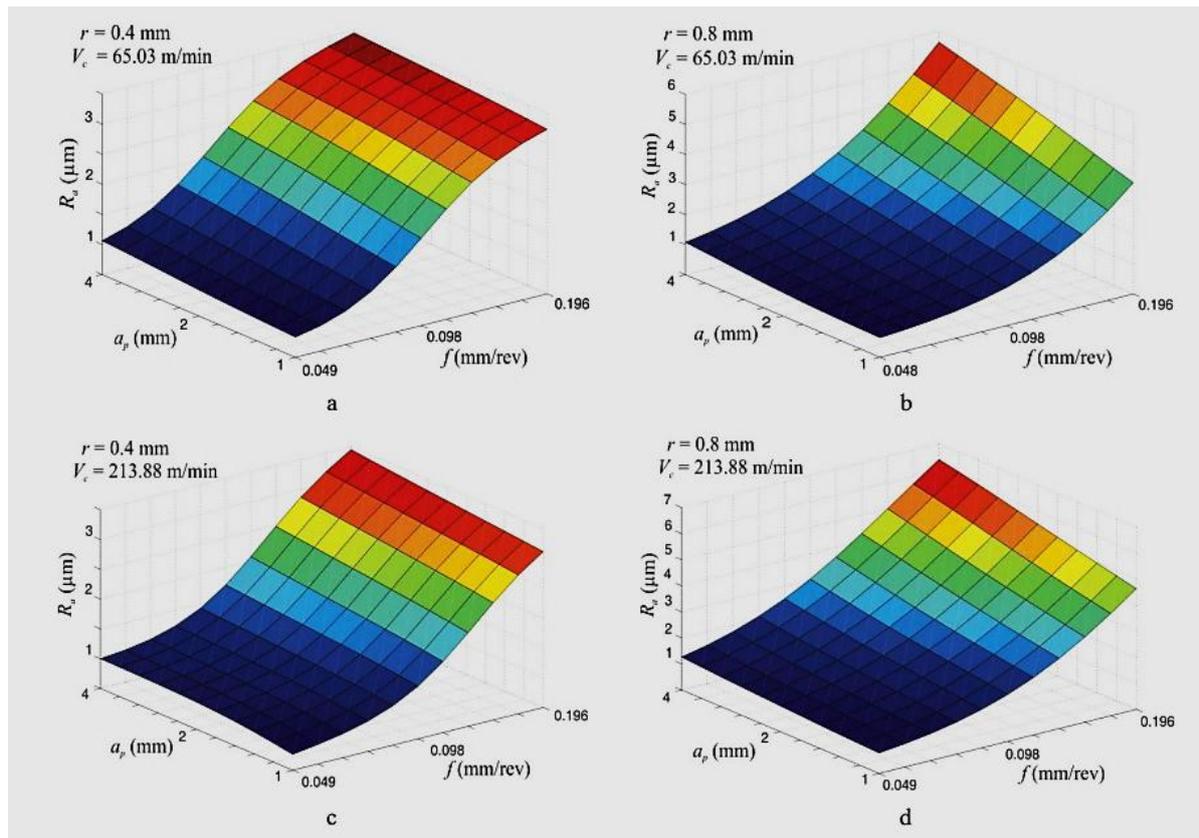


Figure I.21: Influence de l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité de surface à des différentes combinaisons de V_c et r [37].

I.5.4. L'influence de la géométrie de l'outil de tournage sur l'état de surface lors de l'usinage des polyamides :

Cristescu [38] a investigué l'influence de la géométrie de l'outil de coupe (rayon de bec) sur l'intégrité de la surface et la précision dimensionnelle lors des opérations de chariotage du polyamide PA66–MoS2. Lors de son étude il a utilisé deux outils en céramique ayant différents rayons de becs. L'intégrité de la surface a été évaluée par la mesure de la rugosité, micro-dureté, et la technique métallographique. Les résultats de son étude ont montré que le choix de l'outil de coupe est très décisif quant à l'intégrité de la surface aussi bien que la précision dimensionnelle obtenue. L'avance a un effet prépondérant sur la rugosité de la surface suivie par la vitesse de coupe.

Le rayon du bec de l'outil a une influence significative sur la rugosité de la surface usinée. En augmentant le rayon du bec, les valeurs de la rugosité diminuent nettement (**figures I.22 et I.23**). Les outils de coupe utilisés ont donné un bon état de surface à une épaisseur réduite de la couche déformée plastiquement et une meilleure précision dimensionnelle.

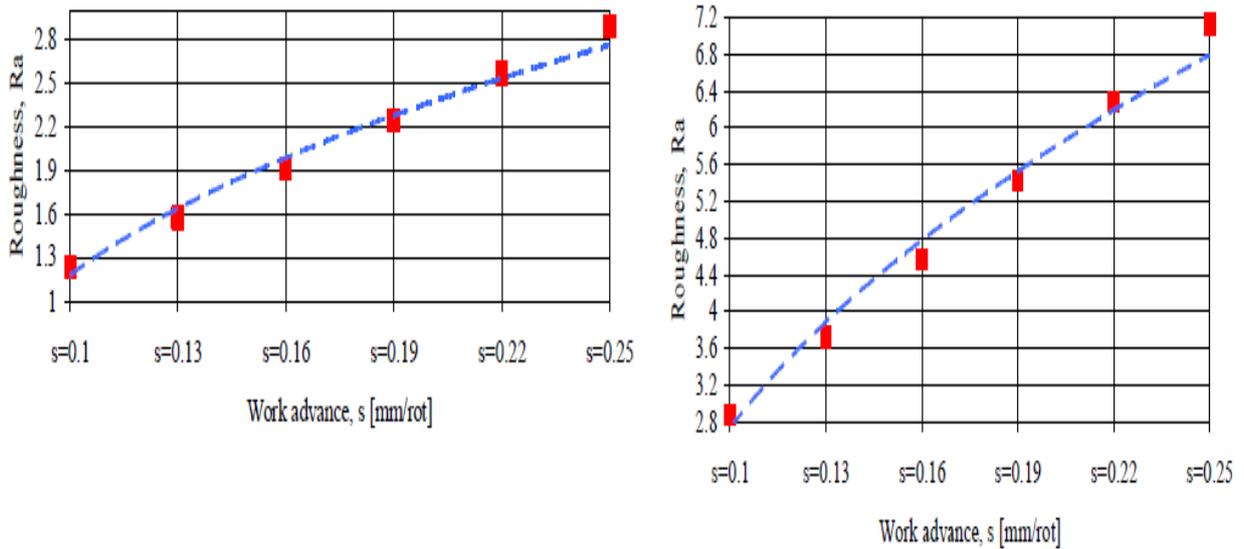


Figure I.22: La relation entre Ra et la vitesse d’avance : a) outil avec rayon de bec =1; b) outil avec rayon de bec =0,4 [38].

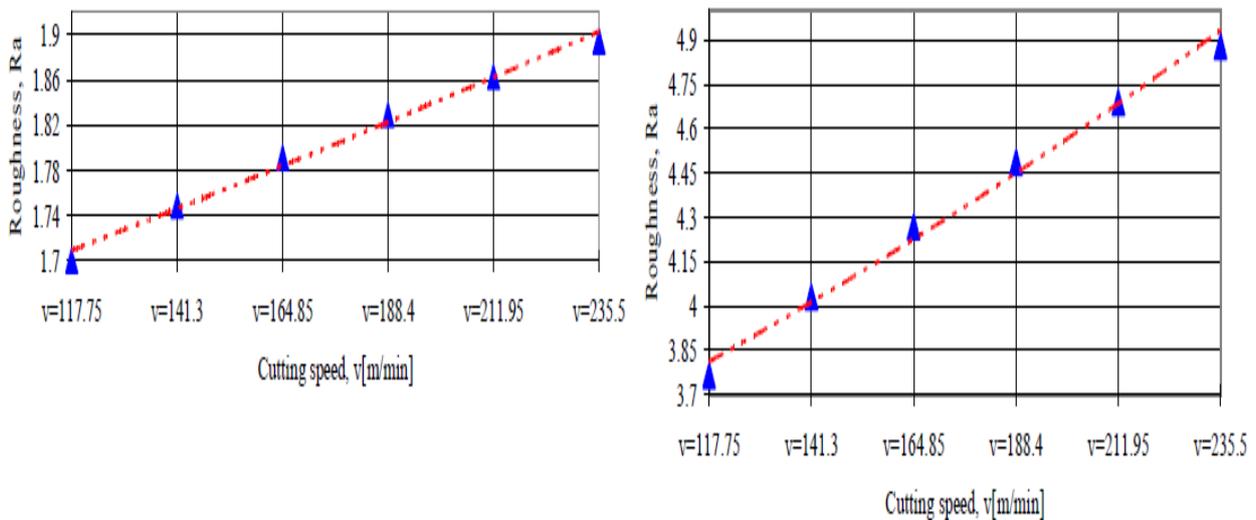


Figure I.23: La relation entre Ra et la vitesse de coupe : a) outil avec rayon de bec =1; b) outil avec rayon de bec =0,4 [38].

On peut observer, à partir de ces graphiques, que la plus grande influence sur la rugosité de la surface, entre les paramètres des conditions de coupe, et l’avance (f), suivie par la vitesse de coupe (Vc), avec une influence très faible de la profondeur de coupe (ap).

Les résultats trouvés montrent que :

- ✓ Dans le cas d'un usinage avec une facette outil de coupe à pointe amovible, on peut remarquer que la pente de variation du paramètre Ra en fonction de la vitesse de coupe, est d'environ $0,05^\circ$ (et est une pente positive), c'est-à-dire, Si la vitesse

augmente la rugosité, R_a , augmente et lorsque les autres paramètres des conditions de coupe (la profondeur de coupe, et l'avance) sont constants. En raison de la très faible valeur de l'angle de chute (angle d'attaque), nous pouvons conclure que cette dépendance est linéaire.

- ✓ Dans le cas d'un traitement avec un outil de coupe à facettes, on peut remarquer que la pente de variation de la fonction du paramètre R_a de l'avance, est d'environ 88 degrés. L'influence de ce paramètre est très importante et primordiale.

I.5.5. Evaluation et optimisation de la rugosité de surface et du taux d'enlèvement du metal lors de l'usinage du PTFE Polymers:

Ce travail [39] de recherche est réalisé dans le but de trouver les paramètres de tournage optimaux qui aboutissent à un taux d'enlèvement de matière plus élevé et une meilleure finition de surface pour les polymères de polytétrafluoroéthylène (PTFE). Les auteurs ont réalisé un plan composite centré avec 31 essais.

La vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), la profondeur de coupe (a_p) et le débit du liquide de refroidissement (C_f) comme entrée. L'analyse de la variance est utilisée pour prouver l'adéquation du modèle de régression quadratique des réponses de sortie. Analyse Relationnelle Gris (GRA) et la technique de l'ordre de préférence par similarité avec la solution idéale (TOPSIS) sont utilisés pour obtenir les paramètres optimaux, et les résultats obtenus sont comparés.

Les résultats trouvés montrent que :

- ✓ Le modèle de régression quadratique montre la signification, et le coefficient de corrélation (R^2) pour la rugosité de la surface et le taux d'enlèvement de métal a été obtenu comme étant de 0,9541 et 0,9444.
- ✓ Tiré d'analyse relationnelle des gris (GRA), les paramètres $v = 94,5$ m/min, $f = 0,30$ m/min, $a_p = 0,3$ mm et $C_f = 0$ lpm sont à maintenir pour obtenir des résultats optimaux. Comme montré dans **la Figure I.24**.

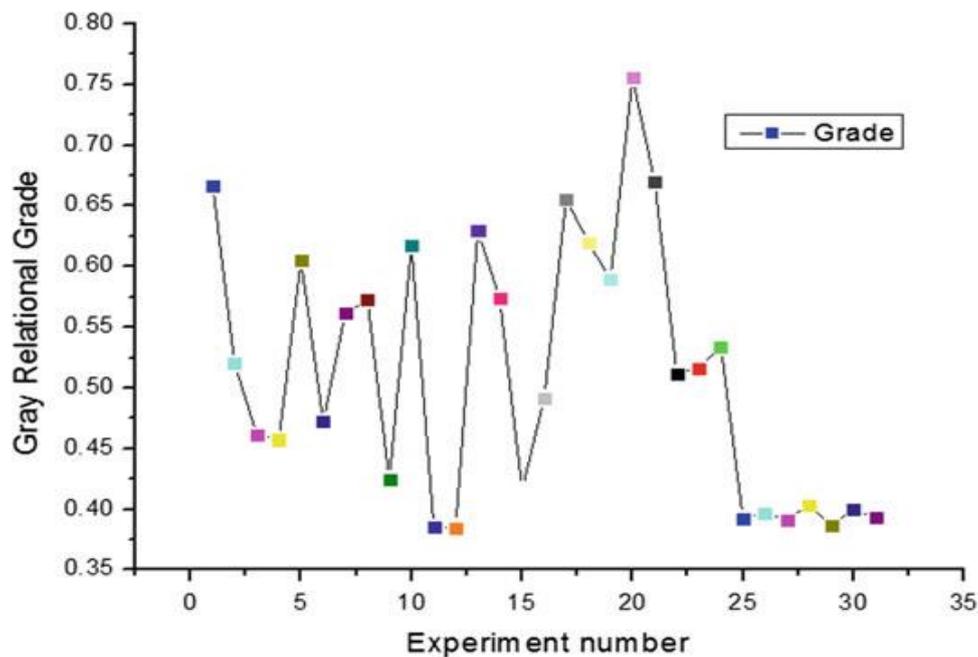


Figure I.24: Valeurs des Relationnelle Gris selon les expériences [39].

L'approche GRA est utilisée pour transformer les problèmes multi-objectifs en un seul objectif, la **Figure I.24** montrent que l'expérience numéro 20 (qualité gris=0,7556 correspondant aux valeurs : $v = 94,5$ m/min, $f = 0,30$ m/min, $ap = 0,3$ mm) est la valeur optimale pour obtenir une meilleure finition de surface avec une plus grande élimination du métal.

- ✓ Selon Algorithme TOPSIS, $v = 126,5$ m/min, $f = 0,25$ m/min, $ap = 0,2$ mm, $Cf = 0,66$ lpm est considéré comme une solution optimale pour atteindre les objectifs multiples.

Donc les modèles proposés sont :

$$\begin{aligned} \text{MRR} = & +0.21 + 0.025*A + 0.071*B + 9.527E-003*C - 0.014*D + 3.277E-003*A*B \\ & + 0.012*A*C - 0.023*A*D + 0.010*B*C - 0.012*B*D - 6.819E-003*C*D + \\ & 0.013*A^2 + 0.014*B^2 - 4.304E-003*C^2 + 5.975E-003*D^2(1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ra} = & +3.06 + 0.013*A + 0.52*B - 0.022*C - 0.47*D - 0.020*A*B + 0.051*A*C \\ & - 0.17*A*D - 0.10*B*C + 0.14*B*D - 0.11*C*D + 1.1321*A^2 - 0.3711*B^2 - 0.40145*C^2 \\ & + 0.10154*D^2(2) \end{aligned}$$

I.5.6. Etude de la rugosité de surface lors de l'usinage du PTFE chargé de %25 de carbone et de %25 de fibres de verre :

SANCI. M. E et al [40] ont réalisé une étude du tournage du PTFE chargé de 25% de carbone et de 25% de fibres de verre afin d'analyser l'effet des paramètres d'usinage sur la rugosité de la surface. Le tournage à sec a été effectué pour examiner la rugosité moyenne de la surface. Les paramètres d'usinage sélectionnés sont la vitesse de coupe (100 m/min), trois vitesses d'avance différentes (0,1, 0,2 et 0,3 mm/tour) et trois profondeurs de coupe différentes (1, 2, 3 mm). La réponse prise en compte a été la rugosité moyenne de surface (Ra). Les expériences ont été réalisées sur du PTFE pur commercial, chargé de %25 de carbone et de %25 de fibres de verre,

avec des échantillons cylindriques de 50 mm de diamètre. L'outil de coupe est un insert en carbure revêtu de TiN/Korloy WNMG-NC5330. Les résultats trouvés montrent que :

- ✓ L'augmentation de la vitesse d'avance se traduit par une plus grande rugosité de surface alors qu'une faible vitesse d'avance permet d'obtenir un meilleur état de surface.
- ✓ La valeur Ra la plus élevée a été observée sur le PTFE pur en tournage à une vitesse d'avance de 0,3 mm/tour et une profondeur de coupe de 1 mm, avec une valeur de 4.69 μ m. Cependant, dans ces conditions, l'effet de la profondeur de passe sur la rugosité de surface est très complexe et ne présente pas un comportement régulier.
- ✓ L'effet de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE est illustré à la **Figure I.25**.

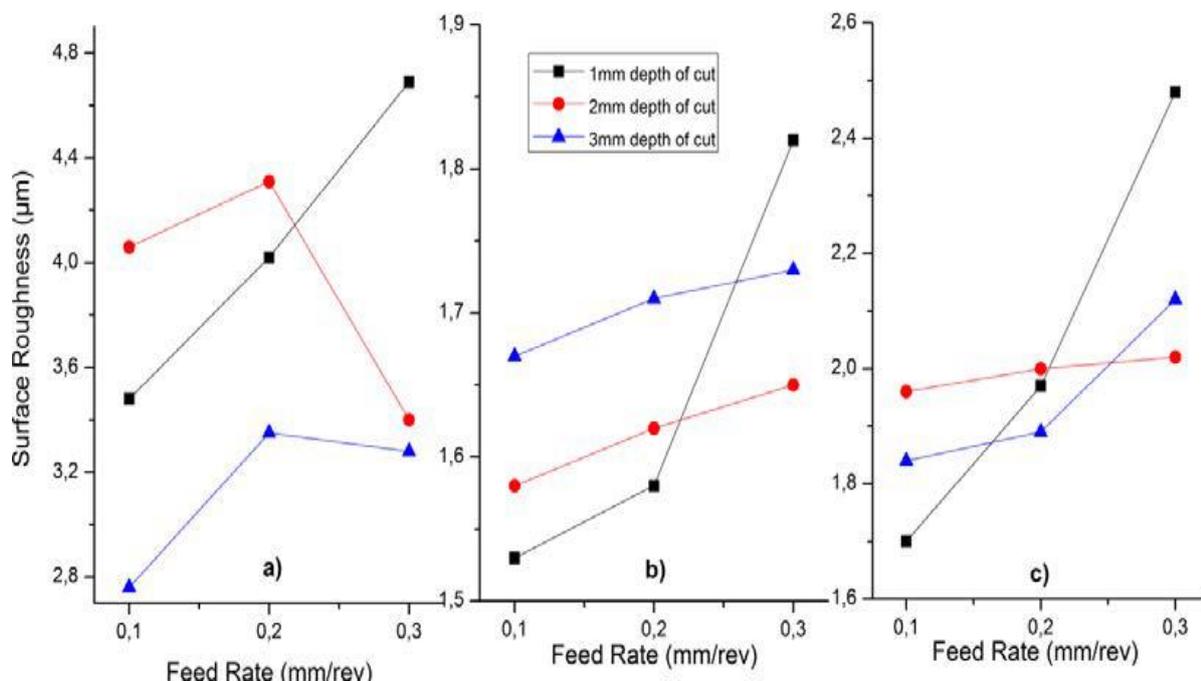


Figure I.25: Effet de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE [40] : a) Pur, b) %25 chargé de carbone, c) %25 chargé de fibres de verre.

- ✓ Les valeurs de rugosité de surface les plus faibles ont été observées sur du PTFE chargé de carbone et de fibres de verre. Cela indique que les charges de carbone et de fibre de verre permettent d'obtenir un meilleur état de surface dans les paramètres expérimentaux préférés. En particulier, les charges de carbone permettent d'obtenir une bonne usinabilité et une qualité de produit supérieure grâce à des valeurs de rugosité de surface minimales.

La Figure I.26 Présente une comparaison de la rugosité de surface entre du PTFE pur, chargé de 25 % de carbone et de 25 % de fibres de verre.

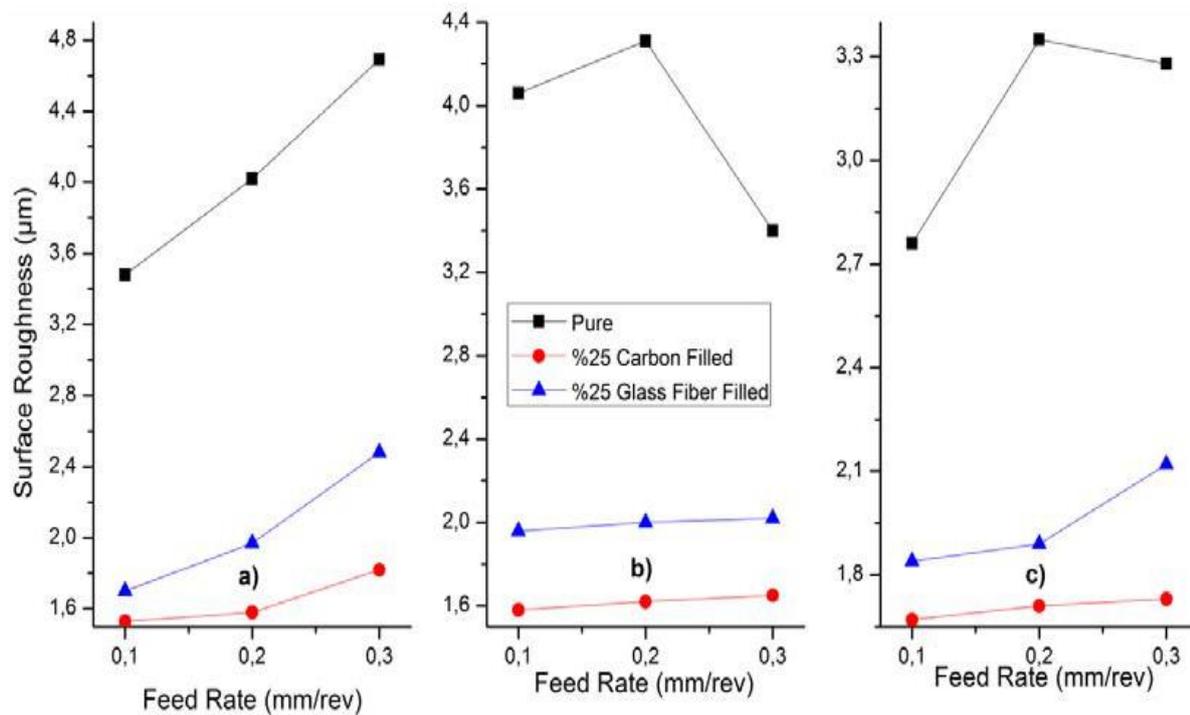


Figure I.26: Effet de la vitesse d'avance et des matériaux chargés sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE [40] : a) 1 mm de profondeur de coupe, b) 2 mm de profondeur de coupe, c) 3 mm de profondeur de coupe.

La valeur la plus faible de la rugosité de surface a été obtenue sur du PTFE chargé en carbone avec une vitesse d'avance de 0,1 mm/tour et une profondeur de coupe de 1 mm, comme indiqué sur le site 1.53 µm et la valeur Ra la plus élevée a été observée sur du PTFE pur avec une vitesse d'avance de 0,3 mm/tour et une profondeur de coupe de 1 mm, comme indiqué sur le site 4.69 µm. Par conséquent, les matériaux de charge utilisés dans les expériences permettent d'obtenir meilleure finition de surface que le PTFE non chargé.

I.5.7. Optimisation des paramètres d'usinage pour minimiser la rugosité de surface dans le tournage du polytétrafluoroéthylène chargé de fibres de carbone et de verre :

En raison de ses excellentes propriétés mécaniques et de son faible coefficient de frottement, Le PTFE est le plastique technique préféré pour de nombreuses applications et transformations techniques. Les fibres de verre et les charges de carbone peuvent augmenter les propriétés mécaniques du PTFE. Cependant, les charges peuvent entraîner des difficultés d'usinage. Les composites polymères diffèrent des métaux pendant les processus d'usinage en raison de la dépendance des polymères au temps et à la température et des charges structurelles supplémentaires.

Les expériences ont été menées en utilisant un outil de coupe WNMG-NC5330 revêtu de TiN. Les paramètres d'usinage comprenaient deux valeurs de vitesses de coupe (150 et 200 m/min), trois vitesses d'avance (0,1, 0,2 et 0,3 mm/tr) et trois profondeurs de coupe (1, 2 et 3 mm) et la réponse considérée était la moyenne rugosité de la surface (R_a). Les expériences ont été réalisées en utilisant des disponible en PTFE pur (non chargé), en PTFE chargé de carbone à 25 % et en fibre de verre à 25 %.

Le PTFE est utilisé sous forme d'échantillons cylindriques d'un diamètre de 50 mm. Les valeurs rapportées dans l'étude ont été prises à partir de lectures en différents points de la circonférence des échantillons de pièces. Les essais de rugosité de surface ont été illustrés dans la **Figure I.27**.

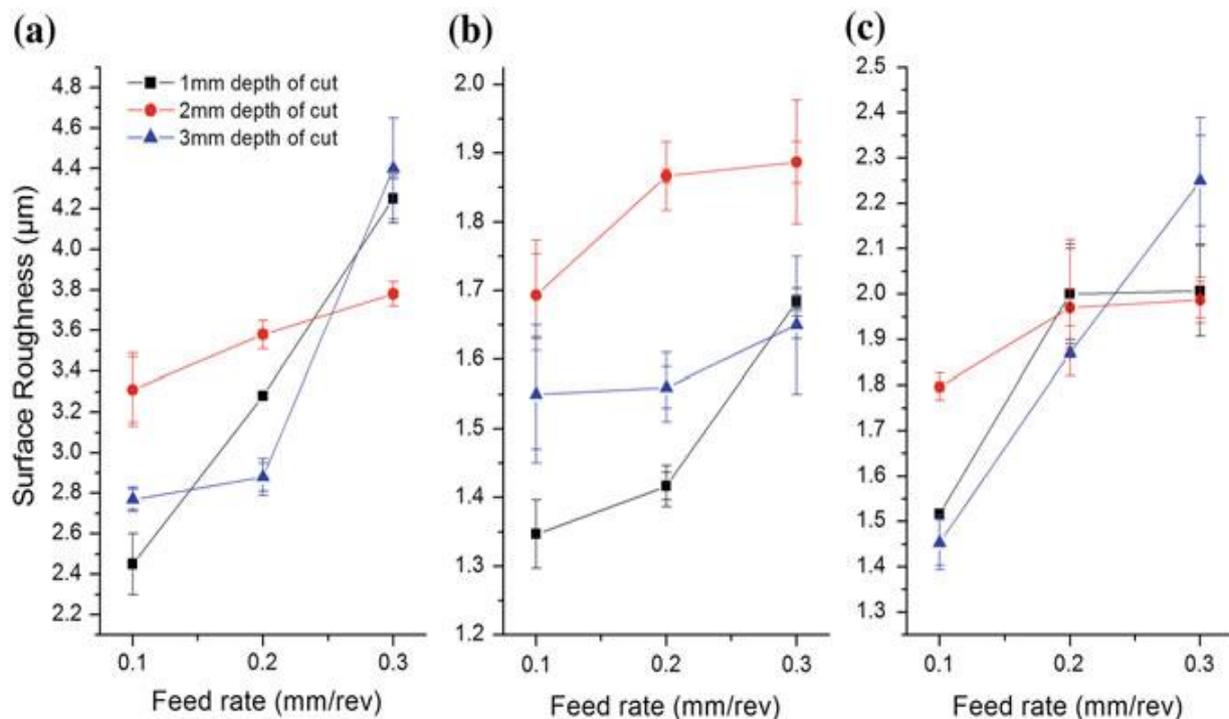


Figure I.27: Effet de la vitesse d'avance et de la profondeur de coupe sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE [41] : a) Pur (non chargé), b) 25% chargé de carbone, c) 25% chargé de fibres de verre.

On peut voir que la rugosité de surface du PTFE pur (non chargé), chargé de 25% de carbone et le PTFE chargé de 25% de fibres de verre augmente avec l'augmentation du débit dans toutes les profondeurs de paramètres de coupe. Par conséquent, une vitesse d'avance croissante a entraîné une augmentation des valeurs des rugosités de la surface, alors qu'une faible vitesse d'avance était supposée produire une meilleure surface finir. En outre, la valeur R_a la plus élevée (4,4 μm) a été observée sur des PTFE en tournage à une vitesse d'avance de 0,3 mm/tr et une profondeur de coupe de 3 mm. Cependant, dans ces conditions, l'effet de la profondeur de coupe sur la rugosité de la surface est très complexe et il ne présente pas un comportement régulier.

La **Figure I.28** révèle que les valeurs Ra les plus élevées ont été obtenues sur du PTFE pur en tournage à tous les paramètres d'usinage. Les valeurs Ra les plus faibles ont été observées sur PTFE chargé de carbone et de fibres de verre. Cela indique que le carbone et le verre Les fibres de remplissage ont permis d'obtenir une meilleure finition de surface avec les paramètres expérimentaux préférés.

En particulier, les charges de carbone ont fourni une bonne usinabilité et un produit supérieur de qualité grâce à des valeurs minimales de rugosité de surface. L'effet de la vitesse de coupe sur La rugosité de surface, dans le tournage du PTFE à une profondeur de coupe de 1 mm, est indiquée dans la **Figure I.29**.

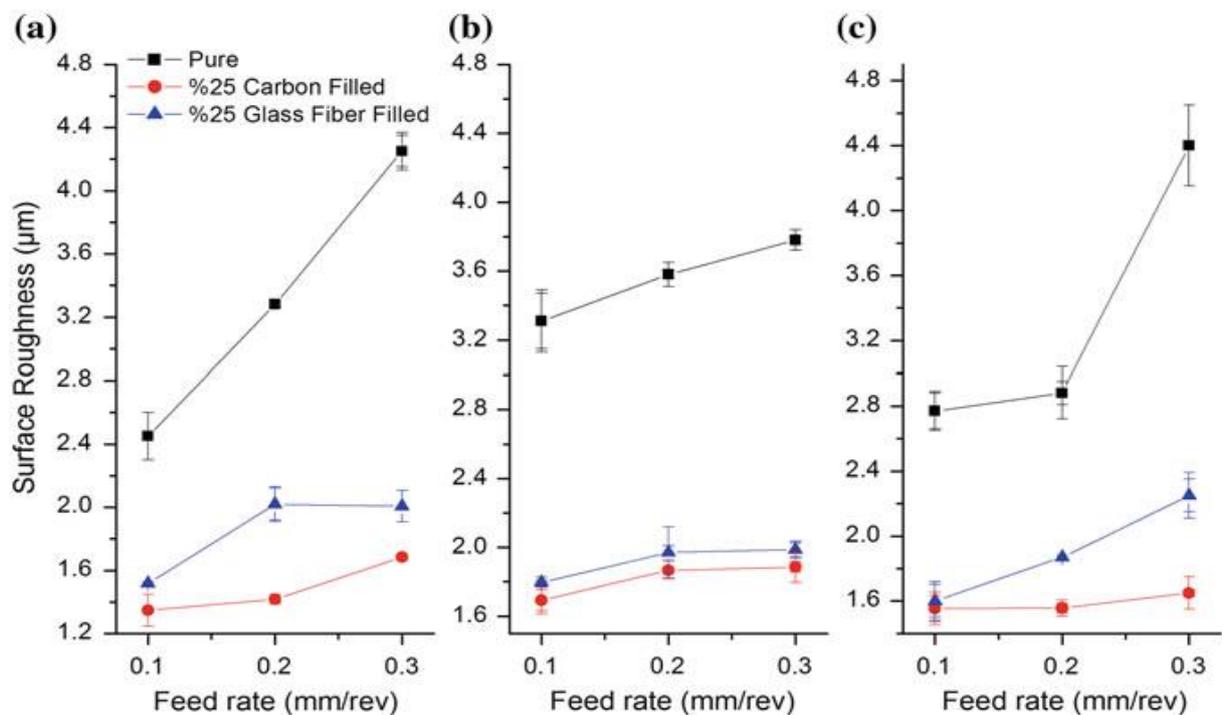


Figure I.28: Effet de la vitesse d'avance et des matériaux chargés sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE [41] : a) 1 mm de profondeur de coupe, b) 2 mm de profondeur de coupe, c) 3 mm de profondeur de coupe.

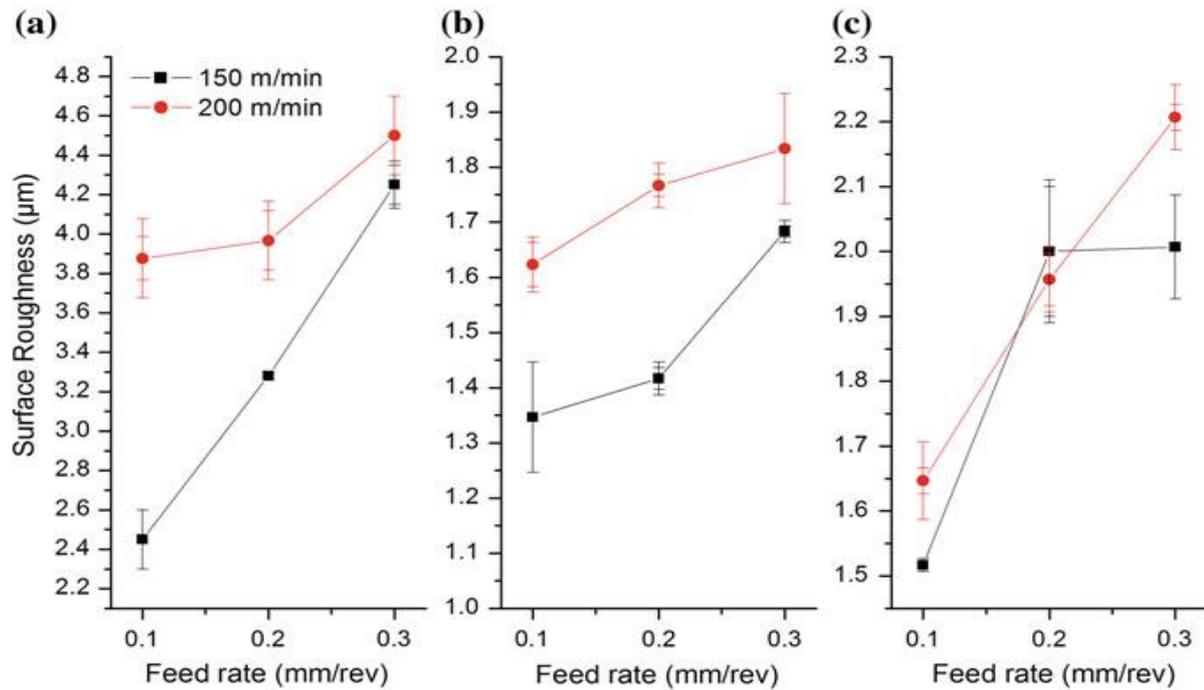


Figure I.29: Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface dans le tournage du PTFE [41] : a) pur (non chargé), b) chargé de carbone à 25 %, c) chargé de fibres de verre à 25%.

On peut constater que les valeurs de rugosité de la surface de l'acier pur, rempli de carbone à 25 % et le PTFE chargé de 25% de fibres de verre diminue généralement dans tous les échantillons avec l'augmentation de vitesse de coupe. Ainsi, une vitesse de coupe plus élevée se traduit par une rugosité de surface plus faible et on a supposé qu'une faible vitesse d'avance permettait d'obtenir un meilleur état de surface.

En plus, Un modèle de prédiction basé sur l'ANN a été développé pour déterminer les paramètres de coupe optimaux (vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de coupe) en termes de rugosité de surface dans le tournage de PTFE chargé de 25% de carbone et de 25% de fibres de verre.

Les conclusions suivantes ont été tirées :

Il est généralement reconnu que la vitesse d'avance est un facteur important dans le processus de tournage des matériaux en PTFE. Une faible vitesse de coupe permet d'obtenir un meilleur état de surface. De plus, l'effet de la profondeur de coupe sur la rugosité de la surface n'est pas régulier.

La valeur Ra la plus faible (1,35 µm) a été obtenue sur le PTFE chargé de carbone en tournage à une vitesse de coupe de 150 m/min, une avance de 0,1 mm/tour et une profondeur de coupe de 1 mm, tandis que la plus grande valeur Ra (4,4 µm) a été observée sur le PTFE pur en tournage à une vitesse de coupe de 150 m/min, une avance de 0,3 mm/tour et une profondeur de coupe de 3 mm. Par conséquent, d'après les expériences, un meilleur état de surface a été obtenu avec le PTFE chargé plutôt qu'avec le PTFE non chargé.

Lorsque les résultats de l'ANN ont été comparés aux valeurs expérimentales, les prédictions du modèle de réseau neuronal se sont révélées précises et fiables, avec des résultats très proches des valeurs expérimentales. Ainsi, le modèle proposé peut être utilisé pour la prédiction de la rugosité de surface dans les opérations de tournage, avec un potentiel d'utilisation dans de nombreuses autres applications. Le modèle *NARX et Levenberg* l'algorithme de Marquardt (LM) s'est révélé précis pour l'optimisation des paramètres d'usinage.

I.6. Conclusion

Nous avons présenté dans cette recherche bibliographique les bases nécessaires à la compréhension de notre étude. Ce chapitre est divisé en trois parties, la première partie contient les phénomènes de la coupe des métaux. Une seconde partie est dédiée aux définitions et présentations des matériaux polymères, des domaines d'utilisations et du mode de fabrication. La dernière partie traite l'état de l'art scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux avec ces paramètres et phénomènes, La seconde partie est dédiée aux matériaux polymères en général et polyamides en particulier avec leurs propriétés sur l'usinabilité des polymères.

Après avoir étudié et discuté la recherche bibliographique, nous pouvons conclure que les polyamides sont classés parmi les matériaux difficiles à usiner à cause de leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Le prochain chapitre (*chapitre II*) présente l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

Chapitre **II**

Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale conçue dans le but de présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés, qui ont servi à l'étude de l'évolution des différents paramètres technologiques d'usinage, tels qu'un banc d'essais comportant un tour, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée (R_a). Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification des expériences et les conditions de réalisation des essais. Les essais d'usinage sur le polymère polyamide 6 (PA6), nécessaires à la réalisation de notre mémoire ont été effectués au laboratoire de mécanique et de structure (LMS) et au département de génie mécanique à l'université 8 mai 1945- Guelma.

II.2. Matériels utilisé

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences ainsi que les équipements de mesure des différents paramètres technologiques. Un banc d'essais comportant un tour à charioter et à fileter et un rugosimètre (2D).

II.2.1. Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour à charioter et à fileter de la société Tchèque « TOS TENCIN » modèle SN 40 d'une puissance de 6.6 KW sur la broche, ayant une gamme de vitesse de 45 à 2000 tr/min et d'avances de 0.08 à 6.4 mm/tr (**Figure II.1**).



Figure II.1: Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.

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...6,4) mm/tr. Afin de travailler avec des vitesses de coupe constantes, notre tour est équipé d'un variateur de fréquence modèle ABB série ACS355 (**Figure II.2**), un capteur de vitesse qui permet le control du nombre de tour (**Figure II.3**).



Figure II.2: Variateur de fréquence ABB ACS355.



Figure II.3: Capteur de vitesse.

II.2.2. Matériau à usiné

Le matériau utilisé dans cette étude est un polymère thermoplastique appelé Polyamide (PA6). C'est un matériau tendre, facilement déformable, opaque, blanc, semi-cristallin. Il présente une remarquable résistance à la fatigue dynamique et à l'usure, un coefficient de frottement extrêmement faible et bon comportement à la chaleur et au froid ainsi qu'à bon nombre de produits chimiques. Ces propriétés inhabituelles lui confèrent une valeur inestimable pour un grand nombre d'applications (Roues dentées, valves, moulinets de canne à pêche, serrurerie, roues de vélo, jantes, pédales, Paliers lisses de roulements...etc.). Les propriétés techniques du PA6 sont présentées dans le **Tableau II.1**.

Tableau II.1: Propriété technique du PA6 [42].

<i>Propriétés Physiques</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Unités</i>	<i>Norme DIN</i>
<i>Densité</i>	1.14	[g/cm ³]	53479
<i>Absorption d'eau à 23 [°C] HR50 [%]</i>	3.0	[%]	53495
<i>Dureté</i>	R100	-	53505
<i>Résilience</i>	>7	[KJ/m ²]	53453
<i>Allongement à la rupture</i>	50	%	53455
<i>Résistance à la traction</i>	70-80	[N/mm ²]	53455
<i>Module d'élasticité en traction</i>	2800	[N/mm ²]	43457
<i>Propriétés Thermiques</i>			
<i>T°C d'utilisation en continu</i>	1.14	[T°C]	52612
<i>Point de Fusion</i>	3.0	[T°C]	53736
<i>Coefficient de dilatation thermique lin.</i>	R100	[10E-5 mm/°C]	52328
<i>T°C de déformation sous charge 1,85 [N/mm²]</i>	>7	[T°C]	-
<i>Conductivité thermique</i>	50	[W/°C.m]	52612
<i>Classement au feu</i>	70	-	UL94
<i>Indice d'Oxygène</i>	2800	[%]	UL94

Les éprouvettes utilisées pour les essais de rugosité de surface sont coupées sur une barre plane en Polyamide 6 (PA6) qui possède un diamètre $d = 90$ mm et une longueur $l = 400$ mm avec plusieurs paliers de 20 mm de longueurs séparées par des gorges de 5 mm (**Figure II.4**).

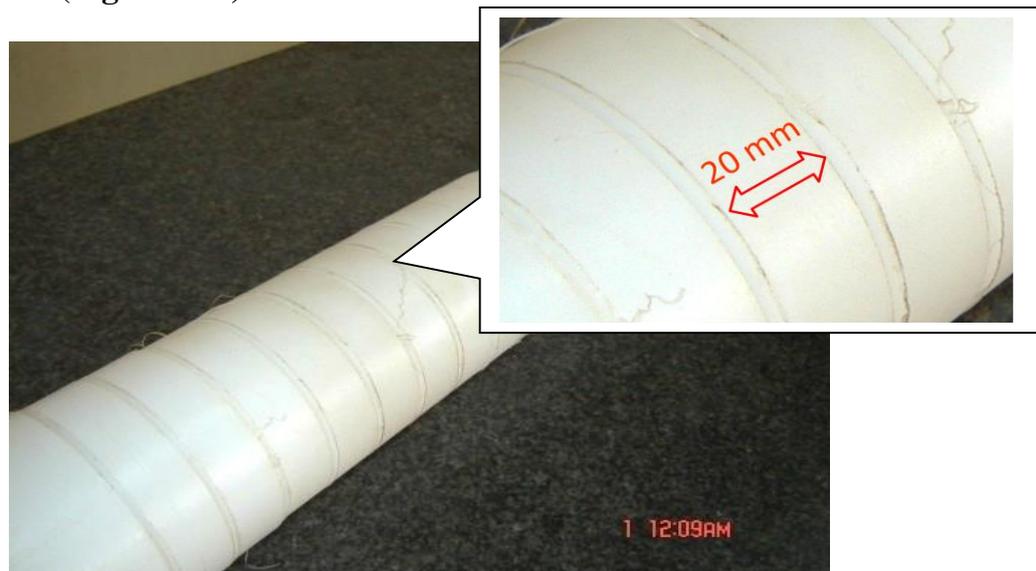


Figure II.4: Eprouvette utilisée pour différents essais.

II.2.3. Outils de coupe

II.2.3.1. Plaquette de coupe

Pour la réalisation des essais d'usinage, toutes les opérations de tournage ont été effectuées par une plaquette en carbure de désignation **SPMR 120308**. La plaquette est amovible de forme carrée avec quatre arêtes de coupe (**Figure II.5**).



Figure II.5: Plaquette de coupe utilisée [8].

Toutes les informations qui concernent la plaquette de coupe sont regroupées dans le **Tableau II.2**.

Tableau II.2: Informations relatives aux plaquettes de coupe [8].

<i>Désignation</i>	<i>Matériaux de coupe</i>	<i>Forme de la plaquette</i>	<i>Angle de déviation</i>	<i>Longueur de l'arête de coupe</i>	<i>Épaisseur de la plaquette</i>	<i>Rayon du bec rε</i>
<i>SPMR12-03-08</i>	Carbure	Carré	11°	12 mm	4,76 mm	0,8 mm

II.2.3.2. Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons fixé les plaquettes de coupe sur un porte outil de désignation **CSDPN25x25M12** à fixation par bride avec un angle de coupe positif (**Figure II.6**).



Figure II.6: Porte outil utilisé (CSDPN25x25M12).

II.2.4. Chaîne de mesure utilisée et paramètres de sortie

Pour réaliser la mesure du paramètre de sortie, nous avons utilisé l'instrument de mesure suivant :

- ✓ Un rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface.

II.2.4.1. Rugosimètre 2D pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure de la rugosité moyenne arithmétique (Ra) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) de type MITUTOYO modèle SJ-210 (**Figure II.7**), Il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur) de $5\ \mu\text{m}$ et se déplaçant linéairement (axialement) sur la surface usinée, 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.



Figure II.7: Rugosimètre 2D.

II.2.4.2. Débit de copeau enlever (MRR)

Le débit d'enlèvement de copeaux permet de mesurer la productivité d'une d'usinage. L'on applique le principe selon lequel la cadence de base de la machine diminue à mesure de l'augmentation du débit d'enlèvement de copeaux.

Le débit d'enlèvement de copeaux (MRR) désigne la quantité (volume) de copeaux enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivante :

$$MRR = V_c \times A \quad (\text{II.1})$$

MRR : Débit d'enlèvement de copeaux [cm^3/min].

V_c : Vitesse de coupe [m/min].

A : Section de coupe [mm^2] avec :

$$A = a_p \times f \quad (\text{II.2})$$

D'où :

$$MRR = V_c \times a_p \times f \quad (\text{II.3})$$

II.3. Autres équipements

- ✓ Un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés.
- ✓ Un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce.
- ✓ Nous avons utilisé des logiciels dans cette étude et qui sont :
 - ✚ Logiciel **MiniTAB18** pour la modélisation de la rugosité de surface et le débit de copeau enlevé pour obtenir les modèles de prédiction (**Figure II.8**).
 - ✚ Logiciel **Design Expert 10** qui est développé par la société de Stat-ease pour effectuer l'optimisation de la rugosité et l'optimisation du débit de copeau enlevé en utilise la méthodologie de surface de réponse (RSM) (**Figure II.9**).

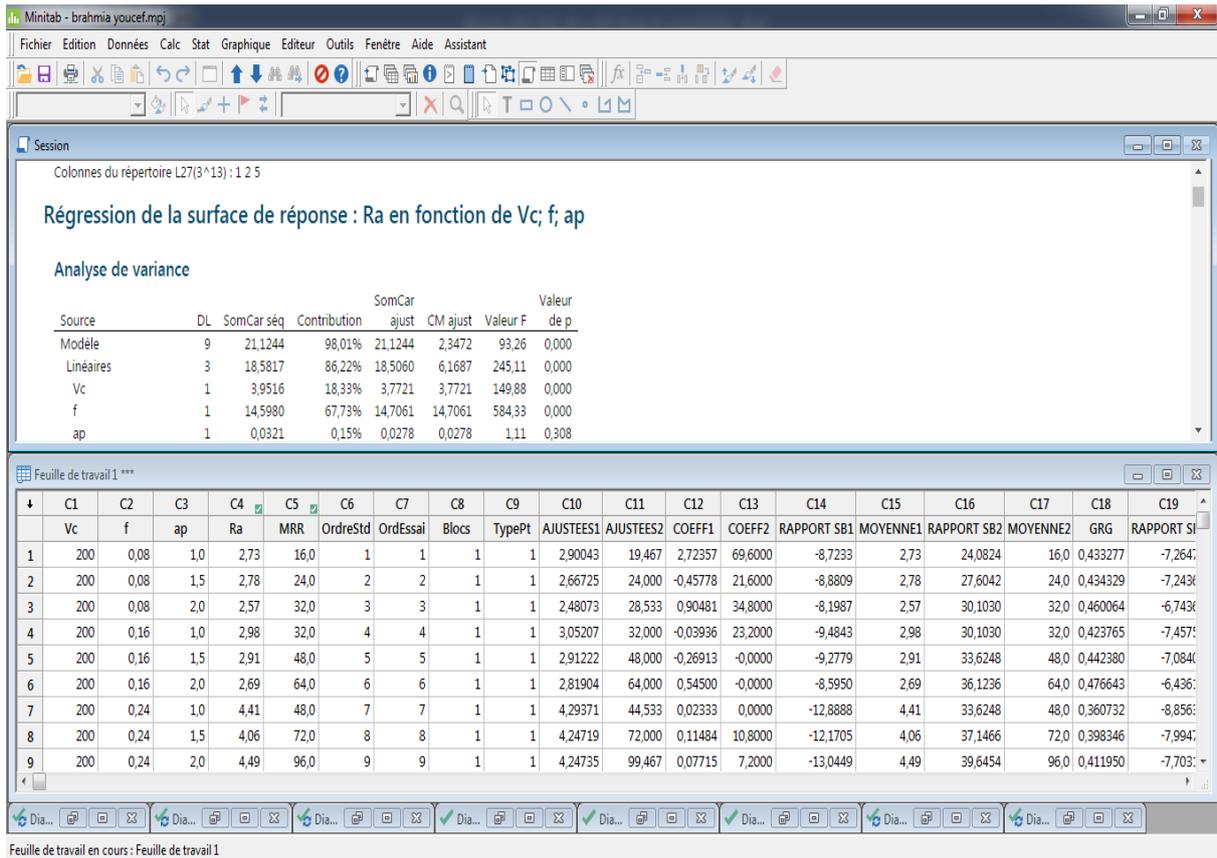


Figure II.8: Interface de logiciel MiniTAB18.

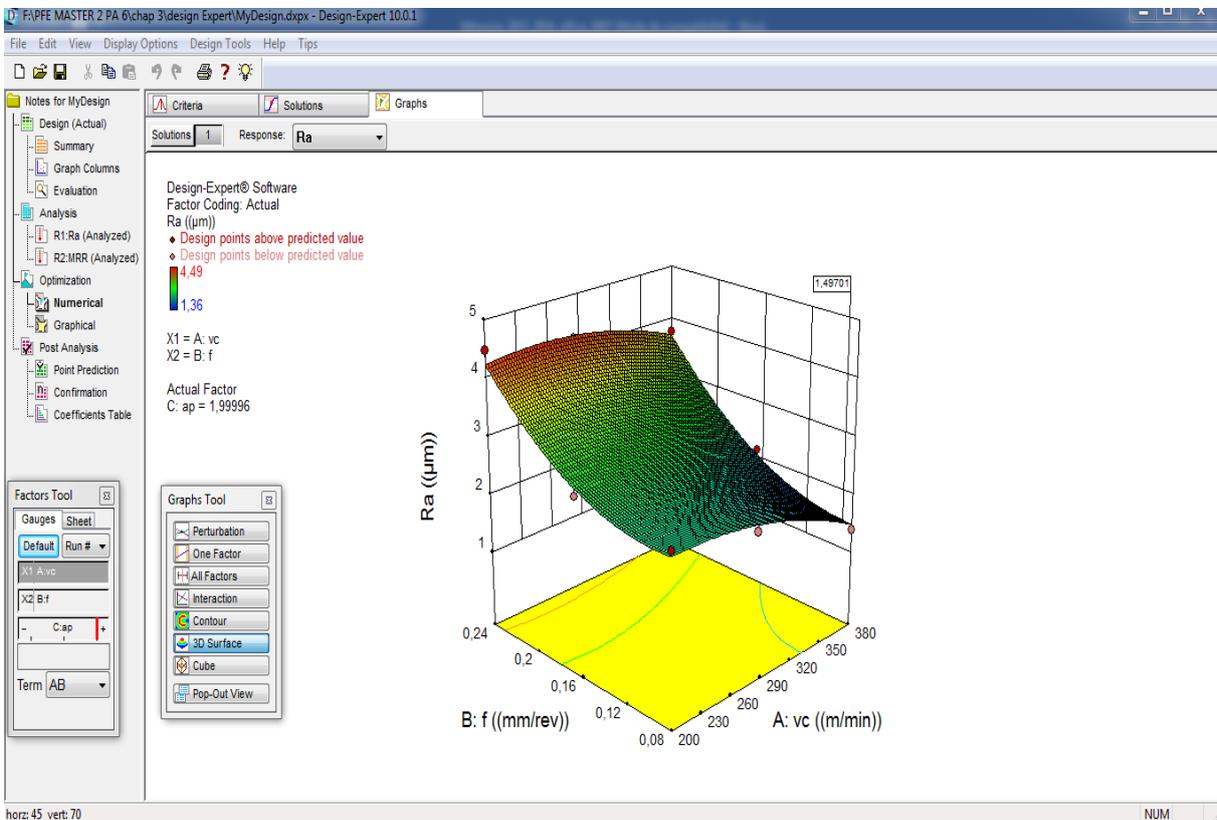


Figure II.9: Interface de logiciel Design Expert 10 développé par Stat-ease.

II.4. Planification des expériences

Un très grand nombre de facteurs agit sur les paramètres de sortie dans un processus de coupe, tels que la géométrie de l'outil ($\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \chi, \dots$, etc.), les paramètres du régime de coupe (V_c, f, a_p), les caractéristiques du matériau usiné (dureté, R_r), la composition chimique et les conditions de travail ... etc.

Ces facteurs représentent les paramètres d'entrée du système d'usinage. La précision, la rugosité de surface, les efforts, le volume de copeau, etc..., représentent les paramètres de sortie.

II.4.1. Plans de Taguchi

La méthode de Taguchi vient pour enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires [43]. Elle a pour but de simplifier le protocole expérimental afin de mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. Elle permet d'obtenir des résultats en utilisant moins d'essais expérimentaux que les autres méthodes. Taguchi a montré que si ces essais expérimentaux sont choisis de manière appropriée, il n'est pas nécessaire de réaliser des matrices factorielles complètes. La base de la méthode de Taguchi est les tableaux orthogonaux, qui montrent que les niveaux de facteur doivent être choisis chaque fois pour faire le moins de passages possibles. L'idée principale est de se concentrer uniquement sur les quelques expériences qui sont essentielles pour l'analyse. Les résultats obtenus ne peuvent pas être optimale, mais lorsque ces résultats sont mis en œuvre, le procédé est amélioré. Par conséquent, moins d'argent et de temps sont dépensés lorsque la méthode de Taguchi est employée.

Comme tout plan d'expérience, le plan de Taguchi implique le choix des paramètres d'entrée et l'identification des variables de sortie. Les paramètres d'entrée sont ceux qui changent suivant les essais. Leur nombre définit le nombre total d'essais du plan d'expériences. Les variables de sortie constituent l'ensemble des réponses.

La table orthogonale standard $L_{27} (3^{13})$ de Taguchi est adoptée comme plan expérimentale (**tableau II.3**). Il contient 27 lignes correspondant au nombre de tests (26 degrés de liberté) avec 13 colonnes à trois niveaux. Les facteurs et les interactions sont attribués aux colonnes. La première colonne du tableau a été attribuée à la vitesse de coupe (V_c), la seconde à la vitesse d'avance (f), la cinquième à la profondeur de coupe (a_p). La matrice de planification, ainsi adoptée, donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe selon le plan de Taguchi comme sont illustrées dans le **Tableau II.4**.

Tableau II.3: Table orthogonale de Taguchi pour un plan de 27 [44].

L27 (3 ¹³)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Tableau II.4: Matrice de planification pour un plan Taguchi (L27).

N° d'essais	Paramètres d'usinage			Facteurs technologiques de performances	
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	MRR (cm ³ /min)
1	200	0,08	1,0	2,73	16,00
2	200	0,08	1,5	2,78	24,00
3	200	0,08	2,0	2,57	32,00
4	200	0,16	1,0	2,98	32,00
5	200	0,16	1,5	2,91	48,00
6	200	0,16	2,0	2,69	64,00
7	200	0,24	1,0	4,41	48,00
8	200	0,24	1,5	4,06	72,00
9	200	0,24	2,0	4,49	96,00
10	280	0,08	1,0	2,74	22,40
11	280	0,08	1,5	2,57	33,60
12	280	0,08	2,0	2,19	44,80
13	280	0,16	1,0	2,93	44,80
14	280	0,16	1,5	2,66	67,20
15	280	0,16	2,0	2,66	89,60
16	280	0,24	1,0	4,29	67,20
17	280	0,24	1,5	4,08	100,80
18	280	0,24	2,0	4,23	134,40
19	380	0,08	1,0	1,36	30,40
20	380	0,08	1,5	1,65	45,60
21	380	0,08	2,0	1,39	60,80
22	380	0,16	1,0	2,11	60,80
23	380	0,16	1,5	2,09	91,20
24	380	0,16	2,0	2,15	121,60
25	380	0,24	1,0	3,35	91,20
26	380	0,24	1,5	3,51	136,80
27	380	0,24	2,0	3,77	182,40

II.5. Lubrification

La lubrification est un procédé par lequel la friction entre deux pièces en mouvement est réduite (introduction d'un fluide séparant les deux surfaces). Le rôle de la lubrification est multiple. Le rôle primaire de la lubrification est l'évacuation des copeaux, Elle permet de réduire le frottement et l'usure, le refroidissement et la lubrification entre l'outil et la pièce. Mais aussi de dissiper la chaleur produite dans le contact, de protéger contre la corrosion et d'empêcher le grippage.

Les polymères et les composites à base de polymères deviennent de plus en plus des matériaux et des revêtements de prédilection pour la tribologie verte en raison de la combinaison de bonnes propriétés mécaniques et tribologiques, de la résistance à la corrosion et aux produits chimiques, de la légèreté, de la réduction du bruit et des coûts de maintenance. Ils peuvent être utilisés à sec ou lubrifiés pour réduire davantage la friction et l'usure des pièces tribologiques.

L'utilisation du PA6 réduit aussi les exigences de lubrification et il est non abrasif sur les surfaces d'ajustement. C'est pour cela on a réalisé toute les essaies dans cette étude à sec (sans lubrification).

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. Les propriétés techniques des éprouvettes et les caractéristiques de l'outil de coupe ont été définies, les instruments de mesure utilisés, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées. Dans le chapitre III qui suit, nous présentons les différents résultats de l'évolution de la rugosité de surface et en fonction des paramètres de coupe.

Chapitre III

*Modélisation par L'analyse de
Variance et La Méthodologie
des Surfaces de Réponse*

III.1. Introduction

Ce chapitre est réservé à la détermination des modèles mathématiques des phénomènes étudiés lors du tournage du polyamide (PA6) afin de pouvoir faire des prédictions. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) et les paramètres technologiques étudiés (la rugosité de surface et le débit de copeau enlevé). Le traitement des résultats est réalisé en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) qui a pour objectif de déterminer les facteurs et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, aussi pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques. Les modèles trouvés serviront à l'optimisation des conditions de coupe en utilisant la fonction de désirabilité (DF). Le traitement des résultats a été réalisé par deux logiciels de statistique appelés «MINITAB18» et «Design Expert 10».

III.2. Résultats expérimentaux

Le **Tableau III.1** présente les valeurs expérimentales de la rugosité de surface (R_a) des éprouvettes usinées et le débit de copeau enlevé (MRR) en fonction des trois paramètres principaux de coupe (V_c , f et a_p). Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de Taguchi (L27) lors de tournages de polyamide PA6

Ce plan d'expérience est le prolongement du travail réalisé par ZAIDI au paravent [Magister [8]], le plan contient deux paramètres de sortie :

- ✓ La rugosité de surface arithmétique (R_a).
- ✓ Le débit de copeau enlevé (MRR) qui a une relation directe avec la productivité.

Tableau III.1: Résultats expérimentaux pour un plan (L27).

N° d'essais	Paramètres d'usinage			Facteurs technologiques de performances	
	Vc(m/min)	f(mm/tr)	ap(mm)	Ra (µm)	MRR (cm ³ /min)
1	200	0,08	1,0	2,73	16,00
2	200	0,08	1,5	2,78	24,00
3	200	0,08	2,0	2,57	32,00
4	200	0,16	1,0	2,98	32,00
5	200	0,16	1,5	2,91	48,00
6	200	0,16	2,0	2,69	64,00
7	200	0,24	1,0	4,41	48,00
8	200	0,24	1,5	4,06	72,00
9	200	0,24	2,0	4,49	96,00
10	280	0,08	1,0	2,74	22,40
11	280	0,08	1,5	2,57	33,60
12	280	0,08	2,0	2,19	44,80
13	280	0,16	1,0	2,93	44,80
14	280	0,16	1,5	2,66	67,20
15	280	0,16	2,0	2,66	89,60
16	280	0,24	1,0	4,29	67,20
17	280	0,24	1,5	4,08	100,80
18	280	0,24	2,0	4,23	134,40
19	380	0,08	1,0	1,36	30,40
20	380	0,08	1,5	1,65	45,60
21	380	0,08	2,0	1,39	60,80
22	380	0,16	1,0	2,11	60,80
23	380	0,16	1,5	2,09	91,20
24	380	0,16	2,0	2,15	121,60
25	380	0,24	1,0	3,35	91,20
26	380	0,24	1,5	3,51	136,80
27	380	0,24	2,0	3,77	182,40

L'analyse des résultats du **Tableau III.1** montre que la rugosité de surface (Ra) est enregistrée dans l'intervalle des valeurs comprise entre [1,36 et 4,49] µm. On remarque aussi que les valeurs du débit du copeau enlevé (MRR) varient dans l'intervalle [16 et 182,40] cm³/min.

III.3. Analyse de variance et Méthodologie des surfaces de réponse

III.3.1. Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de variance (ANOVA) est utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le processus d'usinage, elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie [45]. Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par *P-value* et *F-value* d'ANOVA.

Dans le tableau d'ANOVA, *P-value* est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

- ✓ Si $P > 0,05$, le paramètre est insignifiant
- ✓ Si $P < 0,05$, le paramètre est significatif

La somme des carrés (SC) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale. Il est exprimé par l'équation :

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

Où :

$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$: La moyenne des réponses.

y_i : la réponse moyenne observée dans les expériences.

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.

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad \text{(III.2)}$$

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

$$Cont. \% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad \text{(III.3)}$$

III.3.2. Méthodologie des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponse (RSM) 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 par tour (f) et la profondeur de passe (ap)} 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 [46]

$$Y = \varphi(V_c, f, ap) \quad (III.4)$$

Où : φ est la fonction de réponse.

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est une procédure qui comprend six étapes :

- ✓ Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées ;
- ✓ Adopter un plan de conception expérimentale ;
- ✓ Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de RSM ;
- ✓ Analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- ✓ Déterminer la situation du modèle quadratique de RSM et de décider si le modèle de RSM à besoin des variables de dépistage ou non et enfin ;
- ✓ Optimiser les paramètres d'entrée et faire les tests de confirmation afin de vérifier les performances prédites.

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...), d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1} a_i X_i + \sum_{i=1} a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j \quad (III.5)$$

- Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- X_i représente le niveau attribué au facteur i . C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est

parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;

- $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ijk}$ représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences. 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.6).

$$R^2 = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad \text{(III.6)}$$

Avec :

y_i : valeur de la réponse calculée à la $i^{\text{ème}}$ expérience.

\hat{y}_i : Valeur mesurée à la $i^{\text{ème}}$ expérience.

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

L'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour tester la validité du modèle, ainsi qu'examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérés statistiquement significatifs. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réelles (expérimentales) [46-47].

III.4. Analyse statistique et modélisation des paramètres technologiques

III.4.1. Analyse des résultats de la rugosité de surface (Ra)

III.4.1.1. Analyse de la variance ANOVA pour (Ra)

Le tableau III.2 illustre les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux ainsi que les interactions sur (Ra). Dans ce tableau, Il est clair que l'avance par tour (f) est le facteur le plus influent sur la rugosité (Ra) avec une contribution de 67,73 %, suivie par la vitesse de coupe (Vc) avec la contribution de 18,33 % puis les produit (f^2, Vc^2) ont des contributions de (8,27% et 1,96%) respectivement. Nous observons aussi que la profondeur de passe (ap), les interactions ($Vc*f, Vc*ap, f*ap$) et le produit (ap^2) n'ont pas d'influence significative sur la rugosité (Ra).

Tableau III.2: Résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (*Ra*).

Source	DL	SomCar Séq	SomCar Ajust	CM ajust	Valeur F	p-value Prob> F	Contribution	Remarques
Modèle	9	21,1244	21,1244	2,3472	93,26	< 0,001	98,01%	<i>Signifiant</i>
Linéaires	3	18,5817	18,5060	6,1687	245,11	< 0,001	86,22%	<i>Signifiant</i>
Vc	1	3,9516	3,7721	3,7721	149,88	< 0,001	18,33%	<i>Signifiant</i>
f	1	14,5980	14,7061	14,7061	584,33	< 0,001	67,73%	<i>Signifiant</i>
ap	1	0,0321	0,0278	0,0278	1,11	0,308	0,15%	<i>Non signifiant</i>
Carré	3	2,2076	2,2076	0,7359	29,24	< 0,001	10,24%	<i>Signifiant</i>
Vc*Vc	1	0,4222	0,4222	0,4222	16,77	0,001	1,96%	<i>Signifiant</i>
f*f	1	1,7821	1,7821	1,7821	70,81	< 0,001	8,27%	<i>Signifiant</i>
ap*ap	1	0,0033	0,0033	0,0033	0,13	0,723	0,02%	<i>Non signifiant</i>
Interaction à 2 facteurs	3	0,3352	0,3352	0,1117	4,44	0,018	1,56%	<i>Signifiant</i>
Vc*f	1	0,1589	0,1589	0,1589	6,31	0,022	0,74%	<i>Signifiant</i>
Vc*ap	1	0,0717	0,0717	0,0717	2,85	0,110	0,33%	<i>Non signifiant</i>
f*ap	1	0,1045	0,1045	0,1045	4,15	0,057	0,49%	<i>Non signifiant</i>
Erreur	17	0,4278	0,4278	0,0252			1,99%	
Total	26	21,5523					100,00%	

III.4.1.2. Graphique des effets moyens et diagramme d'interaction pour (*Ra*)

La figure III.1 présente les effets principaux des paramètres de coupe sur la rugosité (*Ra*) en fonction des conditions de coupe. L'analyse des graphes montre que l'avance (*f*) est le facteur le plus influent sur la rugosité (*Ra*) car il a la plus grande pente, suivie par la vitesse de coupe (*Vc*). Par contre, la profondeur de passe (*ap*) a une très faible influence sur la rugosité (*Ra*).

La figure III.2 montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la rugosité (*Ra*). L'analyse des graphes indique que les interactions (*Vc*×*f*), (*Vc*×*ap*) et (*f*×*ap*) ne sont pas visibles, puisque les différentes courbes sont presque parallèles, ce qui est en accord avec les résultats de l'ANOVA (tableau III.2), où le pourcentage de contribution des différents termes d'interaction ne dépasse pas 0.75%.

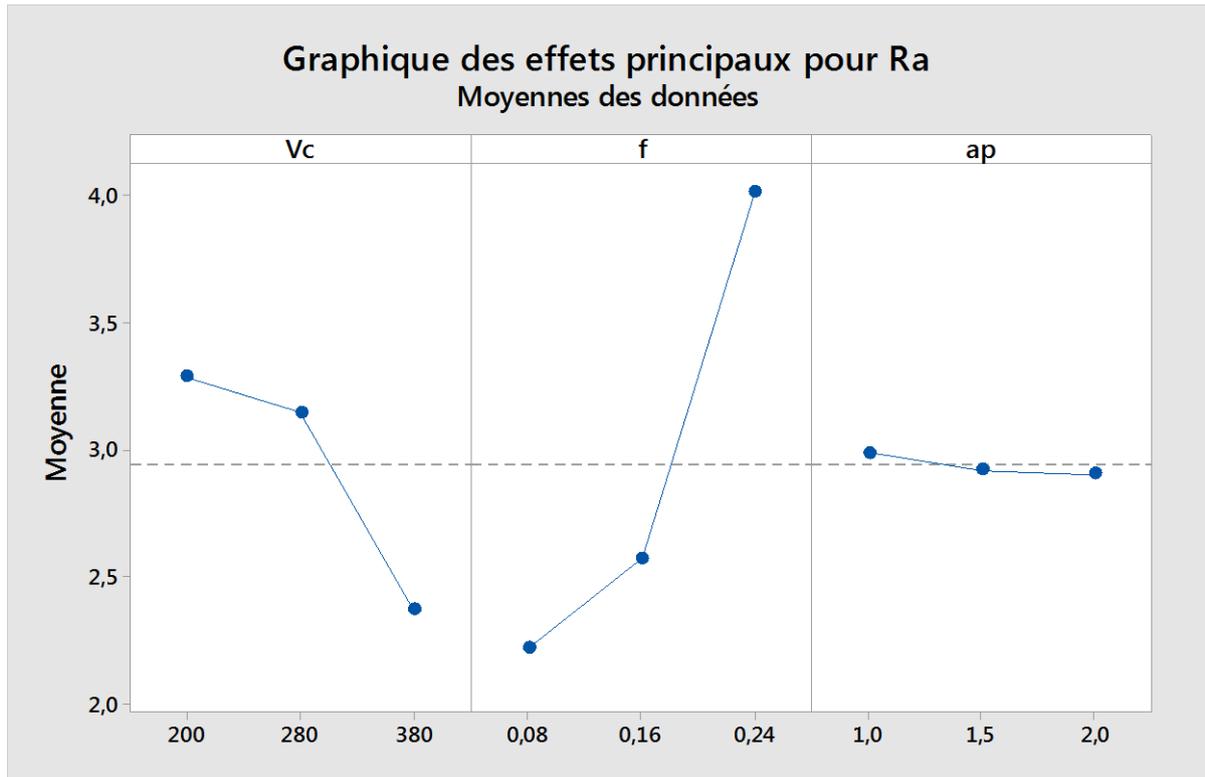


Figure III.1: Graphique des effets principaux pour (Ra)

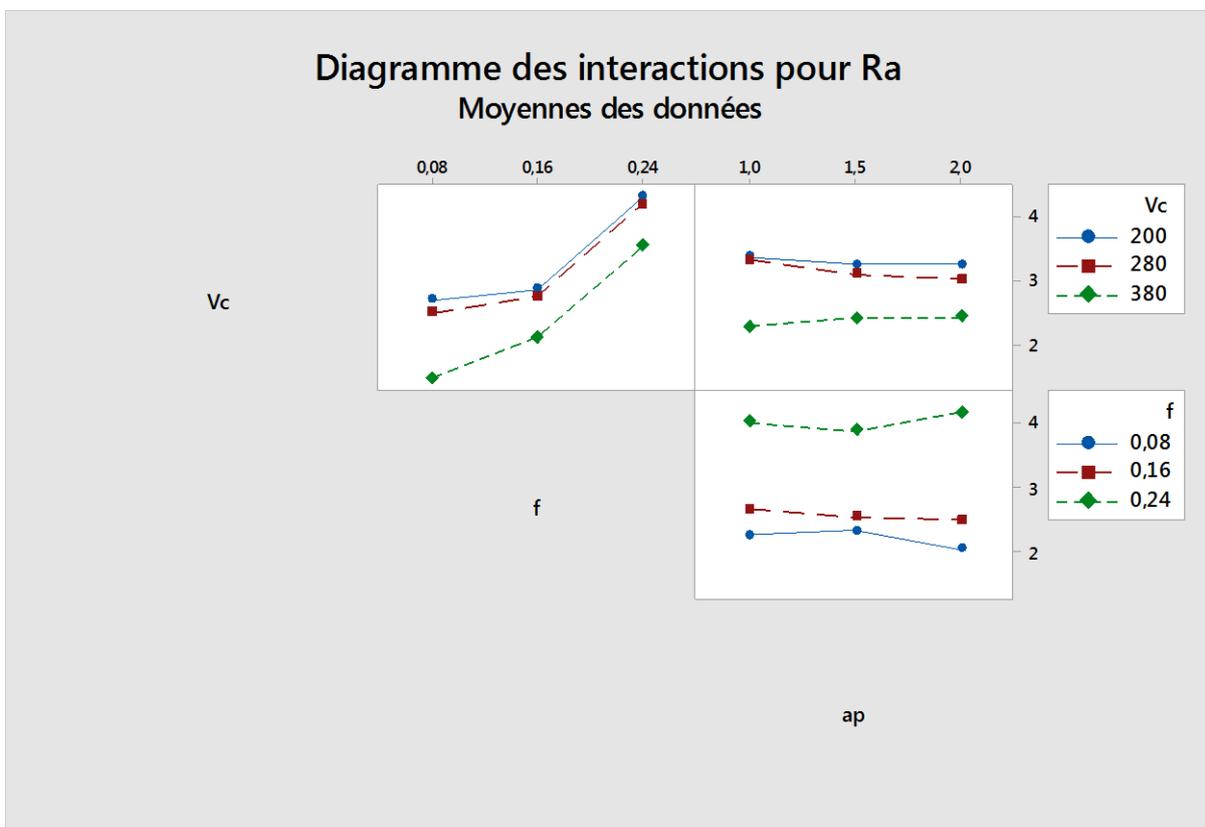


Figure III.2: Diagramme d'interaction pour (Ra).

III.4.1.3. Equation de régression pour (Ra)

La relation entre la rugosité moyenne arithmétique (Ra) et les variables indépendantes étudiées (Vc, f et ap) ont été exprimées par le modèle mathématique quadratique qui est donné par l'équation (III.7), avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 98,01 \%$).

$$Ra = 4,15 + 0,00906 Vc - 24,07 f - 1,229 ap - 0,000033 Vc*Vc + 85,2 f*f + 0,093 ap*ap + 0,01595 Vc*f + 0,00171 Vc*ap + 2,33 f*ap \quad (III.7)$$

La figure III.3 et figure III.4 montrent la différence entre les valeurs mesurées et prédites de la rugosité de surface (Ra). L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision de modèle trouvé, et affiche aussi également la distribution des erreurs.

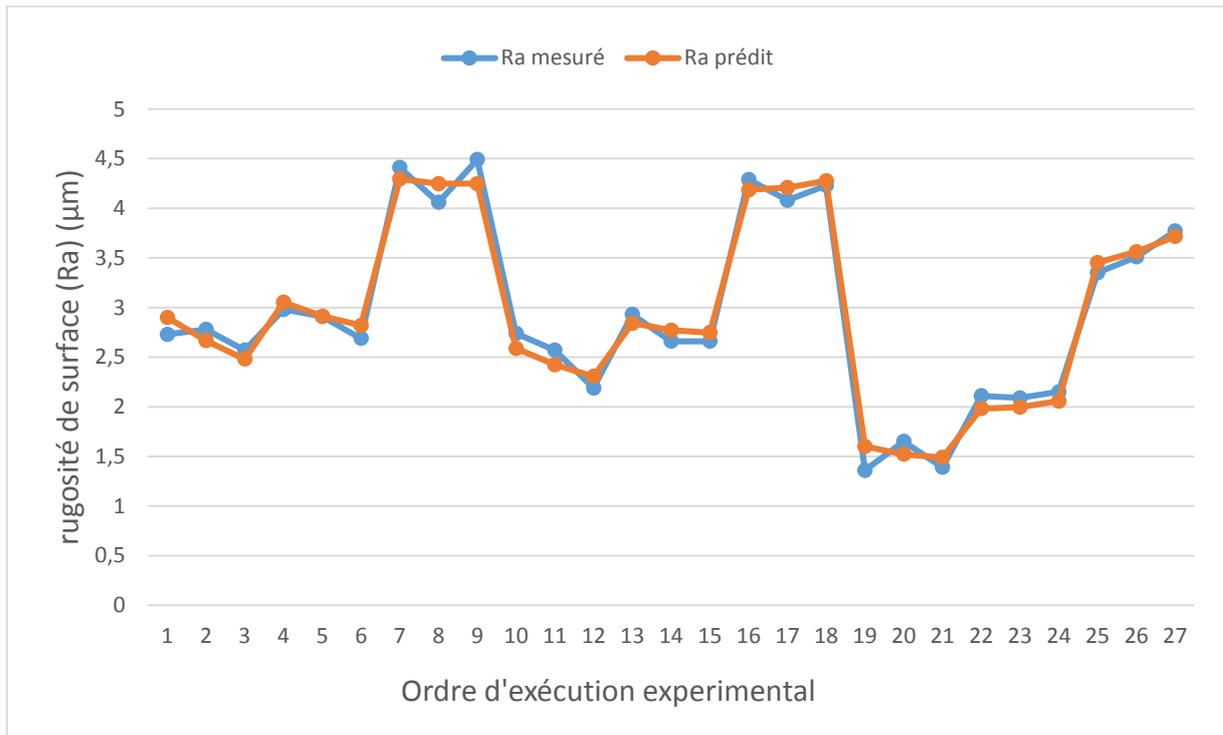


Figure III.3: Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra).

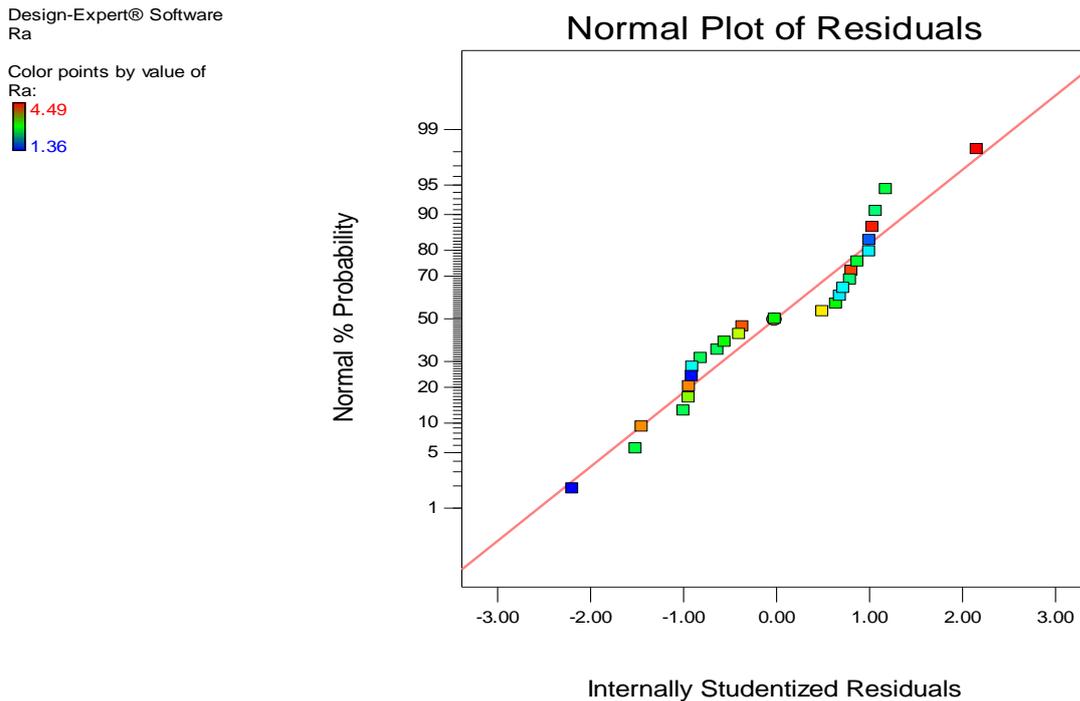


Figure III.4: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour (Ra).

III.4.1.4. Diagramme de surface 3D et graphique de contour (Ra)

Le graphe de surface de réponse **figure III.5** représente les résultats de la surface de réponse (3D) de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres du régime de coupe. L'analyse de la **figure III.5.a** montré que la pente de la vitesse d'avance (f) est importante, donc ce facteur (f) possède l'effet le plus significatif sur la rugosité (Ra), avec son augmentation la rugosité (Ra) augmente. Par contre la **figure III.5.b** montre que l'augmentation de (Vc) induit une diminution moins importante de (Ra), on remarque aussi une légère augmentation de (Ra) en fonction de (ap) dans la **figure III.5.c**.

Il est clair que l'avance par tour (f) est le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface (Ra) suivie par la vitesse de coupe (Vc), alors que la profondeur de passe (ap) n'est pas d'influence significative sur (Ra). L'influence dominante de l'avance est expliquée par la cinématique de coupe, où des sillons hélicoïdaux sont formés mouvement hélicoïdal du bec de l'outil par rapport à la pièce. Ces sillons sont d'autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée. On remarque que la vitesse de coupe (Vc) possède une influence moins importante que l'avance (f) sur la rugosité de surface (Ra), les résultats obtenus montrent que l'état de surface s'améliore lorsque la vitesse de coupe augmente. En raison de l'augmentation de La longueur de contact entre l'outil et la pièce, la profondeur de coupe (ap) n'a pas d'influence significative sur la rugosité (Ra).

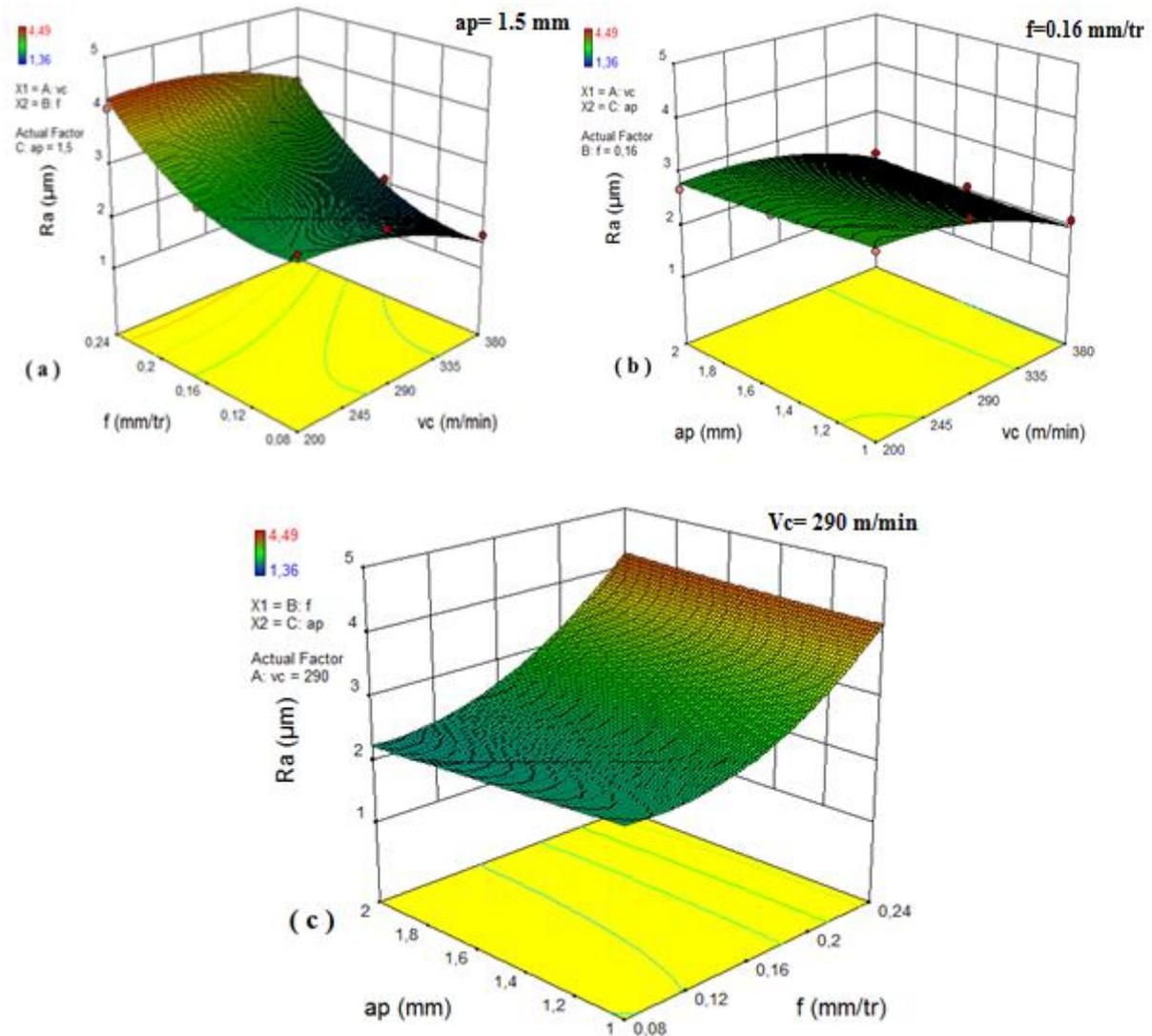


Figure III.5: Diagrammes (3D) de la rugosité (R_a) en fonction de V_c , f et ap .

Les graphes de contour dans la figure III.6 permettent de visualiser la surface de réponse (R_a), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas R_a) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

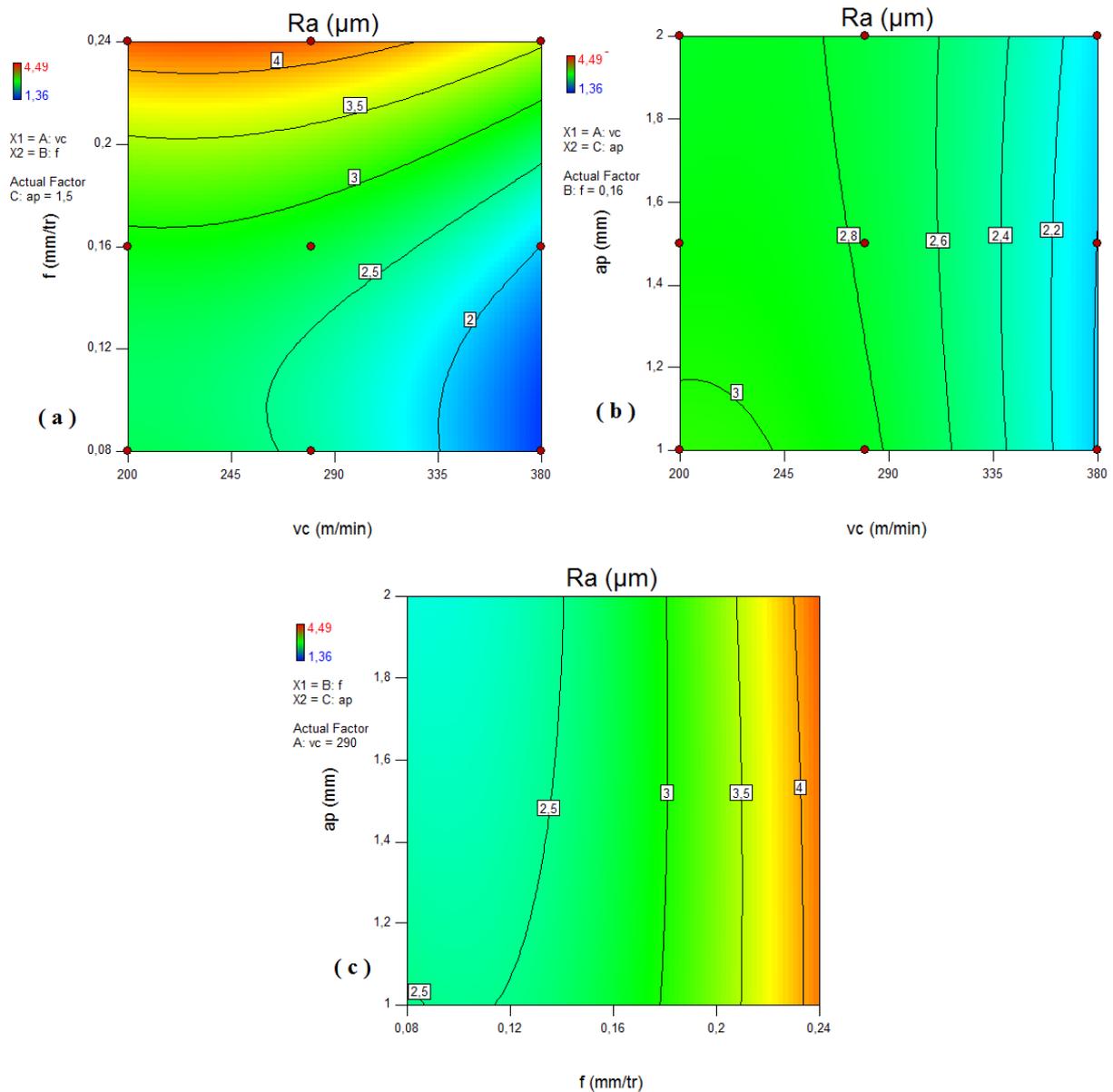


Figure III.6: Graphique de Contour de (Ra) en fonction de Vc , f , ap .

III.4.2. Analyse des résultats du débit de copeau enlevé (MRR)

III.4.2.1. Analyse de variance ANOVA pour (MRR)

Le tableau III.3 illustre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour le débit de copeau enlevé (MRR). L'analyse du tableau montre que l'avance (f) c'est le premier facteur qui affecte le débit de copeau (MRR) avec pourcentage de contribution 49,64% puis la profondeur de passe (ap) de 22,06% suivie par la vitesse de coupe (Vc) de 19,65%. Les interactions ($Vc*f$, $Vc*ap$ et $f*ap$) ont des contributions de (3,28%, 1,46% et 3,68%) respectivement. Le reste des facteurs n'ont pas d'effet significatif sur le débit de copeau (MRR).

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

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM Ajust	Valeur F	p-value Prob> F	Contribution	Remarques
Modèle	9	42807,9	42807,9	4756,4	776,70	<0,001	99,76%	<i>Signifiant</i>
Linéaires	3	39200,0	39820,7	13273,6	2167,50	<0,001	91,35%	<i>Signifiant</i>
Vc	1	8432,6	8398,1	8398,1	1371,36	<0,001	19,65%	<i>Signifiant</i>
f	1	21300,5	21754,1	21754,1	3552,32	<0,001	49,64%	<i>Signifiant</i>
ap	1	9466,9	9668,5	9668,5	1578,81	<0,001	22,06%	<i>Signifiant</i>
Carré	3	0,0	0,0	0,0	0,00	1,000	0,00%	<i>Non signifiant</i>
Vc*Vc	1	0,0	0,0	0,0	0,00	1,000	0,00%	<i>Non signifiant</i>
f*f	1	0,0	0,0	0,0	0,00	1,000	0,00%	<i>Non signifiant</i>
ap*ap	1	0,0	0,0	0,0	0,00	1,000	0,00%	<i>Non signifiant</i>
Interaction à 2 facteurs	3	3607,9	3607,9	1202,6	196,38	<0,001	8,41%	<i>Signifiant</i>
Vc*f	1	1405,4	1405,4	1405,4	229,50	<0,001	3,28%	<i>Signifiant</i>
Vc*ap	1	624,6	624,6	624,6	102,00	<0,001	1,46%	<i>Signifiant</i>
f*ap	1	1577,8	1577,8	1577,8	257,65	<0,001	3,68%	<i>Signifiant</i>
Erreur	17	104,1	104,1	6,1			0,24%	
Total	26	42912,0					100,00%	

III.4.2.2. Graphique des effets moyens et diagramme d'interaction pour MRR

La figure III.7 expose les graphiques des effets principaux pour le débit du copeau enlevé (MRR) en fonction de conditions de coupe (V_c , f , ap), l'analyse des graphes montre que l'avance (f) a la plus grande influence, suivie par la profondeur de passe (ap) puis la vitesse de coupe (V_c).

La figure III.8 expose le diagramme des interactions des paramètres du régime de coupe pour la quantité du copeau enlevé. Cette dernière ne montre aucun croisement entre les courbes des trois variables, mais une tendance de chevauchement entre (V_c*f) et (V_c*ap) et particulièrement entre ($f*ap$). Donc ces interactions sont toutes significatives avec des faibles contributions qui sont successivement (3,28 ; 1,46 et 3,68) %.

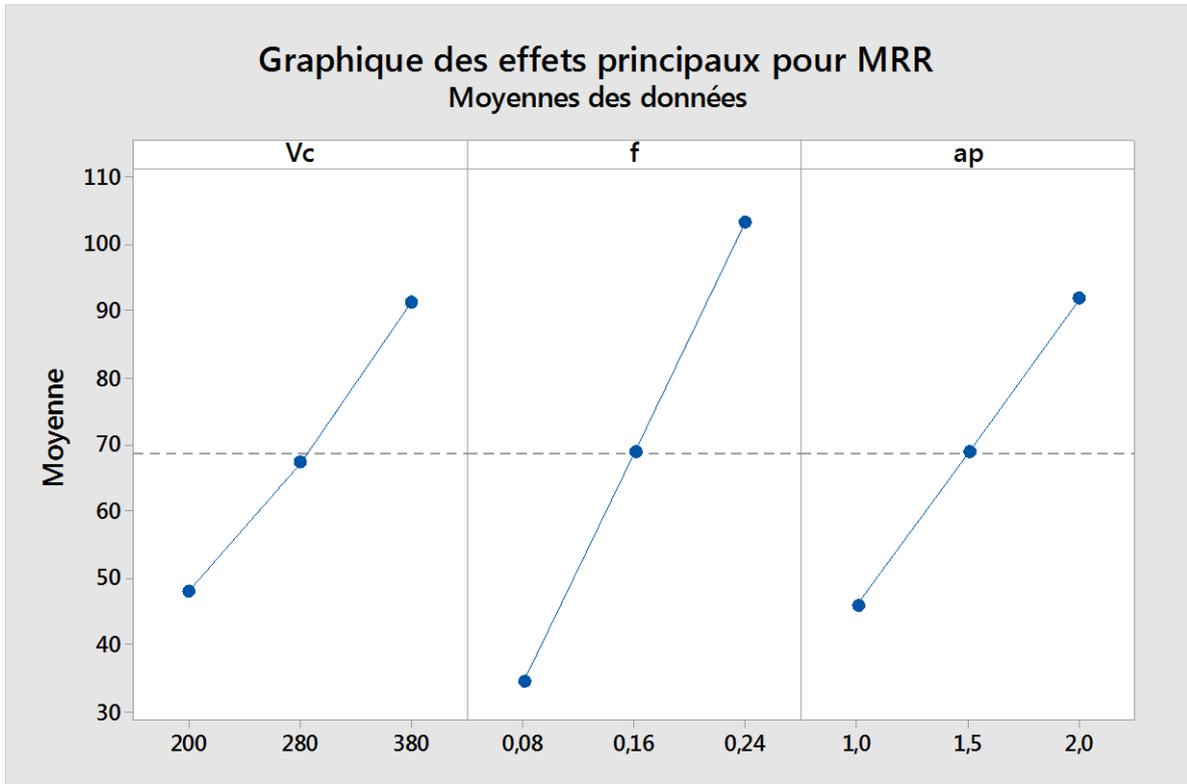


Figure III.7: Graphique des effets principaux pour le débit du copeau enlevé.

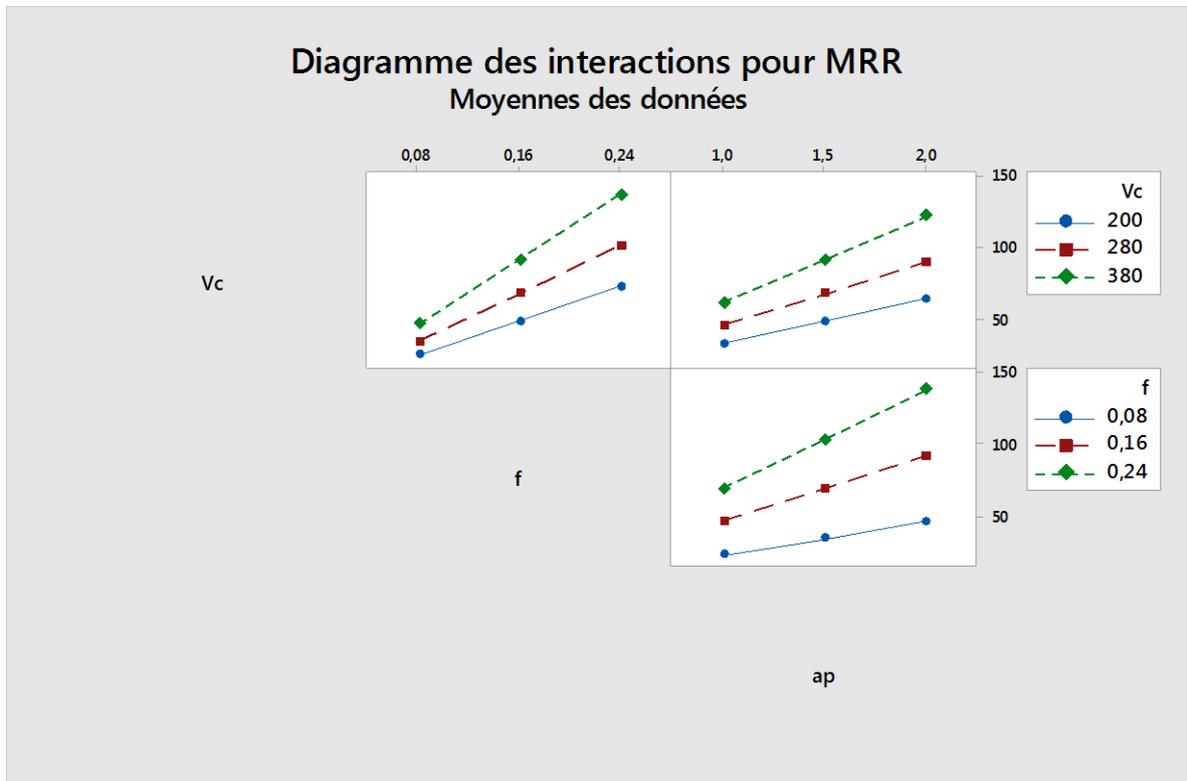


Figure III.8: Diagramme d'interaction pour le débit du copeau enlevé.

III.4.2.3. Equation de régression pour la quantité du copeau enlevé (MRR)

L'équation de régression obtenue et donnée ci-dessous par l'équation (III.8) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 99,76\%$.

$$\begin{aligned} \text{MRR} = & 68,8 - 0,2400 V_c - 430,0 f - 45,9 a_p + 0,000000 V_c * V_c - 0 f * f \\ & - 0,00 a_p * a_p + 1,5000 V_c * f + 0,1600 V_c * a_p + 286,7 f * a_p \end{aligned} \quad \text{(III.8)}$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour le débit de copeau (MRR) est présentée dans la figure III.9. L'analyse des figures montre une excellente corrélation entre les deux courbes avec $R^2 = 99,76\%$.

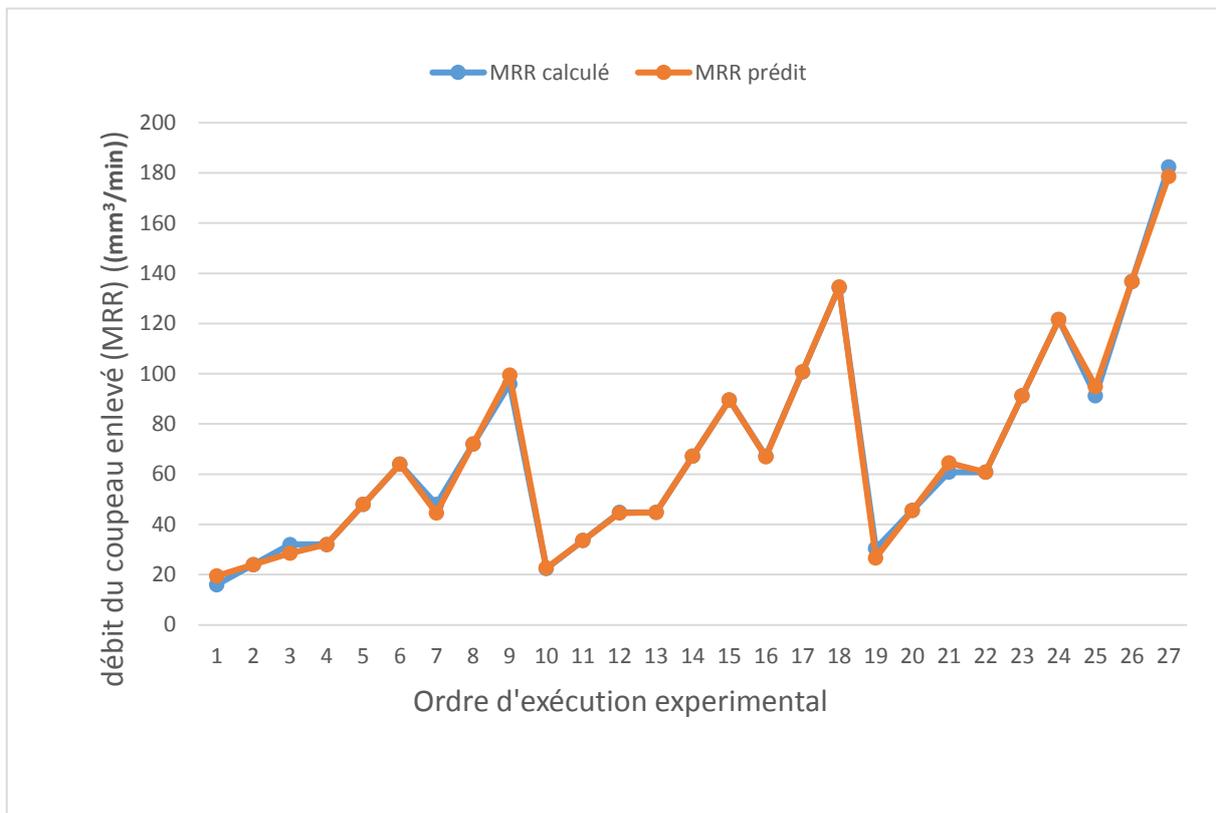


Figure III.9: Comparaison entre les valeurs calculées et prédites du MRR.

La figure III.10 montre une comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du débit du copeau enlevé (MRR). L'analyse des résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, puisque les différents points sont presque alignés sur la droite à 45°, cela montre la précision du modèle trouvé, et affiche aussi également la distribution des erreurs.

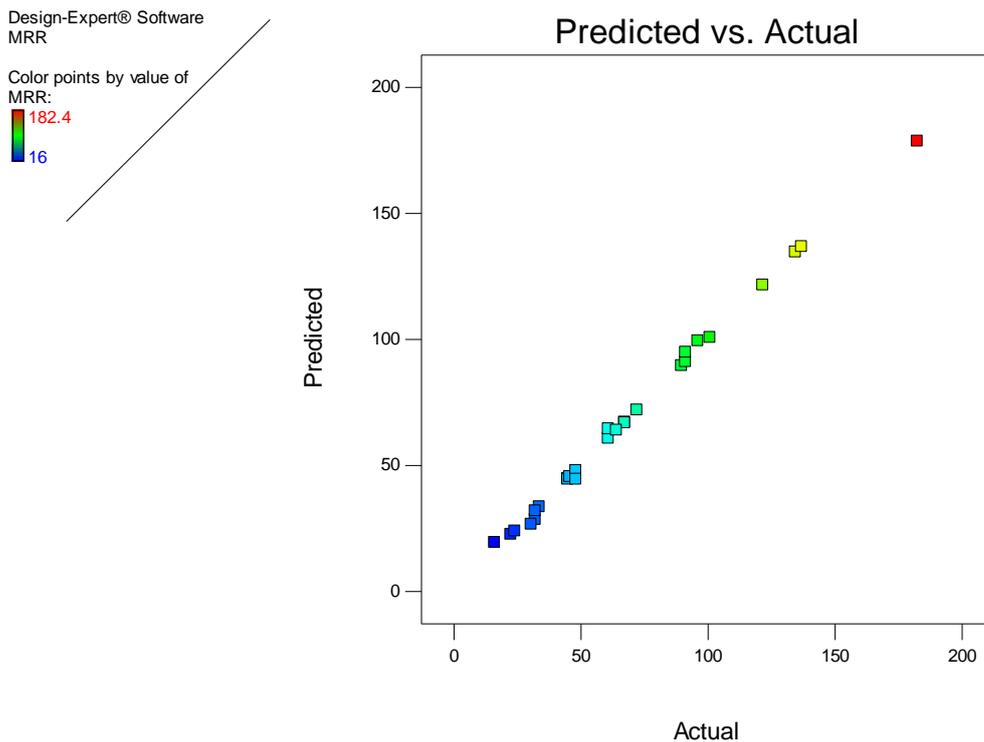


Figure III.10: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour MRR.

III.4.2.4. Diagramme de surface 3D et graphique de contour pour (MRR)

La figure III.11 représente les graphes de surface de réponse 3D de (MRR) en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et ap). On peut observer d'une manière générale que le (MRR) croît avec l'augmentation des trois paramètres de coupe. Il convient de noter que le taux maximal d'enlèvement du matériau s'est produit pour la combinaison des trois valeurs les plus élevées des paramètres de coupe (V_c , f et ap). Dans la figure III.11.a on remarque que la pente de l'avance (f) est importante, donc ce facteur (f) possède l'effet le plus significatif sur le débit de copeau (MRR), avec son augmentation la quantité du copeau enlevé augmente énormément. La figure III.11.b montre que l'augmentation de (MRR) est influencée beaucoup plus par l'augmentation de (ap) qu'avec l'augmentation de (V_c). On remarque nettement dans la figure III.11.c que (f) et (ap) ont tous les deux un grand impact sur (MRR), leurs augmentations engendrent une augmentation assez nette du (MRR).

Il est clair que tous les facteurs sont influents sur le débit du copeau enlevé (MRR) tel que la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap). D'une manière générale le (MRR) croît avec l'augmentation de ces trois paramètres de coupe. C'est logique parce que le débit de copeau enlevé (MRR) est directement lié à la vitesse de coupe, à l'avance et à la profondeur de passe par la formule (II.3), plus les paramètres de coupe (V_c , f et ap) augmentent, plus le débit de copeau enlevé (MRR) augmente.

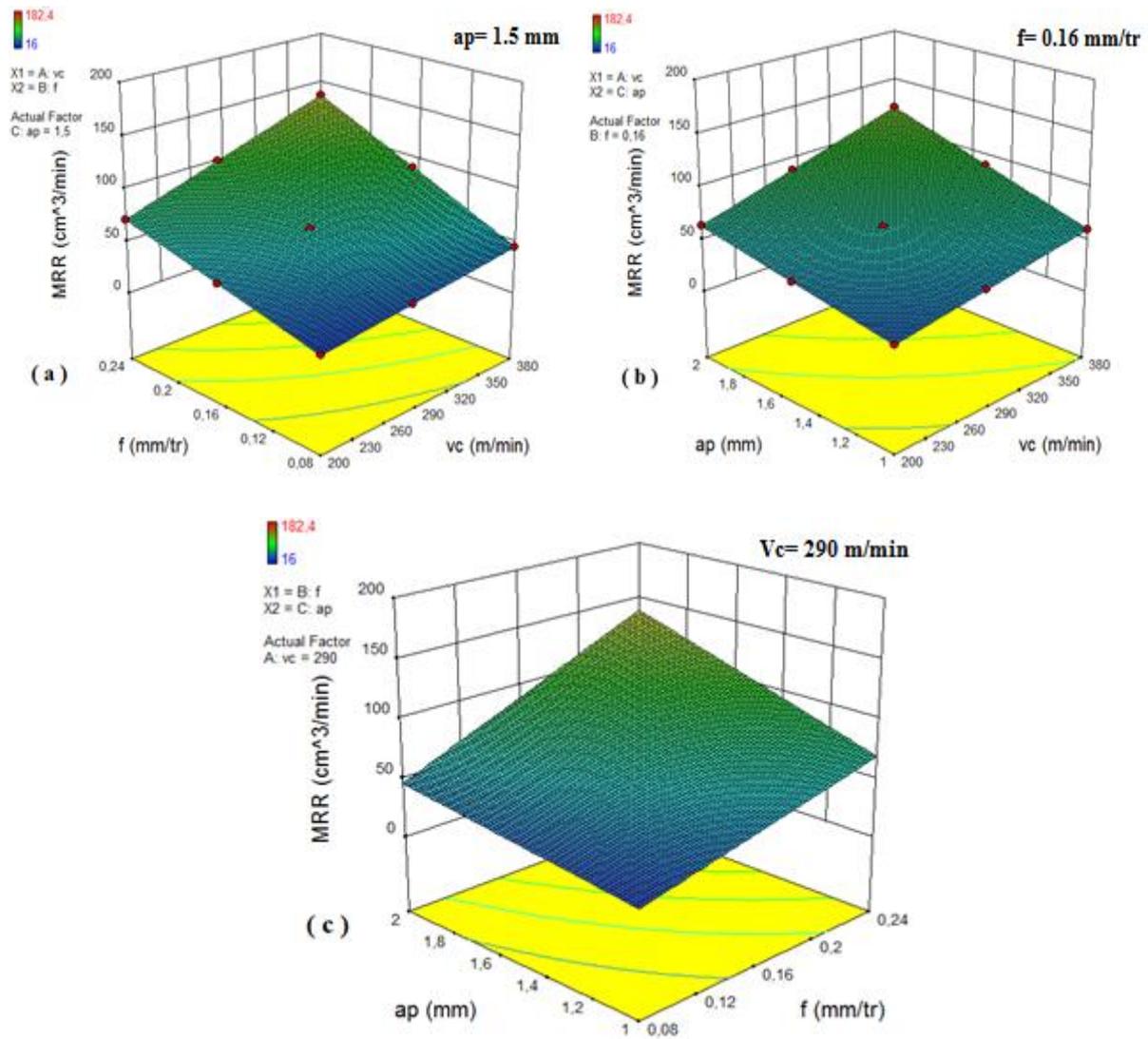


Figure III.11: Diagrammes de surfaces de (MRR) en fonction de (Vc, f et ap).

Les graphes de contour dans la figure III.12 permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre la réponse (MRR) et les trois facteurs à partir du modèle. Le maximum de la quantité de copeaux enlevé est obtenu avec les valeurs élevées des trois facteurs, en particulier avec (f) et (ap) (figure III.12.c).

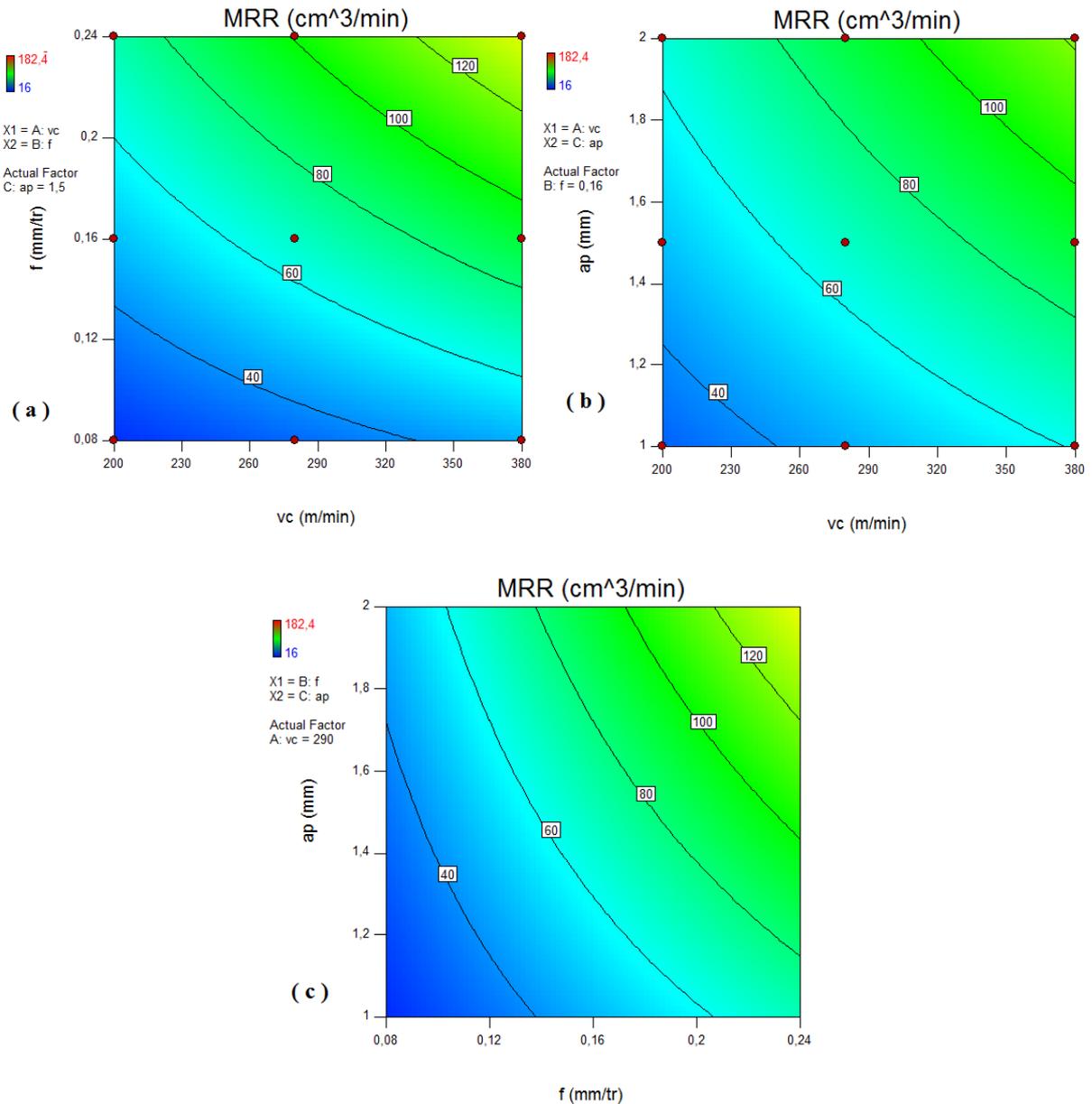


Figure III.12: Graphique de Contour de (MRR) en fonction de Vc , f et ap .

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté dans la première partie les résultats des essais paramétriques lors du tournage du PA6 avec un outil de coupe en carbure. Ces résultats montrent que l'effet de l'avance (f) est le plus significatif sur l'état de surface usinée, suivi par la vitesse de coupe. La profondeur de passe n'a pas d'influence sur les critères de la rugosité de surface. D'autre part, l'augmentation des paramètres d'usinage tel que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe fait augmenter le débit de copeau enlevé.

La deuxième partie est dédiée à l'application de l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression, cela a permis d'obtenir des modèles mathématiques de la rugosité de surface arithmétique (R_a) et le débit du copeau enlevé (MRR) en fonction des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p).

Les modèles obtenus seront utilisés au *chapitre IV* pour l'optimisation multi-objective qui contient la rugosité minimale, la productivité maximale et compromis entre rugosité et productivité simultanément.

Chapitre IV

*Optimisation par La Méthode
de Taguchi, L'analyse
Relationnelle Grise et La
Fonction Désirabilité*

IV.1. Introduction

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques, tels que les méthodes, Taguchi, GRA, GA, PSO, DF, etc.... [48-49]. L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées d'une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct sur le temps machine ou le coût total d'opération. Les paramètres de coupe pris en compte lors de cette étude sont les suivants : (V_c , f , a_p) car les paramètres technologiques étudiés sont : (R_a , MRR). Dans ce chapitre, nous appliquons deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objectif, en utilisant la méthode de Taguchi et l'optimisation multi-objectif, en utilisant deux méthodes ; l'analyse relationnelle grise (GRA) et la fonction de désirabilité (DF). Le régime optimal a été déterminé pour chacun des paramètres technologiques d'usinage (rugosité de surface, débit de copeau enlevé).

IV.2. Optimisation mono-objectif par la méthode de Taguchi

IV.2.1. La méthode de Taguchi

La méthode de taguchi est une puissante technique de résolution des problèmes d'optimisation complexes (paramètres) pour améliorer les performances et la productivité des processus pendant la production du produit, par la mise en œuvre de la planification des expériences, qui sont basées sur l'utilisation des tableaux orthogonaux proposés par Taguchi. Le but est de minimiser le nombre d'essais et de se concentrer seulement sur les expériences essentielles pour l'analyse, ce qui permet de gagner du temps et de réduire les coûts [50]. L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit (S/B). Le signal représente la variable principale à l'entrée du procédé et le bruit représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie [51]. Le rapport (S/B) mesure les caractéristiques de qualité provenant des valeurs désirées. L'intérêt de la conception de Taguchi est que de multiples facteurs peuvent être considérés à la fois. Dans cette étude, La plus faible rugosité de surface (R_a) et le débit de copeau enlevé le plus élevée (MRR) d'autre part sont souhaitables. La caractéristique (S/B) la plus petite est la meilleure (smaller-the-better) a été utilisé pour la rugosité de surface (R_a) et la plus grande est la meilleure (larger-the-better) a été utilisé pour le débit du copeau enlevé (MRR).

IV.2.1.1. La démarche de la méthode de Taguchi

La démarche de la méthode de Taguchi se présente par six étapes [52] :

- ✓ **Etape 1** : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.
- ✓ **Etape 2** : sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif. Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.

- ✓ **Etape 3** : construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans que l'effet influe sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais.
- ✓ **Etape 4** : réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignnant les réponses dans un tableau.
- ✓ **Etape 5** : Calculer le rapport S/B et analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).
- ✓ **Etape 6** : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus, sélectionnez les niveaux optimaux des paramètres du procédé et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.).

IV.2.1.2. Apport de la méthode Taguchi

✓ Le ratio signal / bruit

La méthode Taguchi permet de convertir les valeurs de la fonction objective en rapport S/B pour mesurer les caractéristiques de performance des facteurs de contrôle. Le premier terme de ce rapport (signal), représente la variable principale à l'entrée du procédé et le second terme (bruit), représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie [53-54].

Les caractéristiques de qualité S/B, la plus petite est mieux et la plus grande est mieux sont calculées avec les équations suivantes [55-56] :

➤ **Le plus petit est le meilleur (Nominal - the - best) :**

$$\frac{S}{B} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i^2) \right] \quad (\text{IV.1})$$

Où :

n = nombre de mesures effectuées.

y_i = valeur mesurée de la réponse, Avec : i = 1, 2, ... n.

Il est appliqué dans le cas où la minimisation des critères est demandée.

➤ **Le plus grand est le meilleur (Larger - the - better) :**

$$\frac{S}{B} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (\text{IV.2})$$

Ce type est appliqué dans le cas où la maximisation des critères est demandée.

IV.2.2. Résultats et Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

Après la fabrication des pièces avec une haute qualité, une productivité maximale, un coût minimum et dans un temps court sont recherchés. Le but de notre travail est l'optimisation de la rugosité de surface (Ra) et le débit de copeau enlevé (MRR), qui résultent lors de l'usinage à sec du polyamide PA6, en fonction de la variation des paramètres de régime de coupe (Vc , f , ap). La table orthogonale de Taguchi L27 (3^3) a été utilisée (**tableau IV.1**). Le débit de copeau (MRR) est calculé par la formule suivante :

$$MRR (cm^3/min) = Vc \times f \times ap \quad (IV.3)$$

Tableau IV.1: Résultats expérimentaux et S/B pour (Ra) et (MRR).

N° d'essais	Vc ; (m/min)	f ; (mm/tr)	ap ; (mm)	Ra ; (μ m)	MRR ; (cm ³ /min)	S/B (Ra)	S/B (MRR)
1	200	0,08	1	2,73	16	-8,72325294	24,0823997
2	200	0,08	1,5	2,78	24	-8,88089592	27,6042248
3	200	0,08	2	2,57	32	-8,19866247	30,1029996
4	200	0,16	1	2,98	32	-9,48432528	30,1029996
5	200	0,16	1,5	2,91	48	-9,27785978	33,6248247
6	200	0,16	2	2,69	64	-8,5950456	36,1235995
7	200	0,24	1	4,41	48	-12,8887718	33,6248247
8	200	0,24	1,5	4,06	72	-12,1705207	37,1466499
9	200	0,24	2	4,49	96	-13,0449268	39,6454247
10	280	0,08	1	2,74	22,4	-8,75501126	27,0049604
11	280	0,08	1,5	2,57	33,6	-8,19866247	30,5267855
12	280	0,08	2	2,19	44,8	-6,8088823	33,0255603
13	280	0,16	1	2,93	44,8	-9,33735241	33,0255603
14	280	0,16	1,5	2,66	67,2	-8,49763273	36,5473855
15	280	0,16	2	2,66	89,6	-8,49763273	39,0461602
16	280	0,24	1	4,29	67,2	-12,6491458	36,5473855
17	280	0,24	1,5	4,08	100,8	-12,2132033	40,0692106
18	280	0,24	2	4,23	134,4	-12,5268073	42,5679854
19	380	0,08	1	1,36	30,4	-2,67077817	29,6574717
20	380	0,08	1,5	1,65	45,6	-4,34967888	33,1792969
21	380	0,08	2	1,39	60,8	-2,86029601	35,6780716
22	380	0,16	1	2,11	60,8	-6,48564911	35,6780716
23	380	0,16	1,5	2,09	91,2	-6,40292572	39,1998968
24	380	0,16	2	2,15	121,6	-6,6487692	41,6986715
25	380	0,24	1	3,35	91,2	-10,5008961	39,1998968
26	380	0,24	1,5	3,51	136,8	-10,9061423	42,7217219
27	380	0,24	2	3,77	182,4	-11,526827	45,2204967

L'analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios (S/B) des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des trois paramètres d'usinage (V_c , f , ap). La moyenne des ratios (S/B) pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios (S/B) pour le même niveau du facteur divisé par le nombre des ratios pour le niveau du facteur. Les valeurs relatives du rapport (S/B) les plus grandes permettront d'identifier le ou les designs optimaux. On peut estimer l'effet de chaque facteur sur le rapport (S/B) en effectuant une analyse de la variance. On peut donc ainsi identifier les facteurs de design les plus importants. De plus on peut déterminer la modalité optimale de chaque facteur [57].

IV.2.2.1. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (R_a)

D'après la figure IV.1 et le tableau IV.2. On observe que les paramètres d'usinage (V_c , f , ap) présentent des effets différents sur la rugosité de surface (R_a). L'influence la plus significative correspond à l'avance (f) avec un effet de 5,442 suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec un effet de 3,212 et en dernier lieu vient la profondeur de passe (ap) avec 0,310 d'effet.

Tableau IV.2: Moyenne des ratios S/B(R_a) pour chaque niveau des facteurs.

Préférer plus petit

Niveau	V_c	f	ap
1	-10,140	-6,605	-9,055
2	-9,720	-8,136	-8,989
3	-6,928	-12,047	-8,745
Delta	3,212	5,442	0,310
Rang	2	1	3

Selon l'approche de Taguchi, les conditions optimales pour une rugosité de surface (R_a) minimale sont données par la combinaison des niveaux (V_{c3} , f_1 , ap_3). Ceci implique que pour réduire la rugosité de surface (R_a). Les valeurs du régime optimal sont les suivantes : une avance $f=0,08$ (mm/tr) qui ayant la plus importante influence, suivie par une vitesse de coupe $V_c=380$ (m/min), et en dernier lieu vient une profondeur de passe $ap=2$ (mm). Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence dans des cercles (figure IV.1).

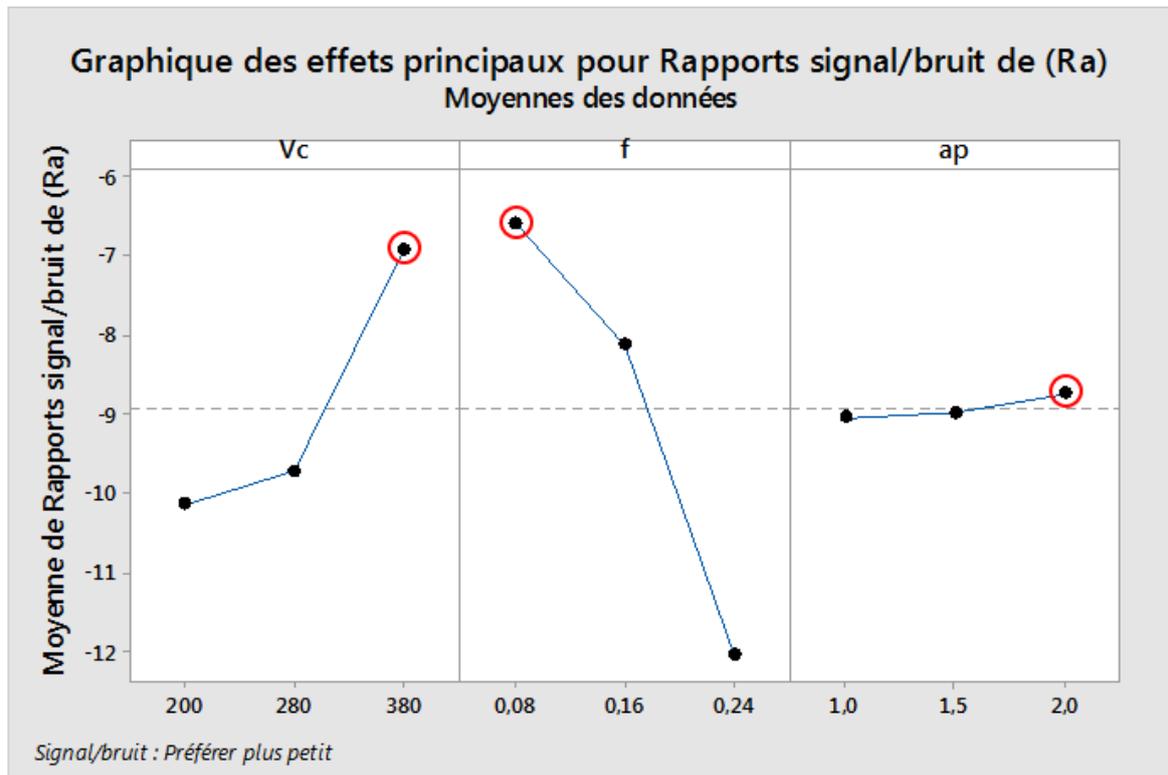


Figure IV.1: Graphique des effets principaux de Vc, f et ap sur (Ra).

IV.2.2.2. Analyse des effets principaux sur la quantité de copeau enlevé (MRR)

La figure IV.2 et le tableau IV.3 présente les différents effets des paramètres de coupe (V_c , f , ap) sur le débit de copeau enlevé (MRR). La plus importante influence correspond à l'avance (f) avec un effet de 9,54 suivie par la profondeur de passe (ap) avec un effet de 6,02 et en dernier lieu vient la vitesse de coupe (V_c) avec 5,58 d'effet.

Tableau IV.3: Moyenne des ratios S/B_(MRR) pour chaque niveau des facteurs.

Préférer plus grand

Niveau	Vc	f	ap
1	32,45	30,10	32,10
2	35,37	36,12	35,62
3	38,03	39,64	38,12
Delta	5,58	9,54	6,02
Rang	3	1	2

Selon l'approche de Taguchi, les conditions optimales pour un débit de copeau enlevé (MRR) maximal sont données par la combinaison des niveaux (Vc3, f3, ap3). Il est recommandé d'utiliser la plus grande vitesse de coupe, la plus grande avance et aussi la grande profondeur de passe (380 m/min, 0,24 mm/tr, 2 mm) respectivement. Les paramètres du régime de coupe optimaux pour maximiser le débit de copeau enlevé (MRR) ont été signalés avec des cercles (**figure IV.2**).

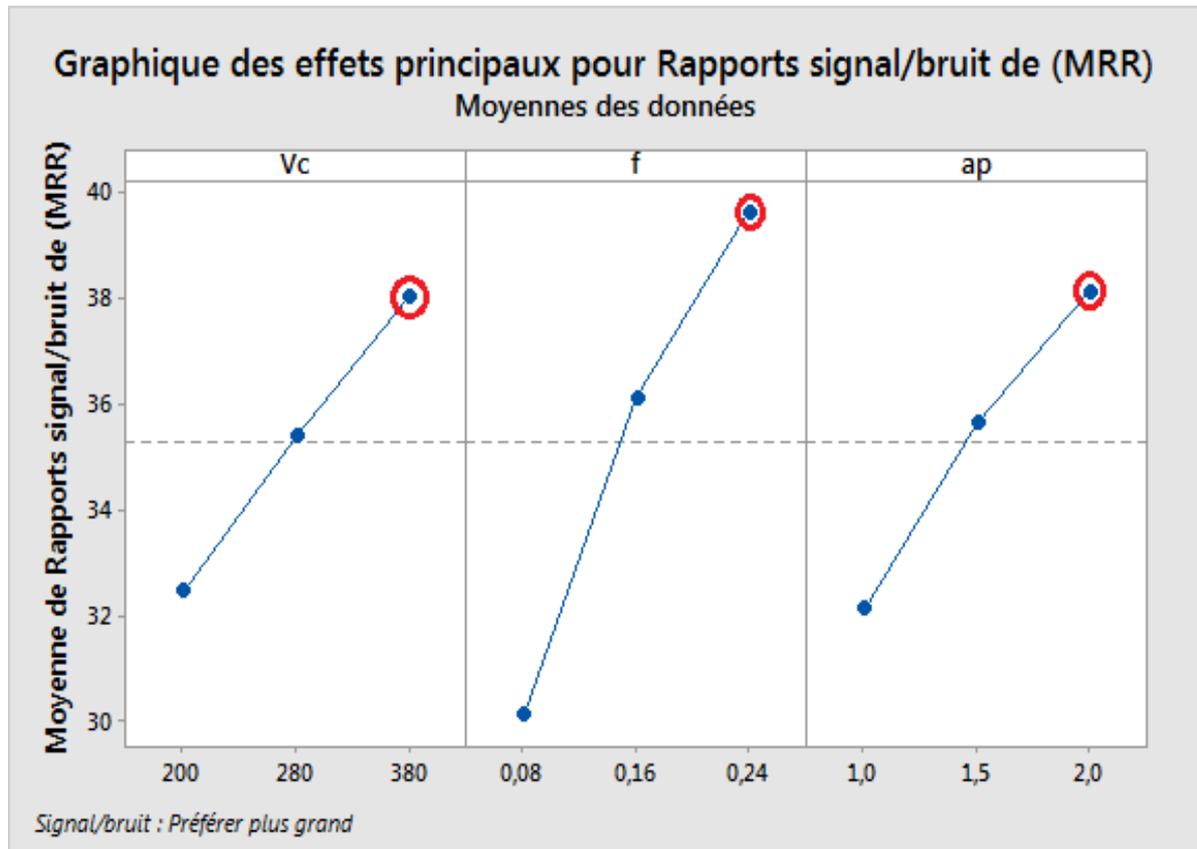


Figure IV.2: Graphique des effets principaux de Vc, f et ap sur (MRR).

IV.3. Optimisation multi-objectif par la méthode d'Analyse Relationnelle Grise

L'analyse relationnelle grise (GRA) est une technique proposée pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant le multi-objectif en un objectif unique dans le but d'atteindre une combinaison optimale de niveaux de paramètres pour l'amélioration simultanée de multiples caractéristiques d'usinage [58]. Le but de la méthode d'analyse relationnelle grise est de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui nous permet de minimiser la rugosité de surface (Ra) et maximiser le débit du copeau enlevé (MRR) simultanément.

Les étapes suivantes sont considérées pour l'Analyse Relationnelle Gris (GRA) :

IV.3.1. 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 de l'optimisation [56].

- ✓ Pour la minimisation du critère (rugosité de surface Ra), la séquence originale est normalisée comme suit :

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

- ✓ 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 $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse.
- ✓ $\min(x_i^0(k))$ la plus petite valeur de $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse [52].

Le but de la normalisation est rendre toutes les réponses en même grandeur, les données traitées par la normalisation sont données dans **le tableau IV.4**. Les valeurs normalisées ont été arrangés entre zéro et un.

Tableau IV.4: Résultats expérimentale normalisé ($x_i^0(k)$).

N° Essai. (i)	La Normalisation	
	Ra	MRR
Valeur Idéal	1	1
1	0,562	0
2	0,546	0,048
3	0,613	0,096
4	0,482	0,096
5	0,505	0,192
6	0,575	0,288
7	0,026	0,192
8	0,137	0,337
9	0	0,481
10	0,559	0,038
11	0,613	0,106
12	0,735	0,173
13	0,498	0,173
14	0,585	0,308
15	0,585	0,442
16	0,064	0,308
17	0,131	0,510
18	0,083	0,711
19	1	0,087
20	0,907	0,178
21	0,990	0,269
22	0,760	0,269
23	0,767	0,452
24	0,748	0,635
25	0,364	0,452
26	0,313	0,726
27	0,230	1

IV.3.2. Calcul des coefficients du Relationnel Gris (GRC)

Le coefficient relationnel gris décrit la corrélation entre les résultats expérimentaux idéaux et obtenus. La formule mathématique du coefficient relationnel gris ($\xi_i(k)$) est donnée comme suit [56] :

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \Psi \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \Psi \Delta_{max}} \quad 0 < \xi_i(k) \leq 1 \quad (IV.6)$$

Où :

$\Delta_{0i}(k)$: 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 Δ_{0i} (κ) coefficient de distinction (sa valeur entre 0 à 1).

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

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

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

La valeur de ψ est en générale égale à (0,5) [59].

La valeur du coefficient ψ a été prise (0,5). Les valeurs des coefficients "Gris relationnel Coefficients" est présenté dans **le tableau IV.5**.

Tableau IV.5: Coefficients du GR (ξ_i (k)).

<i>N:• Essai (i)</i>	<i>Ra</i>	<i>MRR</i>
1	0,533	0,333
2	0,524	0,344
3	0,564	0,356
4	0,491	0,356
5	0,502	0,382
6	0,541	0,413
7	0,340	0,382
8	0,367	0,430
9	0,333	0,491
10	0,531	0,342
11	0,564	0,359
12	0,653	0,377
13	0,500	0,377
14	0,546	0,419
15	0,546	0,473
16	0,348	0,419
17	0,365	0,505
18	0,353	0,634
19	1	0,354
20	0,844	0,378
21	0,981	0,406
22	0,676	0,406
23	0,682	0,477
24	0,665	0,578
25	0,440	0,477
26	0,421	0,646
27	0,394	1

IV.3.3. Calcul du GRG (Grey relational grade)

GRG représente la corrélation entre les séries, elle est donnée par la formule suivante :

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (IV.10)$$

Où : n est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas n=2).

Après le calcul du GRG, la sélection de la combinaison des niveaux optimaux est faite en fonction du tableau (Grey relational grade (GRG)). La plus grande valeur de GRG qui se trouve à proximité de la valeur normalisée idéale correspond à la combinaison optimale. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres du processus est le niveau avec la plus grande valeur GRG

D'après la **figure IV.3** et le **tableau IV.6**, la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 27 a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que cette expérience présente la combinaison des paramètres optimaux qui donne simultanément une rugosité de surface minimale, et un débit de copeau enlevé maximum.

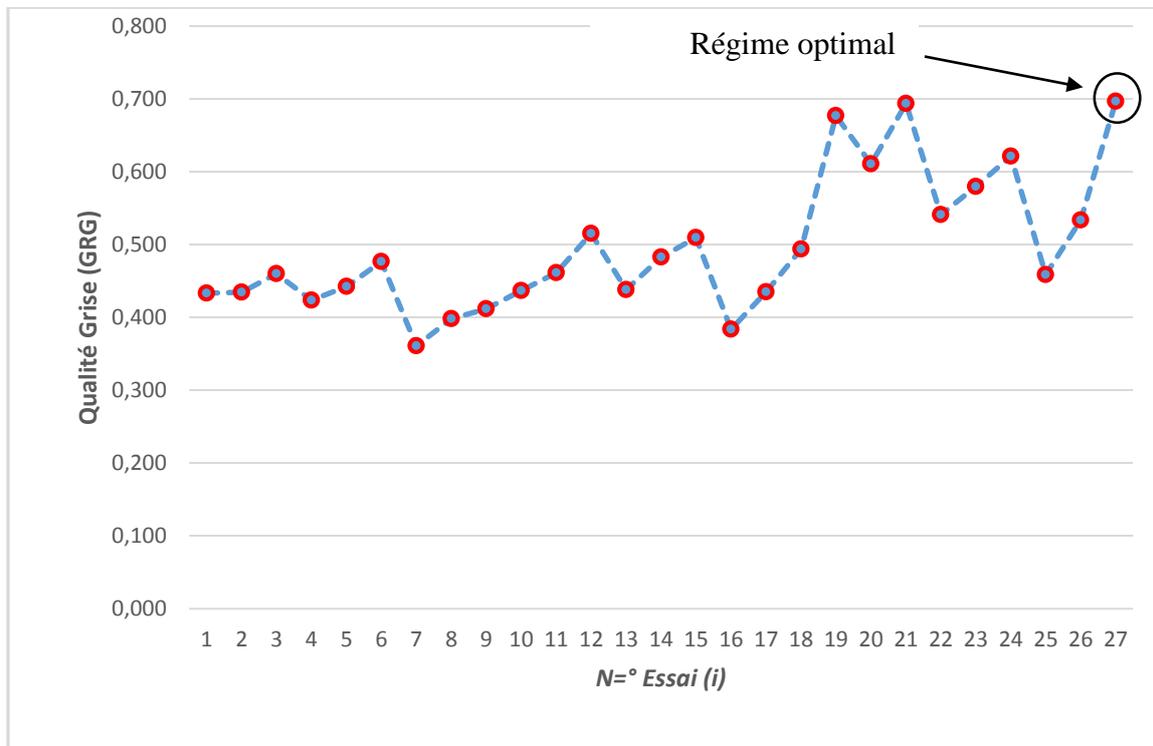


Figure IV.3: Qualité Relationnelle Grise (GRG).

Tableau IV.6: Niveau relationnel gris et son ordre (Grey relational grade (*GRG*)).

<i>N=° Essai. (i)</i>	<i>GRG (α_i)</i>	<i>Ordre</i>
1	0,433	22
2	0,434	21
3	0,460	15
4	0,424	23
5	0,442	17
6	0,477	13
7	0,361	27
8	0,399	25
9	0,412	24
10	0,437	19
11	0,461	14
12	0,515	9
13	0,438	18
14	0,483	12
15	0,509	10
16	0,384	26
17	0,435	20
18	0,494	11
19	0,677	3
20	0,611	5
21	0,694	2
22	0,541	7
23	0,579	6
24	0,621	4
25	0,459	16
26	0,534	8
27	0,697	1

La différence entre la valeur maximale et la valeur minimale (Delta = Max-Min) de la valeur grise relationnelle est également indiqué dans le **tableau IV.7**. Le facteur ayant la valeur maximale de delta est celui qui affecte le plus les réponses. Le maximum de la valeur de delta dans le tableau est égal à 2.930; et le facteur correspondant, à savoir la vitesse de coupe, a le plus grand effet sur la réduction de la rugosité de surface et sur l'augmentation de débit de copeau enlevé de polyamide PA6 simultanément.

Tableau IV.7: Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade).

Préférer plus grand

Niveau	Vc	f	ap
1	-7,420	-5,753	-6,862
2	-6,746	-6,060	-6,341
3	-4,491	-6,844	-5,454
Delta	2,930	1,092	1,408
Rang	1	3	2

Le niveau correspondant au maximum valeur moyenne de "la qualité relationnelle grise" c'est Le niveau optimal des paramètres, La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage du polyamide PA6 est affiché dans le **tableau IV.8**.

Cette combinaison est :

- ✓ Vitesse de coupe optimale (niveau 3).
- ✓ Avance (niveau 1).
- ✓ Profondeur de passe optimale (niveau 3).

Tableau IV.8: Réponses pour la catégorie relationnelle grise (Grey Grade).

Niveau	Vc	f	ap
1	200	0.08	1
2	280	0.16	1.5
3	380	0.24	2

Donc la combinaison optimale (pour les deux réponses) des paramètres est : Vc3, f1 et ap3. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : vitesse de coupe Vc = 380 (m/min), avance f = 0,08 (mm/tr) et profondeur de passe ap=2(mm).

IV.4. Optimisation multi-objectif par la méthode de la fonction désirabilité (DF)

IV.4.1. Introduction

L'approche de la fonction désirabilité est l'une des méthodes les plus utilisées pour l'optimisation multi-objective des réponses grâce à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques [57]. La désirabilité permet d'évaluer en fonction des réponses calculées par le modèle statistique, l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés.

L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (RSM) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponse. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant de faire un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité « DF » qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire « di » variant entre 0 et 1. Une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, $F(x)$, est définie comme suit [60] :

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (\text{IV.11})$$

$$F(x) = -DF$$

Où :

d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et w_i est la fonction de pondération de d_i . Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité d_i est définie dans différentes formes.

Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de T_i , la désirabilité d_i est :

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad (\text{IV.12})$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \quad (\text{IV.13})$$

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq \text{Sup}_i$$

Pour un objectif de trouver un maximum, la désirabilité est montrée comme suite :

$$d_i = 0 \quad Si \quad Y_i \leq Inf_i$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad Si \quad Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (IV.14)$$

$$d_i = 1 \quad Si \quad Y_i \geq Sup_i$$

Pour un objectif de rechercher un minimum la désirabilité peut être définies par les formules suivantes :

$$d_i = 1 \quad Si \quad Y_i \leq Inf_i$$

$$d_i = \left[\frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad Si \quad Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (IV.15)$$

$$d_i = 0 \quad Si \quad Y_i \geq Sup_i$$

Donc, l'objectif de notre étude est de choisir un réglage optimal qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF, C'est-à-dire minimisé F(x).

Les étapes 1 à 5 de la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour les différents paramètres étudiés ont été exposées dans **le chapitre III**. Dans ce chapitre on s'intéresse seulement à l'étape 6 (Optimisation).

IV.4.2. Les cas d'optimisation étudiés

Dans notre étude, nous avons étudié trois cas d'optimisation qui sont : (1) Rugosité minimale, (2) productivité maximale, (3) compromis entre rugosité et productivité.

Cas 1 : Rugosité minimale

Pour le premier cas d'optimisation, on a donné l'importance maximale à la rugosité de surface (5+), tout en gardant le débit de copeaux enlevé (MRR) à son bas niveau (1+) de même pour les poids on a donné 0.5 à celui qui a plus d'importance et un poids de 0.1 à celui qui a moins d'importance. Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de $V_c=380$ (m/min), $f=0.087$ (mm/tr) et $a_p=1.999$ (mm). La rugosité prend une valeur minimale de $R_a=1.496$ (μm), le $MRR=69.952$ (cm^3/min) et la désirabilité $Des=0.963$. Ce cas est intéressant pour un tournage de finition où la qualité est exigée (rugosité minimale). **Le tableau IV.9** présente le but et la gamme de paramètres pour ce cas d'optimisation. Les réponses de la surface de rugosité et de débit de copaux à enlever s'exprime par **le tableau IV.10**.

Tableau IV.9: But et gamme de paramètres d'optimisation (cas 1).

Constraints						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Vc	is in range	200	380	1	1	3
f	is in range	0,08	0,24	1	1	3
ap	is in range	1	2	1	1	3
Ra	minimize	1,36	4,49	1	0,5	5
MRR	Maximize	16	182,4	0,1	1	1

Tableau IV.10: Réponse de la surface de rugosité et de débit de copaux enlevé (cas1).

Solutions						
Number	Vc	f	ap	Ra	MRR	Desirability
1	<u>380,000</u>	<u>0,087</u>	<u>1,999</u>	<u>1,496</u>	<u>69,952</u>	<u>0,963</u>

La figure IV.4 montre le domaine de la valeur maximale de la désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (Vc, f et ap) pour obtenir une rugosité de surface minimale (meilleure qualité de surface). D'autre part, la figure IV.5 expose les valeurs optimales exactes des paramètres (Vc, f et ap), ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés (Ra et MRR) et la désirabilité pour ce premier cas.

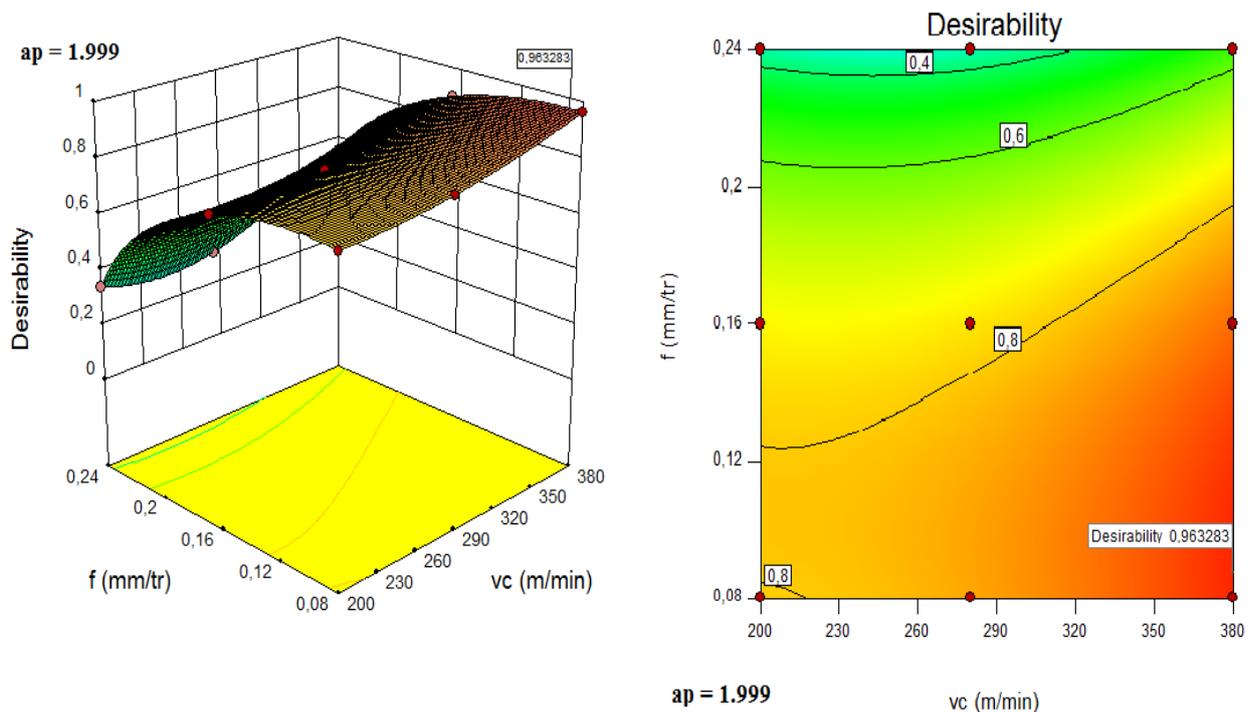


Figure IV.4: Graph de désirabilité de Ra et MRR (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 1^{er} cas.

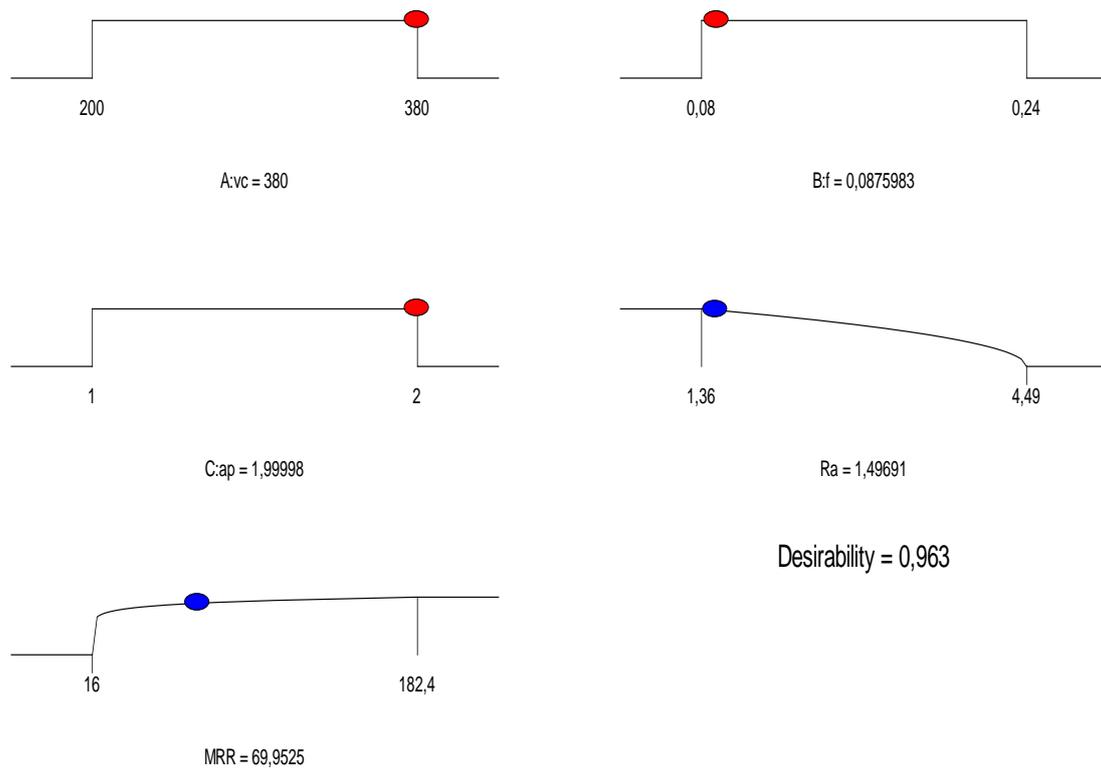


Figure IV.5: Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et le débit du copeau enlevé (MRR) pour le 1^{er} cas.

Cas 2 : productivité maximale

Pour le deuxième cas d'optimisation, on maximise le débit de copeau enlevé (MRR) en lui donnant une importance maximale de (+5) et une faible importance à la rugosité de surface (+1). Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de $V_c=380$ (m/min), $f=0,24$ (mm/tr) et $a_p=2$ (mm). Le débit du copeau enlevé prend une valeur maximale $MRR=178.667$ (cm³/min), $Ra=3,715$ (μm) et la désirabilité $Des=0,968$. Ce cas d'optimisation est préféré pour les opérations d'ébauche où une production maximale est souhaitée. **Le tableau IV.11** présente le but et la gamme de paramètres pour ce cas d'optimisation. Les réponses de la surface de rugosité et de débit de copeaux à enlever s'exprime par **le tableau IV.12**.

Tableau IV.11: But et gamme de paramètres d'optimisation (cas 2).

Constraints						
		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
Vc	is in range	200	380	1	1	3
f	is in range	0,08	0,24	1	1	3
ap	is in range	1	2	1	1	3
Ra	Minimize	1,36	4,49	1	0,1	1
MRR	maximize	16	182,4	0,5	1	5

Tableau IV.12: Réponse de la surface de rugosité et de débit de copeaux enlevé (cas 2)

Solutions						
Number	Vc	f	ap	Ra	MRR	Desirability
1	<u>380,000</u>	<u>0,240</u>	<u>2,000</u>	<u>3,715</u>	<u>178,667</u>	<u>0,968</u>

La figure IV.6 présente l'espace de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres du régime de coupe (Vc , f et ap) pour obtenir un débit de copeau enlevé maximale (productivité maximale). D'une autre façon La figure IV.7 expose, les valeurs optimales exactes des paramètres d'entrée (Vc , f et ap), de même celles des paramètres technologiques (Ra et MRR) et la désirabilité pour ce cas.

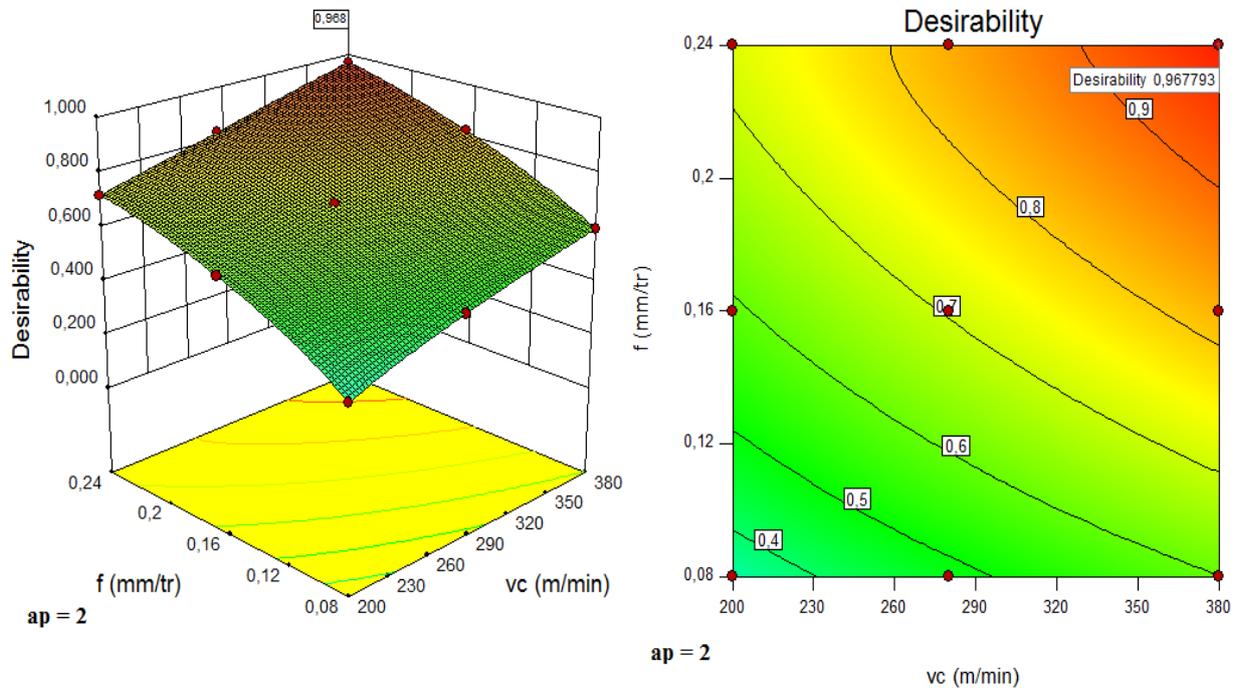


Figure IV.6: Graph de désirabilité de Ra et MRR (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 2^{ème} cas.

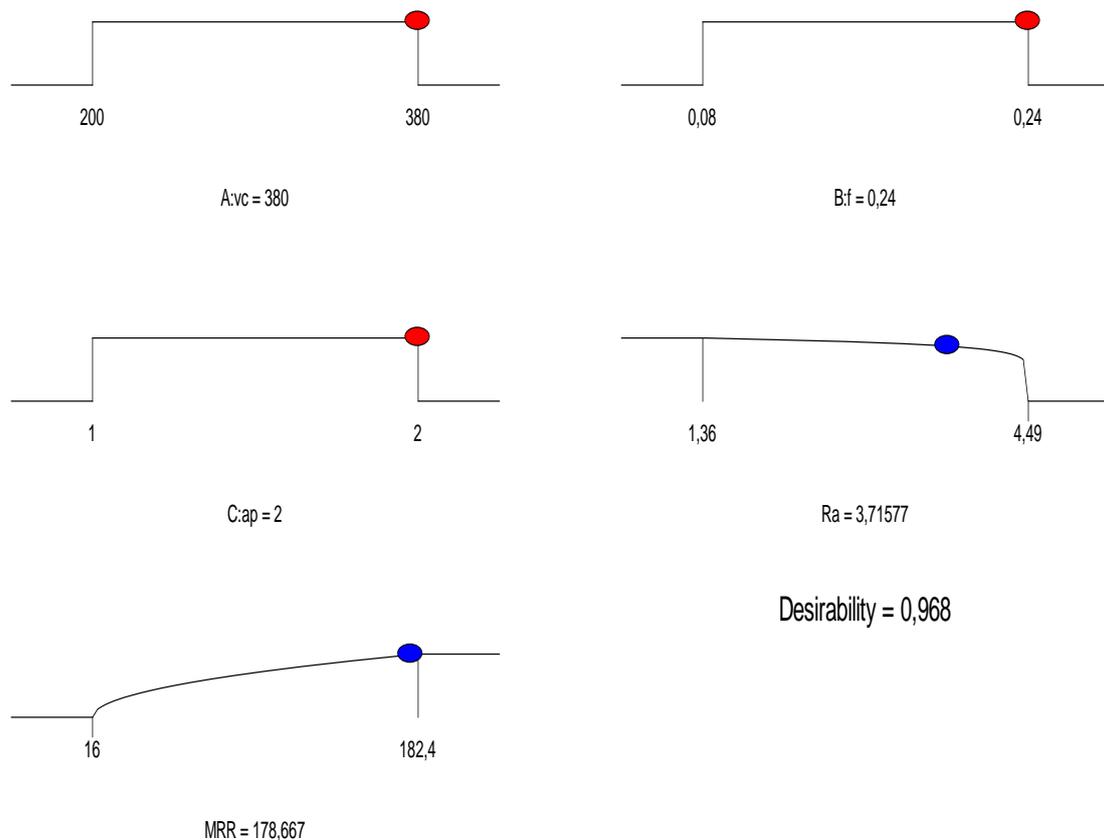


Figure IV.7: Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et le débit du copeau enlevé (MRR) pour le 2^{ème} cas.

Cas 3 : compromis entre rugosité et productivité

Le troisième cas s'intéresse à une optimisation combinée entre la rugosité minimale et le débit de copeaux enlevé maximale avec une même importance (5+) pour les deux sorties. De même pour les poids on a donné 0,5 pour les deux. Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de $V_c=380$ (m/min), $f=0,166$ (mm/tr) et $a_p=2$ (mm). La rugosité prend une valeur de $Ra=2,155$ (μm), le MRR et la désirabilité prennent successivement les valeurs (126,412 et 0.839). Ce cas est intéressant lorsqu'une productivité élevée est demandée, avec un bon état de surface de la pièce usinée. Le **tableau IV.13** présente le but et la gamme de paramètres pour ce cas d'optimisation. Les réponses de la surface de rugosité et de débit de copeaux à enlever s'exprime par le **tableau IV.14**.

Tableau IV.13: But et gamme de paramètres d'optimisation (cas 3).

Constraints						
		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
Vc	is in range	200	380	1	1	3
f	is in range	0,08	0,24	1	1	3
ap	is in range	1	2	1	1	3
Ra	minimize	1,36	4,49	1	0,5	5
MRR	maximize	16	182,4	0,5	1	5

Tableau IV.14: Réponse de la surface de rugosité et de débit de copaux enlevé (cas 3)

Solutions							
Number	Vc	f	ap	Ra	MRR	Desirability	
1	<u>380,000</u>	<u>0,166</u>	<u>2,000</u>	<u>2,155</u>	<u>126,412</u>	<u>0,839</u>	Selected

La figure IV.8 représente les surfaces de réponses 3D et le graphique de contour de la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres de coupe (Vc, f et ap). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation (Ra minimisé, MRR maximisé). La figure IV.9 exprime le résultat du régime de coupe optimal pour une désirabilité égale à 0,839.

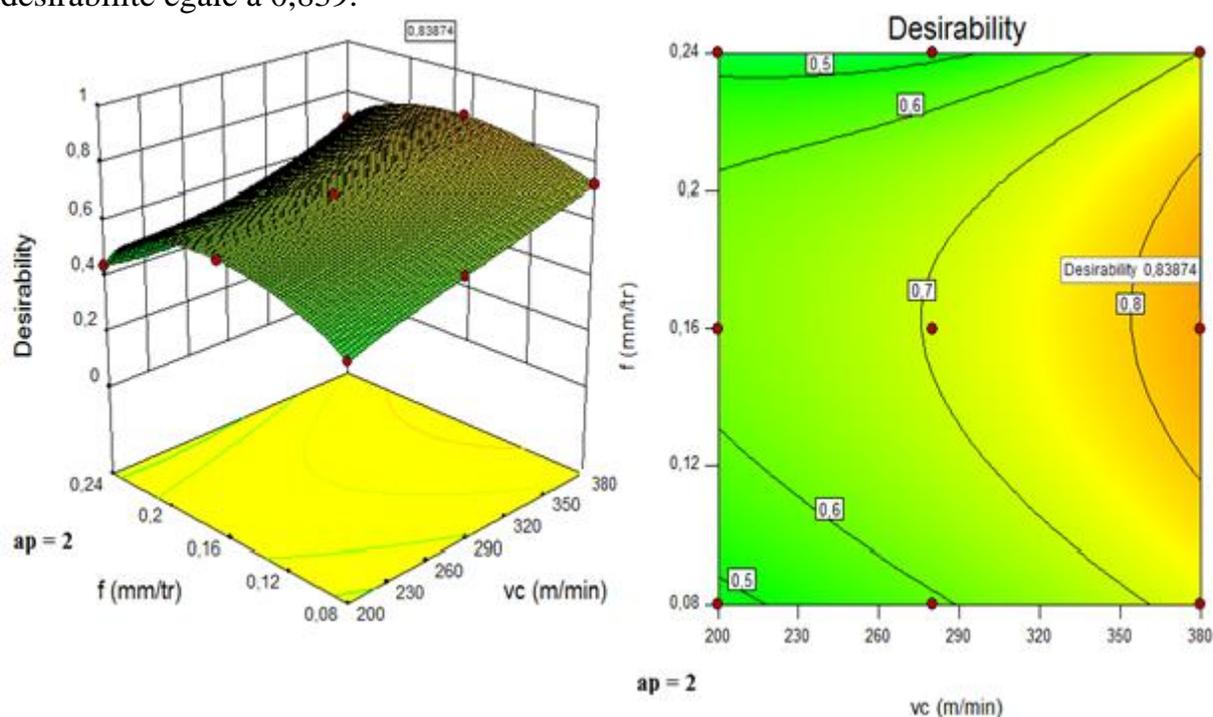


Figure IV.8: Graph de désirabilité de Ra et MRR (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 3^{ème} cas.

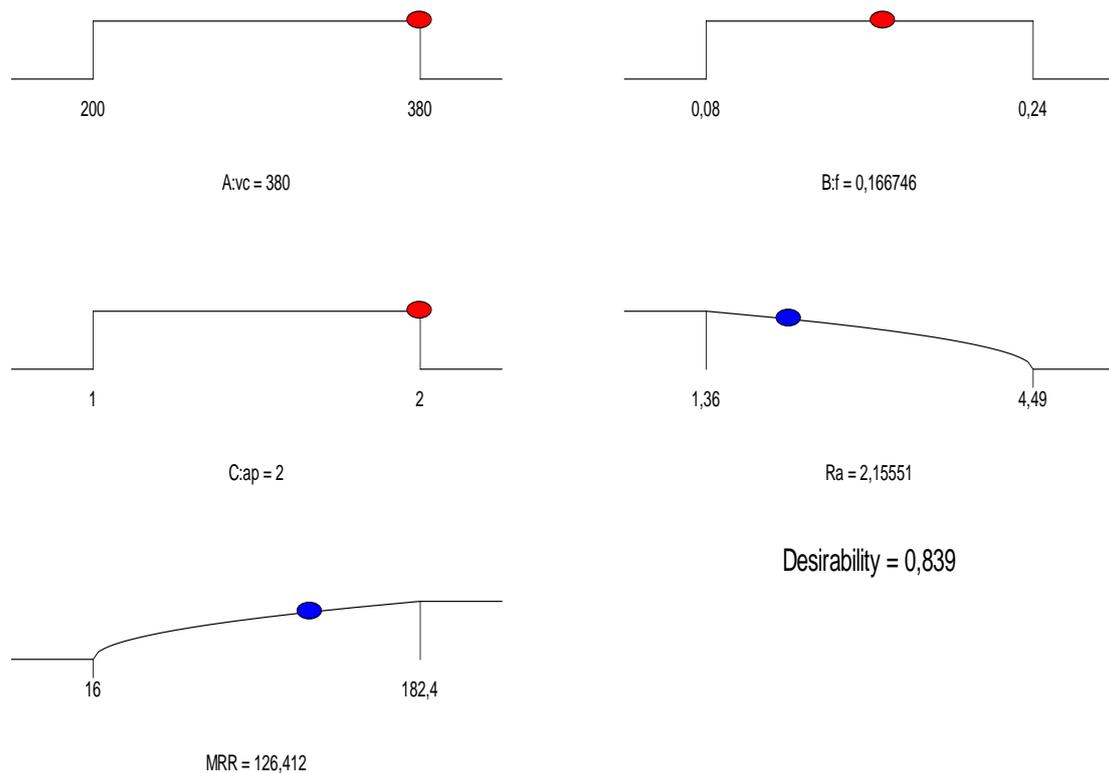


Figure IV.9: Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra) et le débit du copeau enlevé (MRR) pour le 3^{ème} cas.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté l'application de deux méthodes d'optimisation : mono-objective, dans laquelle nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser le débit de copeau enlevé (MRR) et la rugosité arithmétique (Ra), cette approche est basée sur la maximisation du rapport S/N correspondant à des caractéristiques de meilleure qualité, et l'optimisation multi-objective en appliquant deux méthodes différentes : la méthode Grise (Grey Relationel Analysis) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF) pour optimiser le débit du copeau enlevé (MRR) et la rugosité arithmétique de surface (Ra) simultanément. Cette optimisation est basée sur trois critères choisis qui sont la qualité, la productivité et une optimisation combinée entre les deux cités en même temps. En fin on peut conclure que La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse. Par contre les méthodes (GRA) et (DF) sont employées pour l'optimisation multi-objective.

Conclusion générale

La recherche expérimentale dans ce travail est conduite afin de modéliser les paramètres de performances d'usinage (la rugosité de surface et copeau enlevé) et optimiser les conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe) lors du tournage du polyamide 6 (PA6) avec une plaquette en carbure (**SPMR 120308**). Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

1- Les résultats de la méthodologie de surface de réponse (RSM) montrent que :

- ✓ Les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (R_a) pour un niveau de confiance de 95% montrent que l'avance (f) est le facteur le plus important qui affecte (R_a), sa contribution est de 67,73% suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec 18,33% de contribution, la profondeur de passe (ap) avec 0,15% de contribution. Les produits (f^2 , V_c^2) ont des contributions de (8,27 et 1,96) % respectivement. Les autres termes peuvent être supposés non significatifs.
- ✓ L'analyse ANOVA des résultats pour le débit de copeau enlevée (MRR) indique que l'avance (f) est le premier paramètre qui affecte le débit de copeau (MRR) avec pourcentage de contribution 49,64 % puis la profondeur de passe (ap) de 22,06 % suivie par la vitesse de coupe (V_c) de 19,65 %. Les interactions (V_c*f , V_c*ap et $f*ap$) ont des contributions de (3,28, 1,46 et 3,68) % respectivement. Les restes n'ont pas d'effet significatif sur le débit de copeau (MRR).
- ✓ Les modèles mathématiques basés sur la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour la rugosité de surface et le débit de copeau enlevé, ayant un (R^2) de 98,01% et 99,76%, respectivement, présentent la bonne concordance avec les données expérimentales.
- ✓ 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.

2- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de l'optimisation mono-objectif basée sur la méthode de Taguchi :

- ✓ Les résultats obtenus par la *Méthode de Taguchi* pour une optimisation mono-objective sont :

$V_c = 380$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, et $ap = 2$ mm pour une rugosité minimale et
 $V_c = 380$ m/min, $f = 0,24$ mm/tr et $ap = 2$ mm pour un MRR maximale.

- 3- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de l'optimisation multi-objectif par l'Analyse Relationnelle Grise :
- ✓ Les résultats obtenus par *L'Analyse Relationnelle Grise (GRA)* sont : vitesse de coupe $V_c = 380$ m/min, avance $f = 0,08$ mm/tr, et une profondeur passe $ap = 2$ mm, pour une rugosité de surface et un débit de copeau enlevé optimaux.
- 4- L'optimisation multi-objectif réalisée dans ce travail est basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF). Les régimes optimaux obtenus par cette optimisation selon les trois critères choisis sont :
- ✓ (***La rugosité (Ra) minimisée***) : $V_c = 380$ m/min, $f = 0,087$ mm/tr et $ap = 1,999$ mm. La rugosité de surface optimisée et le débit du copeau enlevé sont les suivants ($Ra = 1.496$ μm , $MRR = 69.952$ cm^3/min) avec une désirabilité de 0.963.
 - ✓ (***Le débit de copeau enlevé (MRR) maximisé***) : $V_c = 380$ m/min, $f = 0,24$ mm/tr et $ap = 2$ mm. Le débit du copeau enlevé optimisée et la rugosité de surface et sont les suivants ($MRR = 178.667$ cm^3/min , $Ra = 3,715$ μm) avec une désirabilité $Des = 0,968$.
 - ✓ ***Compromis entre la rugosité (Ra) et le Volume de copeau enlevé (MRR)*** : $V_c = 380$ m/min, $f = 0,166$ mm/tr et $ap = 2$ mm. Les valeurs optimisées sont les suivants ($Ra = 2,155$ μm , $MRR = 126,412$ cm^3/min) avec une désirabilité de 0.839.
- 5- La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse, par contre les méthodes GRA et DF sont les meilleurs pour l'optimisation multi-objectif. Les régimes optimaux proposés par les méthodes de l'Analyse Relationnelle Grise (GRA) et la fonction de désirabilité (DF) sont proches.

Référence bibliographique

- [1] Davim, J. P., & Mata, F. A comparative evaluation of the turning of reinforced and unreinforced polyamide. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33(9-10), 911-914, (2007).
- [2] J. L. Halary, F. Lauprêtre and L. Monnerie, Mécanique des matériaux polymères. Belin Échelles, (2008).
- [3] MATECHPLAST, Usinage des thermoplastiques standards. <http://www.usinageplastique.com/thermoplastiques-usuels.html>, (13/02/2013).
- [4] Rocardier. Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie, (2011).
- [5] Chabbi. A. Modélisation et optimisation des paramètres d'usinage lors du tournage du polyacétal POM, Thèse de doctorat en Mécanique, université 08 mai 1945, Guelma, (2018).
- [6] B. Gruber. Outillage et mesure. Dunod 2ème Edition, Lausanne, 51-63, (1981).
- [7] A. Czaplicki. L'usinabilité et la coupe des métaux : revue de la Société Royale Belge des Ingénieurs et des Industries, 12, 708 – 736, (1962).
- [8] Zaidi Ahmed. Contribution A L'étude De L'usinage Des Matériaux Polymères, Mémoire Magister en Mécanique des matériaux, université 08 mai 1945, Guelma, (2013).
- [9] Alain Passeron. Tournage, Techniques de L'Ingénieur, BM7086, (1997).
- [10] Y. Schoefs, S. Fournier, and J. C. Leon. Productique mécanique. Edition Delagrave. France, (1994).
- [11] CETIM. Etude de l'usinage à grande vitesse, 72-7-0669, (1979).
- [12] REMLI. F. L'effet d'usinage par tournage sur un acier XC18, thèse Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, (2016).
- [13] Enache. S. La qualité des surfaces usinées, Dunod, Paris (1972).
- [14] Bedrin. C, Roumesy. B. Usinage par outil coupant Fascicule 1-2, INSA Lyon (1989).
- [15] N.P. Sush. New theories of wear and their applications for toolmaterials, Vol. 62, pp. 120 (1980).
- [16] O. Pantale. Développement d'un modèle numérique de la coupe des métaux, pp.21-24.

- [17] Hessainia Zahia. Etude de l'impact des paramètres affectant la rugosité des surfaces et les efforts de coupe en usinage des pièces traitées thermiquement, Thèse de doctorat en Mécanique, université 08 mai 1945, Guelma, (2014).
- [18] B. Roumesy. Détermination des lois d'usure des outils de coupe 1, Machine-outil n° 319 Mai, pp.197-199, Mai (1975).
- [19] F. Leroy. Usinage et usinabilité, Technique de l'Ingénieur, MC2 M725, pp.3-7, (1984).
- [20] J. Aubry. Les Matières Plastiques, Technologie 5ème Edition, PP1-49, (2011).
- [21] Manuel D'usinage Garant. Matières www.garant-tools.com pp75-97.
- [22] M. Reyne. Technologie des plastiques, HERMES, Paris, (1998).
- [23] G.W. Ehrenstein et F. Montagne. Matériaux polymères. Structure, propriétés et applications, Hermès, Paris (2000).
- [24] J.Dorlot, J. Massounave et al. Des matériaux, Edition de l'école polytechnique des matériaux, Juillet, (1995).
- [25] J. Martin et al. Traité des matériaux, Tome 14, (2001).
- [26] G. Odian. La polymérisation. Principes et applications, traduction française par E. Franta, Polytechnica, Paris (1994).
- [27] <https://www.directindustry.fr/prod/3m-occupational-health-environmental-safety/product-17954-1589100.html>
- [28] Marc Carrega, Matériaux série – polymères ; Polyamides, DUNOD, P : 1- 3.
- [29] Maurice Reyne, Les plastique : Polymère ; transformation et applications, Hermès, P : 73 – 75, Paris (1990-1991).
- [30] Commission Européenne, Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, Fabrication des polymères, P : 1-3, 141, 142, 145, Août (2007).
- [31] L'âge du plastique : Découvertes et utilisations, L'Harmattan. 75005 Paris France.
- [32] D.C.Miles,j.H.Briston, Technologie des polymères, Dunod, paris (1968).
- [33] Comportement au feu des matières plastiques. Face au risque. PA6, mars, (1988).
- [34] Innova decoration, utilisation du polyamide 6 : <http://www.innovadecoration.com/news-filim-grade-j3400m-film-grade-482.html>
- [35] Lazarević, D., Madić, M., Janković, P., & Lazarević, A. Surface roughness minimization of polyamide PA-6 turning by Taguchimethod. *J Prod Eng*, 15, 29. (2012).
- [36] Panda, M. R., Biswal, S. K., & Sharma, Y. K. Experimental analysis on the effect of process parameters during CNC turning on nylon-6/6 using tungsten carbide tool.

International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 5(4), 2277-9655. (2016).

[37] Madić, M., Marinković, V., & Radovanović, M. Mathematical modeling and optimization of surface roughness in turning of polyamide based on artificial neural network. *Mechanics*, 18(5), 574-581, (2012).

[38] Motoi-Cristescu, M. The Influence of the Geometry of the Lathe Tool on the Surface Condition at the Processing of the Polyamides. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in machine building*, 26, 94-97, (2008).

[39] Narayanan, N. S., Baskar, N., Ganesan, M., Jenarathanan, M. P., & Praveen, S. Evaluation and Optimization of Surface Roughness and Metal Removal Rate Through RSM, GRA, and TOPSIS Techniques in Turning PTFE Polymers. In *Advances in Manufacturing Technology* (pp. 595-605). Springer, Singapore, (2019).

[40] SANCI, M. E., HALIS, S., & KAPLAN, Y. Study on Surface Roughness of Carbon and Glass Fiber Filled Polytetrafluoroethylene in Turning Process, (2016).

[41] Sancı, M. E., Halis, S., & Kaplan, Y. Optimization of machining parameters to minimize surface roughness in the turning of carbon-filled and glass fiber-filled polytetrafluoroethylene. In *Materials Design and Applications* (pp. 295-305). Springer, Cham, (2017).

[42] Principales caractéristiques du PA6 :
www.metaux-detail.com/pdf/plastique/POLYAMIDE.pdf

[43] Technique d'ingénieur f1006. Plans d'expériences méthode de Taguchi (2007).

[44] Lionel. G, Arnaud. S, Bruno. S, les plans d'expériences : tables de Taguchi, <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/6213/6213-les-plans-dexperience-ensps.pdf>

[45] Suresh R, Basavarajappa S, Samuel G.L. Somestudies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer-coated carbide tool. *Measurement*, 45, pp.1872–1884 (2012).

[46] Bouzid, L., Yallese, M. A., Chaoui, K., Mabrouki, T., & Boulanouar, L. 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*, 229(1), 45-61, (2015).

[47] Aouici, H., Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., Elbah, M., & Fnides, B. Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12), 1775-1788. (2014).

[48] A. CHABBI, M. A. YALLESE, M. NOUIOUA, I. MEDDOUR, T. MABROUKI, F. GIRARDIN, Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-24, (2017).

- [49] N. YUSUP, A. M. ZAIN, S. Z. M. HASHIM, Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007–2011), *Expert Systems with Applications*, 9909-9927,39 (2012).
- [50] Taguchi G, Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organisation, Tokyo (1986).
- [51] P. WIRA, Réseaux de neurones artificiels -architectures et applications-. Cours en Ligne, Université de Haute-Alsace, (2009).
- [52] L. Bouzid, 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 de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée. Université du 8 Mai 45 Guelma, (2015).
- [53] M. Kurt, E. Bagci, Y. Kaynak, Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling progress. *IntJ Adv Manuf Technol.* 40, 458–469 (2009).
- [54] M. Günay, A. Kaçal, Y. Turgut, Optimization of machining parameters in milling of Ti–6Al–4 V alloy using Taguchi method. *E-J New World Sci Acad Eng Sci.* 6(1), 428–440 (2011).
- [55] Pal S, Sahoo K. Tribological performance optimization of electroless ni–p coatings using the Taguchi method and grey relational analysis. *Tribol let*, 28, pp. 191–201 (2007).
- [56] Noorul H.A, Marimuthu P, Jeyapaul R. Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the taguchi method. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, 37, pp. 250–255, (2008).
- [57] M. CHAHAL, V. SINGH, R. GARG, Optimum surface roughness evaluation of dies steel H-11 with CNC milling using RSM with desirability function, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1-13 (2016).
- [58] Dabade UA, Multi-objective Process Optimization to Improve Surface Integrity on Turned Surface of Al/SiCp Metal Matrix Composites Using Grey Relational Analysis, *Procedia CIRP*, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 7 299 – 304, 2013.
- [59] Tosun. Determination of optimum parameters for multiperformance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *Int J Advanced Manufacturing Technology*, 28, pp. 450–455 (2006).
- [60] Myers R.S, Montgomery D.C. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc.: New York, (2002).