

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université du 8 mai 1945 – Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de
MASTER

Présenté par : **ABDI YASSINE**
Conception et Production Industrielle

*Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de
coupe lors de l'usinage du polyamide de PA6 en
utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR)*

Sous la direction de : **Pr.Yallese.M.A**

Juin 2016

Remerciement

Je remercie en premier mon Allah et le tout-puissant.

Merci à l'université de 08 Mai 1945 Guelma de m'avoir accueilli durant mes études universitaires, en particulier ma formation MASTER.

Je remercie le laboratoire LMS de l'université de Guelma, d'avoir mis à ma disposition les moyens qui ont permis la réalisation de ce travail.

*Je remercie mon encadreur le Professeur **YALLESE Mohamed Athman** pour m'avoir encadré et fait confiance durant la réalisation de ce 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.

Dédicace

Mes chers parents

Mes sœurs

Qu'ils sont toujours derrière moi

Avec leurs encouragements.

A Mes chers frères

Qui m'ont toujours soutenu.

A Toutes ma famille.

A Tous mes amis et mes collègues.

Passine
2016

Résumé

Les polymères jouent un rôle extrêmement important dans l'industrie d'aujourd'hui, ils sont présents dans de nombreux secteurs industriels. 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 polymères.

Ce travail, concerne la modélisation de la rugosité de surface, des efforts de coupe, la puissance de coupe et le débit de copeau. A cet effet nous avons réalisé un plan d'expérience de 27 essais lors un tournage de polyamide PA6. Une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été effectuée et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques des paramètres du processus de coupe pour d'éventuelles prédictions.

Les modèles mathématiques développés sont couplés avec une technique d'optimisation (fonction de désirabilité) pour trois types de situation (Qualité, Productivité et combinée).

Mots-clés : *Tournage, Polyamide PA6, rugosité de surface, ANOVA, RSM, modélisation, plan d'expérience, Optimisation.*

Abstract

Polymers play an extremely important role in the industry today, they are present in many industrial sectors. The latter have difficulties during cutting because of their physical and mechanical characteristics. From there, it is very interesting to find conditions where the cutting speed cutting tools can productively and efficiently machine these polymers.

This work concerns the modeling of the surface roughness, cutting force, the cutting power and the chip rate. For this purpose, we created a plan experience of 27 tests during a shooting polyamide PA6. A statistical analysis of results based on the analysis of variance (ANOVA) and the response surface methodology (RSM) was carried out and this in order to provide mathematical models of the parameters of the cutting process for possible predictions.

The developed mathematical models are coupled with an optimization technique (desirability function) for three situations (Quality, Productivity and combined).

Keywords: *Turning, Polyamide PA6, surface roughness, ANOVA, RSM, modeling, experimental design, optimization.*

Table des matières

Table des matières	I
Nomenclature.....	IV
Index des figures	V
Index des tableaux.....	VIII
Introduction Générale.....	1
Chapitre I Étude Bibliographique	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les polymères.....	4
I.2.1. Définition	4
I.2.2. Structure.....	4
I.2.2.1. Polymères linéaires	4
I.2.2.2. Polymères ramifiés	4
I.2.2.3. Polymères tridimensionnels.....	4
I.2.3. Classification des polymères.....	5
I.3. Les polyamides.....	6
I.3.1. Caractéristiques principales	6
I.4. Usinage des polyamides	8
I.4.1. Outils.....	8
I.4.2. Tournage	8
I.4.3. Fraisage	8
I.4.4. Perçage	8
I.4.5. Sciage.....	9
I.4.6. Taraudage	9
I.4.7. Découpage	9
I.4.8. Refroidissement.....	9
I.5. Caractéristiques d'usinage de Polyamide PA6.....	10
I.5.1. Conditions de coupe de polyamide PA6.....	10
I.5.2. Outil de coupe – tranchant des outils	10
I.5.3. Angles, avances et vitesses de coupe pour le Polyamides PA6.....	10
I.6. Paramètres technologique d'usinage.....	11
I.6.1. Les surfaces des pièces	11
I.6.1.1. Surface géométrique	11
I.6.1.2. Surface spécifiée	11
I.6.1.3. Surface réelle.....	11
I.6.1.4. Surface mesurée.....	11
I.6.2. Principaux critères d'états de Surface	11
I.6.2.1. Rugosité totale R_t	11
I.6.2.2. Rugosité R_z	11
I.6.2.3. Rugosité moyenne arithmétique R_a	12
I.6.2.4. Rugosité Maximum R_{max}	12
I.6.2.5. Rugosité R_p	12
I.7. Les efforts de coupe.....	12
I.7.1. Cas du tournage (cylindrage).....	12
I.7.2. Cas du perçage.....	14

Table des matières

I.7.3. Cas du fraisage (en bout).....	15
I.8. L'usure des outils de coupe.....	16
I.8.1. Mécanisme et forme d'usure.....	16
I.8.2. Description du phénomène d'usure.....	16
I.8.2.1. Abrasion.....	16
I.8.2.2. Adhérence.....	17
I.8.2.3. Diffusion.....	17
I.8.2.4. Oxydation.....	18
I.8.2.5. Usure des arêtes de coupe.....	18
I.8.2.6. Les causes d'usure pour les outils de coupe.....	20
I.9. La méthode des surfaces de réponse MSR.....	21
I.9.1. Les principes généraux.....	21
I.9.2. Étapes de la méthodologie de surface de réponse.....	21
I.9.3. Planification expérimental.....	21
I.9.4. Modélisation.....	22
I.9.5. Validation des modèles.....	23
I.10. Travaux de recherche (état de l'art).....	24
I.11. Conclusion.....	32
Chapitre II Procédure Expérimentale.....	
II.1. Introduction.....	33
II.2. Banc d'essais et équipement de mesure.....	33
II.3. Matériels utilisés.....	33
II.3.1. Machine-outil.....	33
II.3.2. Matériels de mesure.....	35
II.3.2.1. Plateforme kistler.....	35
II.3.2.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	38
II.3.2.3. Equipements supplémentaires.....	39
II.3.3. Type de polyamide pour l'usinage.....	41
II.3.4. Outils de coupe.....	42
II.3.4.1. Plaquette de coupe.....	42
II.3.4.2. Porte-outil.....	42
II.4. Planification des expériences.....	44
II.4.1. Méthodologie de recherche.....	44
II.4.2. Méthode de planification des expériences.....	44
II.5. Conclusion.....	46
Chapitre III Modélisation de la rugosité et des efforts de coupes.....	
III.1. Introduction.....	47
III.2. Analyse de variance ANOVA.....	48
III.3. Analyse de régression.....	49
III.4. Résultat d'expériences.....	50
III.5. Modélisation des efforts de coupe.....	51
III.5.1. L'effort axial F_x	51
III.5.1.1. Analyse de variance ANOVA pour F_x	51
III.5.1.2. Les effets principaux pour F_x	51
III.5.1.3. Analyse de régression pour F_x	52

III.5.1.4. Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour F_x	53
III.5.2. Modélisation de l'effort axial F_y	55
III.5.2.1. Analyse de variance ANOVA pour F_y	55
III.5.2.2. Effets principaux pour F_y	55
III.5.2.3. Analyse de régression pour F_y	56
III.5.2.4. Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour F_y	57
III.5.3. Modélisation de l'effort axial F_z	59
III.5.3.1. Analyse de variance ANOVA pour F_z	59
III.5.3.2. Effets principaux pour F_z	59
III.5.3.3. Analyse de régression pour F_z	60
III.5.3.4. Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour F_z	61
III.6. Modélisation de la rugosité de surface.....	63
III.6.1. Critère de rugosité R_a	63
III.6.1.1. Analyse de variance ANOVA pour R_a	63
III.6.1.2. Effets principaux pour R_a	63
III.6.1.3. Analyse de régression pour R_a	64
III.6.1.4. Analyse de surface de réponse et graphique de contours pour R_a	65
III.6.2. Analyse de la rugosité de surface R_z	67
III.6.2.1. Analyse de variance ANOVA pour R_z	67
III.6.2.2. Effets principaux pour R_z	67
III.6.2.3. Analyse de régression pour R_z	68
III.6.2.4. Analyse de surface de réponse et graphique de contours pour R_z	69
III.7. Modélisation de la puissance de coupe	71
III.7.1. Analyse de variance ANOVA pour P_c	71
III.7.2. Effets principaux pour la puissance P_c	71
III.7.3. Analyse de régression pour la puissance de coupe P_c	72
III.7.4. Analyse de surface de réponse et graphique de contours pour P_c	73
III.8. Modélisation de débit de copeau MRR.....	75
III.8.1. Analyse de variance ANOVA pour MRR.....	75
III.8.2. Les effets principaux sur le débit de copeau MRR	75
III.8.3. Analyse de régression pour le débit de copeau MRR.....	76
III.8.4. Analyse de surface de réponse et graphique de contour pour MRR	77
III.9. Conclusion.....	79
Chapitre IV Optimisation des conditions de coupe	
IV.1. Introduction	80
IV.1.1. Optimisation par la méthodologie de surface de réponse	80
IV.1.2. Puissance de coupe.....	82
IV.1.3. Débit de copeau MRR.....	82
IV.2. Résultats relatifs aux puissance P_c et le débit de copeau MRR.....	83
IV.3. Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité R_a et R_z	84
IV.4. Optimisation des conditions de coupe pour le débit de copeau MRR	85
IV.5. Optimisation des conditions de coupe pour F_x , F_y , F_z , R_a , R_z , P_c , MRR.....	87
IV.6. Conclusion	89
Conclusion générale	90

Nomenclature

K_c	<i>Force de coupe en [N]</i>
K_c	<i>Pression spécifique de coupe (fonction de h_d et du matériau usiné)</i>
a, a_p	<i>Profondeur de passe en [mm]</i>
f	<i>Valeur de l'avance en [mm/tr]</i>
F_z ou F_t	<i>Effort tangentiel [N]</i>
F_x ou F_a	<i>Effort d'avance ou effort axial [N]</i>
F_y ou F_r	<i>Effort de refoulement, Effort radial [N]</i>
$F_{rés}$	<i>Effort résultant [N]</i>
D	<i>Diamètre de perçage en [mm]</i>
K_v, K_p, K_a	<i>Les coefficients correctifs relatifs aux conditions concrètes d'usinage.</i>
V_c	<i>Vitesse de coupe [m/min]</i>
R_t	<i>Rugosité totale [μm]</i>
R_z	<i>Rugosité moyenne [μm]</i>
R_a	<i>Rugosité moyenne arithmétique [μm]</i>
R_{max}	<i>Rugosité Maximum [μm]</i>
R_p	<i>Distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur [μm]</i>
P_c	<i>Puissance de coupe</i>
MRR	<i>Le débit de copeau en [cm^3/min]</i>
MSR	<i>Méthode de Surface de Réponse</i>
$ANOVA$	<i>Analyse de Variance</i>
x_i	<i>Variables de prédiction centrée réduite (codée)</i>
R_i	<i>Variable courante (naturelle, réelle)</i>
\hat{y}	<i>Estimation de la vecteur réponse des n réponses observées</i>
X	<i>La matrice de terme de modèle évalué aux points de conception</i>
b	<i>Est l'estimateur des moindres carrés du vecteur de régression</i>
R^2	<i>Le coefficient de détermination statistique</i>
R_{adj}^2	<i>Le coefficient de détermination ajusté</i>
\bar{y}	<i>Est la moyenne des réponses</i>
ε	<i>Erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse</i>
SS_T	<i>La partition d'erreur totale</i>

Index des figures
Chapitre I

Figure I-1: Famille des polymères	6
Figure I-2: Principaux critères d'états de surface.....	12
Figure I-3: Les efforts de coupe dans le cas de tournage	13
Figure I-4: Composantes de l'effort de coupe.....	13
Figure I-5: Les efforts de coupe dans le cas de perçage	15
Figure I-6: Les efforts de coupe dans le fraisage.....	15
Figure I-7: Usure des outils de coupe	16
Figure I-8: Abrasion.....	17
Figure I-9: Adhérence	17
Figure I-10: Diffusion.....	17
Figure I-11: Oxydation.....	18
Figure I-12: Usure en dépouille	18
Figure I-13: Usure en cratère	19
Figure I-14: Arête rapportée	19
Figure I-15: Usure en entaille.....	19
Figure I-16: Déformation plastique	20
Figure I-17: Usure en peigne	20
Figure I-18: Ecaillage ou rupture de l'arête.....	20
Figure I-19: Composantes percer pour : (a) Polyamides non renforcés (PA6),(b) Polyamides renforcés avec 30% de fibres de verre (PA66 GF30).....	25
Figure I-20: Comparaison des valeurs expérimentales et prévues de Ra.	26
Figure I-21: Vitesse de coupe et avance par tour d'effet sur Ra	26
Figure I-22: Comparaison des évaluations d'ANN avec des valeurs expérimentales.....	28
Figure I-23: Évolution des contraintes en fonction des paramètres de coupe	29
Figure I-24: L'effet principal de rapport de S/N pour les efforts de coupe principaux.	31
Figure I-25: L'influence de l'avance par tour et profondeurs de passe à de diverses combinaisons de la vitesse de coupe et du rayon du bec de l'outil	32

Chapitre II

Figure II-1: Machine de Tour à chariot et à fileter modèle SN40.....	34
Figure II-2: Illustration pour la machine de tour à chariot et à fileter modèle SN40	34
Figure II-3: Plateforme d'effort de coupe KISTLER.....	35
Figure II-4: Schéma qui illustre le Montage du dynamomètre sur la table de la machine.....	36
Figure II-5: Capteur d'effort de coupe KISTLER.....	37
Figure II-6: Amplificateur de la charge KISTLER.....	38
Figure II-7: Rugosimètre pour la mesure de la rugosité SurfTest 201 (Mitutoyo)	38
Figure II-8: Logiciel Dynoware développé par Kistler.....	39
Figure II-9: Interface de logiciel Design Expert développé par Stat-ease	40
Figure II-10: Interface de logiciel MiniTAB v16	40

Figure II-11: Le polyamide PA6 pour l'étude.....41
Figure II-12: Plaquettes de coupe utilisée42
Figure II-13: Porte outil utilisé.....43
Figure II-14: Montage de la chaîne et plateforme de mesure des efforts de coupe.....43
Figure II-15: Exemple de surface de réponse 3D et graphique de contour.....46

Chapitre III

Figure III-1: Effet de conditions de coupe sur l'effort F_x52
Figure III-2: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour l'effort F_x53
Figure III-3: les valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour l'effort F_x53
Figure III-4: Surface de réponse et le contour pour l'effort F_x en fonction de (V_c, f, ap) 54
Figure III-5: Effet de conditions de coupe sur l'effort F_y56
Figure III-6: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour l'effort F_y57
Figure III-7: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour l'effort F_y57
Figure III-8: Surface de réponse et le contour pour l'effort F_y en fonction de (V_c, f, ap) 58
Figure III-9: Effet de conditions de coupe sur l'effort F_z60
Figure III-10: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour l'effort F_z61
Figure III-11: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour l'effort F_z61
Figure III-12: Surface de réponse et le contour pour l'effort F_z en fonction de (V_c, f, ap) 62
Figure III-13: Effet de conditions de coupe sur la rugosité R_a 64
Figure III-14: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour la rugosité R_a 65
Figure III-15: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour la rugosité R_a 65
Figure III-16: Surface de réponse et le contour pour la rugosité R_a en fonction des conditions de coupe (V_c, f, ap) 66
Figure III-17: Effet de conditions de coupe sur la rugosité R_z68
Figure III-18: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour la rugosité R_z69
Figure III-19: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour la rugosité R_z69
Figure III-20: Surface de réponse et le contour pour la rugosité R_z en fonction de (V_c, f, ap) 70
Figure III-21: Effet de conditions de coupe sur la puissance de coupe P_c72
Figure III-22: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour la puissance de coupe P_c73
Figure III-23: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour la puissance de coupe P_c73
Figure III-24: Surface de réponse et le contour pour la puissance de coupe P_c en fonction de (V_c, f, ap) 74
Figure III-25: Effet de conditions de coupe sur le débit de copeau MRR76
Figure III-26: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour le débit de copeau MRR77
Figure III-27: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour le débit de copeau MRR77
Figure III-28: Surface de réponse et le contour pour le débit de copeau MRR en fonction de (V_c, f, ap) 78

Chapitre IV

Figure IV-1: Le graphique de contour de désirabilité pour R_a et R_z 85

Figure IV-2: Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (R_a , R_z).....85

Figure IV-3: Le graphique de contour de désirabilité pour le débit de copeau MRR86

Figure IV-4: Diagramme d'optimisation de réponse du débit de copeau MRR87

Figure IV-5: Le graphique de contour de désirabilité88

Figure IV-6: Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (R_a , R_z) et les efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) et la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau (MRR).....89

Index des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1: Les propriétés Physiques et Thermiques du Polyamide PA6.....	7
Tableau I-2: Caractéristiques d'usinage pour le polyamide PA6.....	10
Tableau I-3: Etapes de méthodologie de surface de réponse.....	21
Tableau I-4: Résultat et comparaison d'optimisation.....	27
Tableau I-5: Valeurs de τ de contrainte tangentielle, σ de contrainte normale et ϵ de déformation.....	29
Tableau I-6: Paramètres et niveaux de tournage utilisés.....	30

Chapitre II

Tableau II-1: Les fréquences de rotation et les avances disponibles sur la machine.....	33
Tableau II-2: Les propriétés physiques et thermiques pour le polyamide PA6.....	41
Tableau II-3: désignation des plaquettes de coupe.....	42
Tableau II-4: Description dimensionnelle des plaquettes.....	42
Tableau II-5: Caractéristiques de porte plaquette utilisé.....	42
Tableau II-6: Matrice de planification pour un plan L27.....	45

Chapitre III

Tableau III-1: Résultats de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe lors de l'usinage de polyamide PA6.....	50
Tableau III-2: Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_x	51
Tableau III-3: Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_y	55
Tableau III-4: Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_z	59
Tableau III-5: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité R_a	63
Tableau III-6: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité R_z	67
Tableau III-7: Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe P_c	71
Tableau III-8: Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de copeau MRR.....	75

Chapitre IV

Tableau IV-1: Résultat des paramètres technologique calculées.....	83
Tableau IV-2: Contraintes d'optimisation pour la rugosité R_a et R_z	84
Tableau IV-3: Condition d'optimisation pour la rugosité R_a et R_z	84
Tableau IV-4: Contraintes d'optimisation pour le débit de copeau MRR.....	86
Tableau IV-5: Condition d'optimisation pour le débit de copeau MRR.....	86
Tableau IV-6: Contraintes d'optimisation combinée.....	87
Tableau IV-7: Condition d'optimisation combinée.....	88

Introduction Générale

Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets de la vie courante, dans lesquels ils ont souvent remplacé les substances naturelles, ils sont présents dans de nombreux domaines industriels (Automobile, l'aviation etc...). Parmi les types de 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 élevé et les contraintes internes.

Les polyamides appelés Nylons, sont des matériaux techniques utilisés dans des domaines de plus en plus variés, tels que l'automobile, l'électronique, l'industrie des sports et des loisirs... Les polyamides PA6 s'utilisent pour une grande diversité de pièces dans la construction de machines et d'appareils ainsi que dans l'entretien industriel.

Toutefois les spécialistes de l'usinage des PA6 sont très peu nombreux car les polyamides sont complexes à usiner, ils sont sujets à des déformations compliquées à gérer et les copeaux sont difficiles à maîtriser.

La nécessité de pouvoir produire plus rapidement et en plus grande quantité pousse les industriels à se questionner sur la modélisation et l'optimisation de l'usinage. Notre sujet rentre dans ce cadre, il a pour but la modélisation et l'optimisation en utilisant la méthodologie de surface de réponse et la fonction de désirabilité.

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le **premier chapitre** est consacré à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux. Dans ce chapitre, nous présentons les points suivants : matériaux de coupe, usure, rugosité, effort de coupe, et cinq articles relatifs à l'usinage de polyamide PA6 non renforcé.

Dans le **deuxième 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 de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

Dans **le troisième chapitre** nous avons présenté une étude statistique (analyse de variance *ANOVA* et modélisation) basée sur la méthodologie de surface de réponse et cela dans le but de déterminer des modèles mathématiques qui permettent la prédiction de la rugosité de surface, des efforts de coupe, puissance de coupe, débit de copeau et cela en fonction des paramètres de coupe (V_c, f, ap).

Le **Quatrième chapitre** est consacré à l'optimisation des conditions de coupe pour trois type d'optimisations : Rugosité minimale (Qualité) et débit de copeau maximale (productivité), et optimisation des conditions de coupe combinée pour (Rugosité minimale, efforts de coupe minimales, puissance de coupe minimale, débit de copeau maximale).

En fin, nous avons fait une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

Chapitre I

Étude Bibliographique

L'étude bibliographique représente un ensemble des connaissances générale sur le polyamide PA6, Les caractéristiques d'usinage pour les matières plastiques en générale tel que les polymères linéaires, ramifiés tridimensionnels aussi la classification des polymères, principaux critères d'états de Surface, les efforts de coupe, l'usure des outils de coupe, la méthode des surfaces de réponse MSR, et enfin un résumé pour cinq (5) Articles relatifs à l'usinage de polyamide PA6 non renforcé.

I.1. Introduction

Les matières plastiques sont des matériaux organiques composés de macromolécules, elles sont produites selon un processus de fabrication entièrement ou partiellement synthétique et transformées en objets utilisables par le biais du façonnage plastique.

On confond souvent les notions de synthétique, artificiel et plastique. Or, si l'on peut considérer synthétique et artificiel comme des synonymes, le terme plastique fait intervenir la notion dépolymérisation et de malléabilité. Il a donc un sens plus restreint. Les scientifiques parlent plutôt de polymères (dérivé du grec ancien Poly, beaucoup, et meros, particule) [1].

Dans la pratique le plastique est le terme le plus couramment utilisé du grand public, le technicien utilise le terme de matières plastiques tandis que le scientifique parle de polymère. Nous parlerons donc de matières plastiques.

Les polymères se mettent en œuvre le plus souvent par moulage, cependant, des usinages sont assez souvent pratiqués pour différentes raisons comme le perçage de pièces moulées et la fabrication de petites séries, l'obtention de cotes extrêmement précises et la découpe de préforme à thermoformer.

Pour cela, les techniques d'usinage doivent être adaptées aux comportements spécifiques du polymère. Les polyamides sont des matières plastiques appartiennent à la famille de polymère, Cette grande famille des polyamides a maintenant des applications innombrables, le textile bien sûr, mais aussi beaucoup de matériaux polymères techniques.

Cette étude consacrée à l'étude bibliographique relative à l'usinage des polyamides notamment l'usinage de polyamide PA6 non renforcée, la rugosité et l'usure des outils de coupe et les efforts de coupe dans le chariotage et le fraisage et en fin le perçage [2].

Ce travail suit par la Méthodologie de Surface de Réponse (*MSR*), et nous avons fait un résumé de cinq articles réalisés aux domaines d'usinage de polyamide PA6 non renforcée.

I.2. Les polymères

I.2.1. Définition

Les polymères sont des substances constituées de grandes molécules formées par la répétition d'un même motif composé d'une ou de plusieurs unités de base.

Le nombre moyen de ces unités de base (monomères) dans les molécules finales (polymères) est le degré de polymérisation. Si ce degré de polymérisation est élevé, on parle de hauts polymères, lorsqu'il est faible, le composé est un oligomère.

I.2.2. Structure

I.2.2.1. Polymères linéaires

Appelés aussi polymères mono dimensionnels, Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns à la suite des autres par des liaisons chimiques.

Dans certains cas, les monomères sont en outre organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu est partiellement cristallisé : on dit qu'il est semi-cristallin [2].

Chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre élevé mais fini d'unités monomères, de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère.

I.2.2.2. Polymères ramifiés

Dans les polymères ramifiés, certaines chaînes latérales sont liées à la chaîne principale. Les ramifications peuvent être dues à des impuretés ou à la présence de monomères ayant plusieurs groupes réactifs. Les polymères formés de monomères présentant des ramifications [2].

I.2.2.3. Polymères tridimensionnels

Les polymères tridimensionnels, qui résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires. Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule, Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel système.

I.2.3. Classification des polymères

Les polymères peuvent être classés différemment selon la considération de leurs structures, le type de réaction qui a servi à les préparer leurs propriétés physiques ou leurs usages technologiques [2].

- **Selon la nature chimique**
 - Polymères minéraux.
 - Polymères organiques.
 - Polymères mixtes.

- **La structure des chaînes**
 - Polymères linéaires.
 - Polymères ramifiés.
 - Polymères réticulés.

- **Selon leur origine**
 - Polymères naturels.
 - Polymères synthétique et de transformation.

- **Selon leur comportement thermique**
 - Polymères thermoplastiques.
 - Polymères thermodurcissables.
 - Polymères thermo élastiques.

- **Selon les usages technologiques**

On peut distinguer :

- Les fibres synthétiques.
- Les plastomères (thermodurcissables et thermoplastiques).
- Les élastomères

Nous pouvons conclure la famille de polymères dans la **Figure I-1 [1]**.

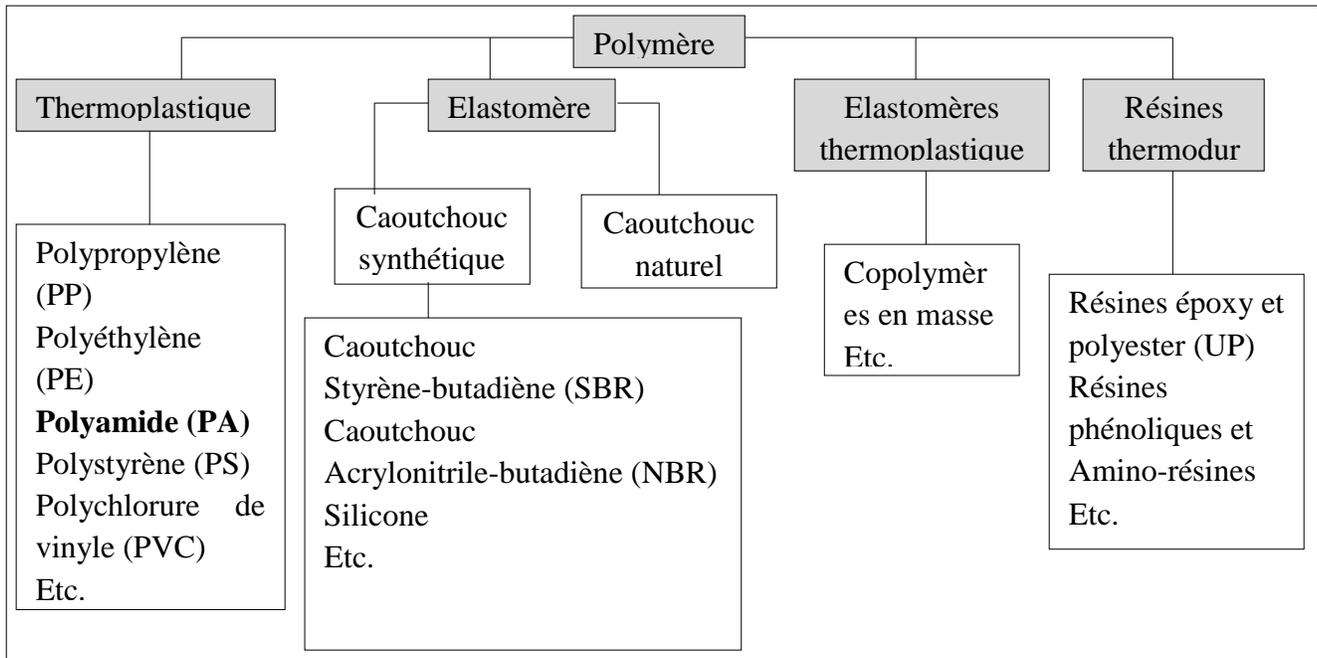


Figure I-1: Famille des polymères

I.3. Les polyamides

Parmi la famille des matières thermoplastique les polyamides souvent désigné par le nom de NYLON.

Définition

Les polyamides appelés Nylons, sont des matériaux techniques utilisés dans des domaines de plus en plus variés, tels que l'automobile, l'électronique, l'industrie des sports et des loisirs.

I.3.1. Caractéristiques principales

- Haute résistance mécanique, rigidité, dureté.
- Bonne résistance à la fatigue.
- Haut pouvoir amortissant.
- Bonnes propriétés de glissement.
- Excellente résistance à l'usure.

Plusieurs nuances existent en fonction des applications :

Le plus souvent appelé **NYLON**, Cette désignation indique une fabrication **EXTRUDEE**.

La résistance mécanique, la rigidité et le pouvoir amortissant combinés à une excellente résistance à l'usure en font le matériau de référence pour la construction mécanique et l'entretien. Il associe de bonnes propriétés mécaniques, électriques et chimiques.

Exemples d'applications

Pièces de guidages–Engrenages, Galets, Eléments d'accouplements, Cages de roulements, Construction mécanique le polyamide PA6 caractérise par le couleur blanche ou noir, Les caractéristiques Physiques et Thermiques pour le Polyamide PA6 [3] données dans le *Tableau I-1*.

Tableau I-1: Les propriétés Physiques et Thermiques du Polyamide PA6

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

- **Points forts :**

- Très bonne usinabilité.
- Résistance et dureté exceptionnellement élevées sur un vaste domaine de températures.
- Haute température permanente d'utilisation.
- Bonnes propriétés mécaniques.
- Bonnes caractéristiques de glissement.
- Haute résistance à l'abrasion et Grand pouvoir d'amortissement.
- Très bonne résistance aux hydrocarbures, substance sal câlines, graisses, huiles, carburants, éthers, esters, cétones.
- Bonnes caractéristiques de collage.

- **Points faibles :**

- Haute absorption d'humidité.
- Aucune résistance aux halogènes, acides minéraux et certains acides organiques, oxydants.

I.4. Usinage des polyamides

I.4.1. Outils

Pour l'usinage des plastiques (Polyamides) non renforcés, les outils en acier HSS (rapide) sont suffisants. Avec les plastiques renforcés (fibre de verre, billes de verre, etc.), des outils en métal dur (outils MD) sont nécessaires [2]. Pour la fabrication en grande série, on obtient avec les outils MD des temps de séjour plus longs et un meilleur respect des côtes. Une bonne qualité des surfaces et une bonne précision des contours ne sont possibles qu'avec des outils impeccablement aiguisés.

I.4.2. Tournage

Pour atteindre des surfaces de qualité particulièrement haute, il faut prévoir le tranchant sous forme de finition large. Pendant la coupe, le ciseau doit être aiguisé pour éviter des surfaces cailleuses. En revanche, lors de l'usinage des matières à parois minces et particulièrement souples, il est conseillé d'employer des outils acérés comme des couteaux.

I.4.3. Fraisage

Pour le fraisage les types de fraiseuses habituels peuvent être utilisés. Les grands nombres de pièces, il est préférable d'utiliser des fraiseuses munies de plaquettes carbure pour que la vitesse de coupe (V_c) puisse être augmentée. Les fraiseuses utilisées habituellement pour l'usinage des métaux légers sont particulièrement adaptées aux polyamides.

I.4.4. Perçage

Il est conseillé :

- D'effectuer quelques essais préliminaires
- D'évacuer les copeaux pour éviter l'échauffement de la matière au passage du foret
- De travailler par perçages successifs en dégageant régulièrement l'outil et en refroidissant par un liquide ou par un soufflage d'air comprimé
- De percer la matière d'un seul côté
- D'utiliser des forets à lames affûtées
- De ne pas faire d'usinage à angles vifs mais avec un rayon pour éviter l'effet d'entaille
- De réduire la vitesse d'avance (f) en fin de coupe pour éviter la sortie brutale de l'outil empêchant ainsi les bavures et les éclats.

Les diamètres de perçage importants doivent être pré percés ou exécutés au moyen d'une mèche creuse ou par alésage au tour.

I.4.5. Sciage

La plupart des matières plastiques peuvent être sciées avec des scies à ruban ou circulaires, les dents devant être fortement affûtées pour obtenir une coupe libre.

I.4.6. Taraudage

La coupe mécanique et la taille du filetage doivent être effectuées à des vitesses de coupe (V_c) basses afin de maintenir le développement de chaleur aussi réduit que possible. Il est en tout cas recommandé d'utiliser un agent réfrigérant. Les tarauds doivent souvent être pourvus d'une surcote [2].

I.4.7. Découpage

Des pièces à parois minces jusqu'à 1,5 mm peuvent être produites économiquement par le découpage, qui peut se faire à haute vitesse. Pour le cas où il se produirait des cassures, le matériau doit être préchauffé. Lors de toutes les méthodes mentionnées d'usinage par enlèvement de copeaux, il faut compter sur des bavures plus ou moins prononcées. L'élimination manuelle avec des couteaux d'ébarbage spéciaux donne de meilleurs résultats, L'ébavurage au tonneau ou le ponçage vibrant sont d'autres possibilités, les abrasifs devant être choisis en fonction des pièces.

I.4.8. Refroidissement

Les plastiques sont de mauvais thermo conducteurs. Ainsi, pendant le fraisage, des températures trop élevées peuvent faire ramollir ou fondre les surfaces, voire endommager le matériel. Un bon refroidissement des matériaux est absolument indispensable.

On obtient un refroidissement optimal lorsque les copeaux sont correctement évacués par les outils.

Si les temps de fraisage sont longs, on peut également employer des lubrifiants de refroidissement pour minimiser l'accumulation de la chaleur. La plupart des plastiques amorphes (Polyamide PA6) ont tendance à former des fissures de contrainte et il convient donc de les refroidir à l'eau ou à l'air uniquement.

Directives d'usinage pour les joncs PA6 à partir du diamètre 60 mm :

Les joncs (rond et jet creux) plastiques techniques renforcés/modifiés montrent un plus haut niveau de contrainte résiduelle que ceux non renforcés/non modifiés, ainsi qu'une ténacité réduite due à une plus grande cristallinité. [3], Cela a pour conséquence une sensibilité accrue pendant le processus d'usinage, qui se manifeste en particulier par un plus grand risque de fissuration.

Pour cette raison les joncs plastiques techniques renforcés/modifiés doivent être découpés avec une scie à ruban ou une scie d'arc. Il est déconseillé d'utiliser une scie circulaire ou une scie de mitre, risques de fissures.

Avant de commencer le processus d'usinage les joncs doivent être conditionnés à température ambiante pendant 24h. La méthode optimale est de préchauffer les joncs jusque 80-100 °C avant de découper ou de percer. Le temps de préchauffage requis est 5 à 6 mm/min de section. [1].

I.5. Caractéristiques d'usinage de Polyamide PA6

I.5.1. Conditions de coupe de polyamide PA6

Les polyamides ont une faible conductibilité thermique. Il convient donc d'éviter tout échauffement dû à l'usinage sous risque de générer des contraintes internes préjudiciables à la géométrie et à la fiabilité de la pièce finie.

I.5.2. Outil de coupe – tranchant des outils

La qualité du tranchant et le bon dégagement du copeau sont plus important que la nature du matériau de l'outil. Le meilleur fini de surface est obtenu avec une pointe d'outil arrondie [1].

I.5.3. Angles, avances et vitesses de coupe pour le Polyamides PA6

Le *Tableau I-2* présente les paramètres de coupe en générale pour le polyamides PA6.

Tableau I-2: Caractéristiques d'usinage pour le polyamide PA6

Scier			Tourner			Percer			Fraisier		
$\alpha [^\circ]$	20	30	$\alpha [^\circ]$	6	10	$\alpha [^\circ]$	5	15	$\alpha [^\circ]$	10	20
$\gamma [^\circ]$	2	5	$\gamma [^\circ]$	0	5	$\gamma [^\circ]$			$\gamma [^\circ]$	5	15
$V_c [m/min]$	40	100	$x [^\circ]$	45	60	$\varphi [^\circ]$	90		$V_c [m/min]$	250	500
$t [mm]$	3	8	$V_c [m/min]$	250	500	$V_c [m/min]$	50	150			
			$f [mm/tr]$	0.1	0.5	$f [mm/tr]$	0.1	0.3			
α : Angle de dépouille , φ : Angle de point γ : Angle de réglage						x : Angle de réglage, V_c :Vitesse de coupe t : Pas , f : Avance					

I.6. Paramètres technologique d'usinage

I.6.1. Les surfaces des pièces

La nouvelle norme ISO 25178 définit l'analyse en 3D de l'état de surface, ce qui permet également la caractérisation des surfaces anisotropes ou périodiques difficile avec les anciens paramètres 2D d'état de surface [2].

I.6.1.1. Surface géométrique

C'est une Surface parfaite. Elle est définie géométriquement par des cotes nominales. Par exemple pour la surface cylindrique.

I.6.1.2. Surface spécifiée

C'est la surface géométrique affectée des tolérances de fabrication.

I.6.1.3. Surface réelle

C'est la surface qui résulte des procédés de fabrication, montre (en amplifiant les défauts) que la surface réelle diffère sensiblement de la surface géométrique.

I.6.1.4. Surface mesurée

La surface mesurée est le résultat de l'exploration, à l'aide des instruments de touche pas le fond de la surface réelle. C'est ce qui explique, en partie, la différence entre la surface réelle et la surface mesurée. Les divers types d'instrument et les différentes techniques de mesures peuvent donner, à partir d'une même surface réelle, des surfaces mesurées dissemblables.

I.6.2. Principaux critères d'états de Surface

Les principaux critères de rugosité sont définis par :

I.6.2.1. Rugosité totale R_t

R_t Représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4} \dots \dots \dots (I-1)$$

I.6.2.2. Rugosité R_z

R_z Représente la distance moyenne entre les sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \dots \dots \dots (I-2)$$

I.6.2.3. Rugosité moyenne arithmétique R_a

R_a Représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue).

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| dx \dots\dots\dots(I-3)$$

I.6.2.4. Rugosité Maximum R_{max}

R_{max} C'est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de Rugosité R_{max} étant pris sur une saillie et un creux consécutif.

I.6.2.5. Rugosité R_p

(R_p) Est la hauteur maximale de saillie de rugosité (R_p) Est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur, Tous les principaux critères d'états de surface résumée graphiquement dans La **Figure I-2**.

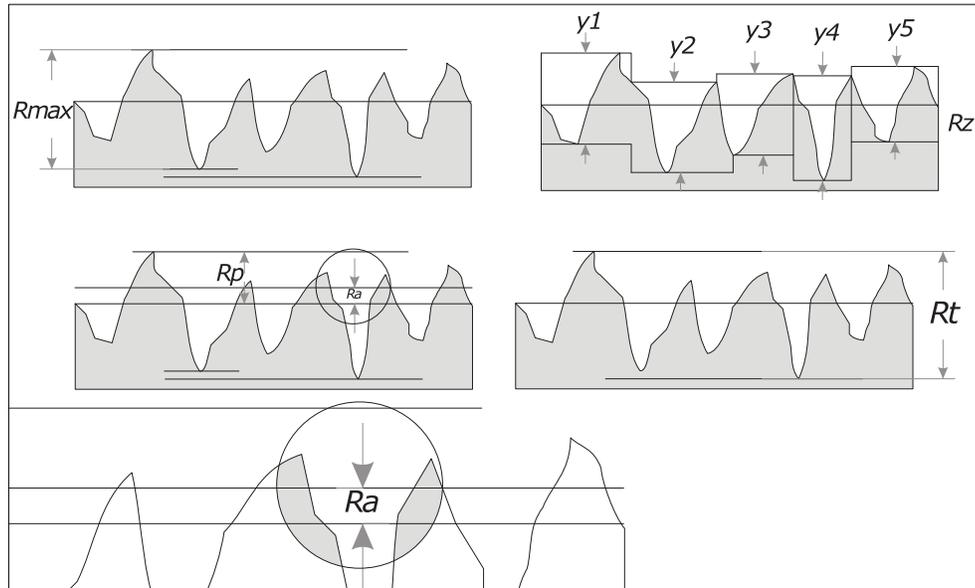


Figure I-2: Principaux critères d'états de surface

I.7. Les efforts de coupe

L'étude et l'évaluation des forces de coupe présente un intérêt en usinage principalement pour dimensionner les outils et les éléments de machine-outil (porte-pièce, etc.) mais aussi pour évaluer la puissance de coupe et permettre ainsi le choix rationnel de la machine.

I.7.1. Cas du tournage (cylindrage)

Dans le cas d'un outil à charioter **Figure I-3** et **Figure I-4**, l'effort radial F_a est nul (pas d'avance radiale). De plus, la vitesse d'avance V_f est en général 1000 fois plus petite que la vitesse de coupe [2].

On peut donc négliger F_f devant F_c L'effort de coupe est :

$$F_c = K_c \cdot a \cdot f \dots\dots\dots(I-4)$$

Où :

F_c : Force de coupe en [N]

K_c : Pression spécifique de coupe (fonction de h_D et du matériau usiné)
En [N/mm²]

a : Profondeur de passe en [mm]

f : Valeur de l'avance en [mm/tr]

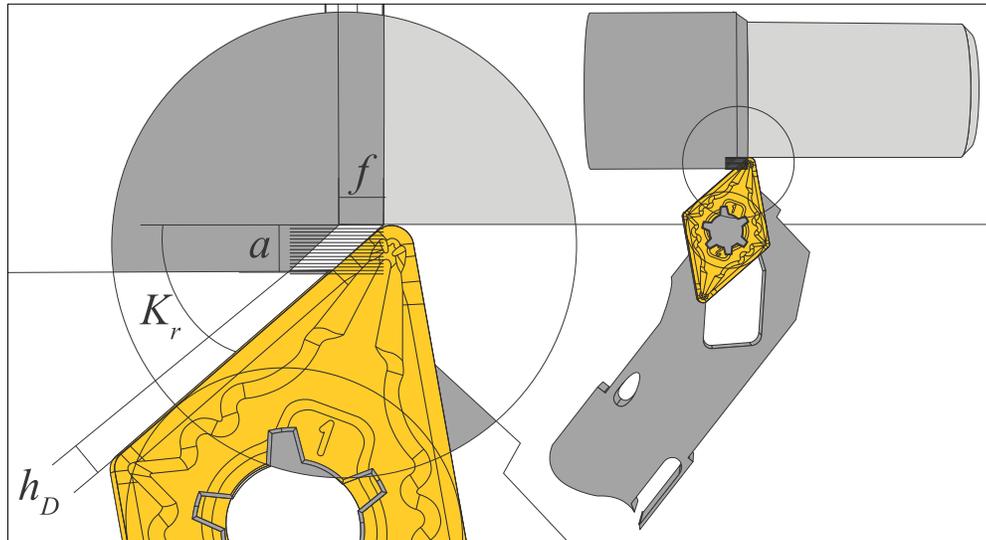


Figure I-3: Les efforts de coupe dans le cas de tournage

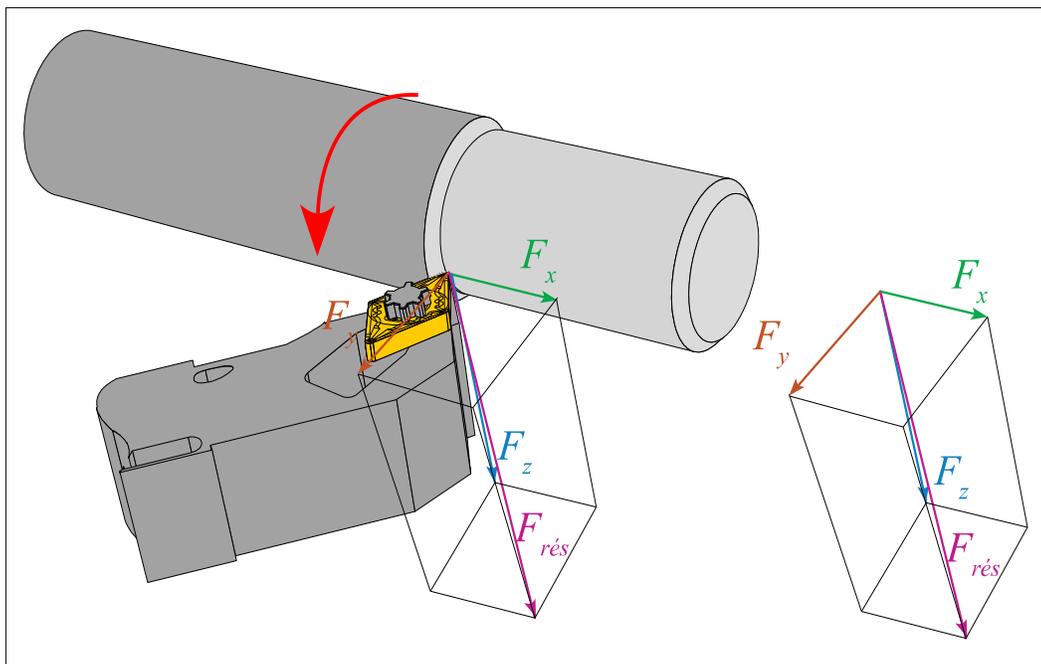


Figure I-4: Composantes de l'effort de coupe

- F_z ou F_t : Composante dans le sens de vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. C'est la composante qui a la plus grande valeur absolue.
- F_x ou F_a : Composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- F_y ou F_r : Composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.

Rapport des composantes :

La résultante de coupe $F_{rés}$ étant une diagonale de parallépipède est égale à :

$$F_{rés} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \dots\dots\dots(I-5)$$

I.7.2. Cas du perçage

F_{1f} et F_{2f} sont négligeables (devant F_{1c} et F_{2f}) et F_{1a} et F_{2a} sont égales et opposées (en théorie).

Voir la **Figure I-5**.

De plus l'avance f fournie par les abaques de perçage est pour les 2 dents du foret

$f_{réel \text{ pour une dent}} = f/2$ donc :

$$F_c = K_c \cdot f \cdot D/4 \dots\dots\dots(I-6)$$

K_c : Force de coupe en [N]

K_c : Pression spécifique de coupe (fonction de h et de la matière)
En [N/mm²]

D : Diamètre de perçage en [mm]

f : Valeur de l'avance en [mm/tr]

L'évaluation des composantes peut être donnée à travers des modèles empiriques déterminés par des méthodes statistiques à partir de résultats expérimentaux.

$$\begin{cases} F_v = C_1 a_p^{x_1} \cdot f^{y_1} \cdot V_c^{n_1} \cdot K_v [\text{N}] \\ F_p = C_2 a_p^{x_2} \cdot f^{y_2} \cdot V_c^{n_2} \cdot K_p [\text{N}] \\ F_a = C_3 a_p^{x_3} \cdot f^{y_3} \cdot V_c^{n_3} \cdot K_a [\text{N}] \end{cases}$$

Les coefficients C_1, C_2, C_3 sont des constantes qui dépendent des propriétés mécaniques du métal à usiner et conditions de son usinage.

Les coefficients K_v, K_p, K_a se sont les coefficients correctifs relatifs aux conditions concrètes d'usinage.

Les exposants $x_{1,2,3}, y_{1,2,3}, n_{1,2,3}$, caractérisent le degré d'influence des paramètres V_c, f et a_p sur les forces de coupes F_v, F_a, F_p . **Figure I-5**.

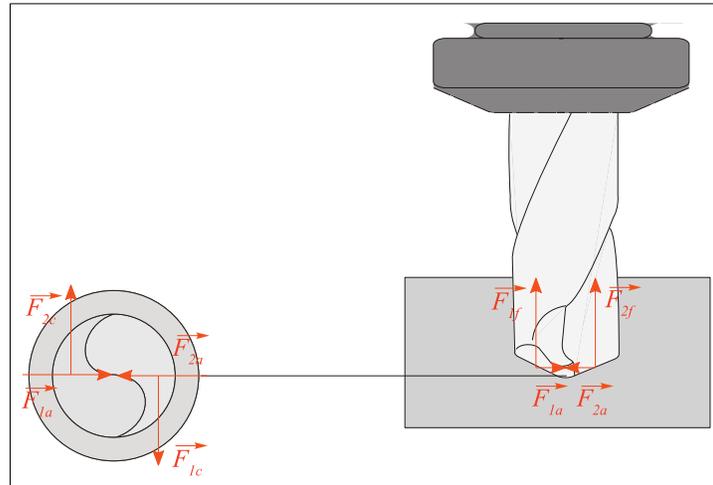


Figure I-5: Les efforts de coupe dans le cas de perçage

I.7.3. Cas du fraisage (en bout)

L'effort d'avancement étant négligeable (devant F_c) **Figure I-6** l'effort de coupe pour une dent est le suivant :

$$F_c = K_c \cdot a \cdot f \dots\dots\dots(I-7)$$

Où :

K_c : Force de coupe en [N]

K_c : Pression spécifique de coupe (Fonction de h_m et du matériau usiné)
En [N/mm²]

a : Profondeur de passe en [mm]

f : Valeur de l'avance en [mm/tr]

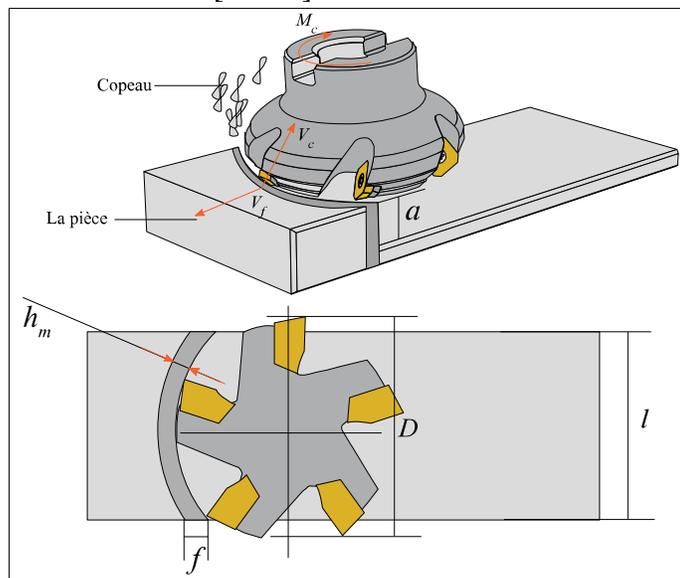


Figure I-6: Les efforts de coupe dans le fraisage

Dans la partie passée nous allons étudier les efforts de coupe en générale dans procédés principale de fabrication, Nous serons étudiées les paramètres et les conditions de coupe pour les polymères et spécifiquement dans le polyamide PA6.

I.8. L'usure des outils de coupe

L'usure est une caractéristique utilisée souvent pour décrire l'état d'un système mécanique. Elle est une conséquence due au frottement entre deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre *Figure I-7*. Concrètement, l'usure, Avec ses deux composantes, l'adhésion et l'abrasion. Ce phénomène peut entraîner des modifications dimensionnelles, géométriques et structurelles par une augmentation des jeux fonctionnels [4].

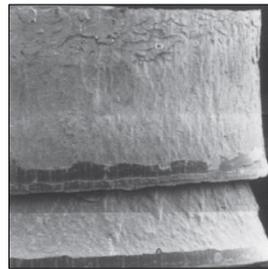


Figure I-7: Usure des outils de coupe

Si l'on fait un inventaire des configurations de coupe que l'on rencontre dans un atelier d'usinage, on observe une très grande diversité des vitesses de coupe (entre 10 et plusieurs milliers de m/min), de la géométrie des copeaux et de leurs conditions d'évacuation, de la rigidité du contact pièce usinée/outil, de la nature et de la géométrie des outils. Dans une telle variété de configurations de coupe, il n'est pas surprenant d'observer une grande variété de faciès de dégradation.

I.8.1. Mécanisme et forme d'usure

L'usure de l'outil de coupe est la conséquence directe des sollicitations très sévères qui subissent les faces de coupe et de dépouille. Ces mécanismes d'endommagement sont maintenant bien connus, notamment.

I.8.2. Description du phénomène d'usure

I.8.2.1. Abrasion

L'usure par abrasion est essentiellement due aux frottements outil/pièce et copeau/outil. L'usure abrasive des outils résulte d'arrachement en surface de l'outil causé par des particules souvent anguleuses et de grande dureté contenues dans le matériau usiné (précipités en inclusions) *Figure I-8*. Ces particules sont toujours renouvelées au cours de l'usinage. Les produits d'abrasion sont évacués 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. Elle dépend donc de la composition chimique et du procédé d'élaboration du matériau usiné et croît avec la vitesse.

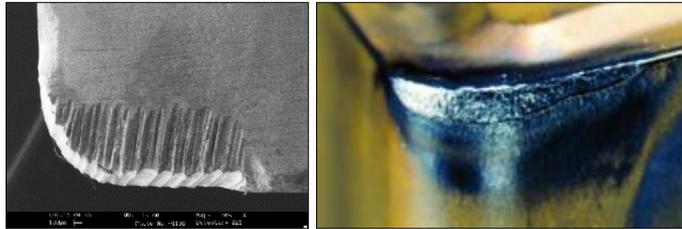


Figure I-8: Abrasion

I.8.2.2. Adhérence

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. Lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Les rugosités et microrugosités des surfaces, en contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des microsoudures. Ces microsoudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. *Figure I-9* Ce processus continu génère l'apparition d'arêtes rapportées.



Figure I-9: Adhérence

I.8.2.3. Diffusion

Ce type d'usure ne peut se produire qu'à des températures élevées. Les zones de températures élevées sont également le lieu de fortes pressions *Figure I-10*. Ainsi sous l'effet des températures et pressions élevées les atomes vont subir une migration de l'outil vers le copeau. Ce processus est grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques entre les atomes de la matière usinée et de l'outil.

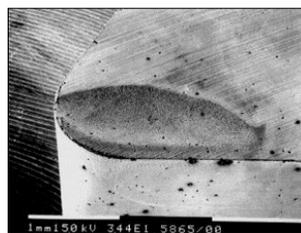


Figure I-10: Diffusion

I.8.2.4. Oxydation

L'environnement de l'usinage est constitué d'oxygène dans l'air, de hautes températures, de l'eau provenant des huiles de coupe solubles. Cet environnement est propice au phénomène d'oxydation et peut provoquer localement une fragilisation de l'outil. De plus, le potentiel d'oxydo-réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils *Figure I-11*.



Figure I-11: Oxydation

I.8.2.5. Usure des arêtes de coupe

Pour comprendre les avantages et les limites de chaque matière, il est important de connaître les différents mécanismes d'usure qui agissent sur les outils.

– Usure en dépouille

C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable étant donné qu'elle est plus prévisible et stable *Figure I-12*. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce.

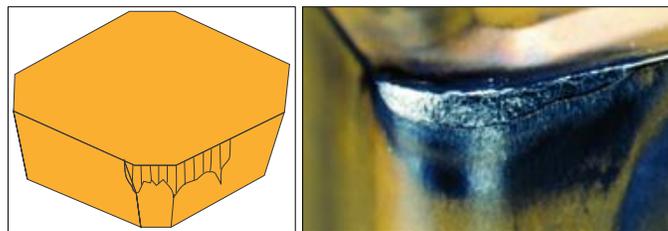


Figure I-12: Usure en dépouille

– Usure en cratère

L'usure en cratère apparaît sur la face de coupe de la plaquette. Elle est provoquée par la réaction chimique entre la matière de la pièce et le matériau de coupe. La vitesse de coupe l'amplifie. Une usure en cratère excessive affaiblit l'arête de coupe qui peut se rompre *Figure I-13*.

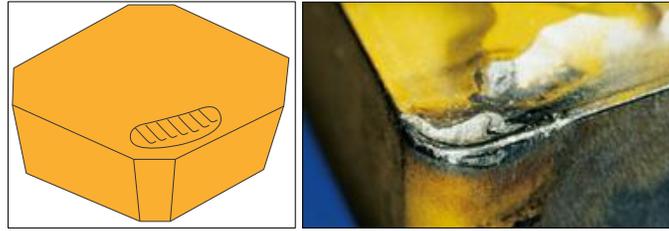


Figure I-13: Usure en cratère

– **Arête rapportée**

Ce type d'usure est provoqué par le soudage sous pression du copeau sur la plaquette *Figure I-14*. C'est le type d'usure le plus courant avec les matières collantes telles que les aciers bas carbone, les aciers inoxydables et l'aluminium. Une faible vitesse de coupe accélère la formation d'une arête rapportée.



Figure I-14: Arête rapportée

– **Usure en entaille**

Ce type d'usure se caractérise par une entaille localisée tant sur la face de coupe que sur la face de dépouille *Figure I-15*, au niveau de la profondeur de coupe. Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires.



Figure I-15: Usure en entaille

– **Déformation plastique**

La déformation plastique survient lorsque le matériau de coupe est ramolli par une température trop élevée. De manière générale, plus une nuance est dure et plus le revêtement est épais, meilleure est la résistance à la déformation plastique *Figure I-16*.

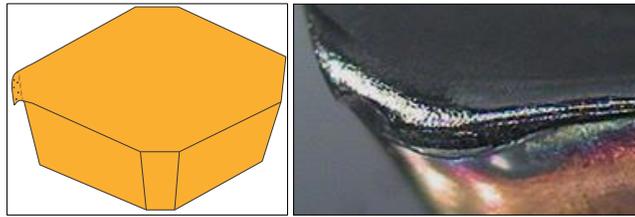


Figure I-16: Déformation plastique

– Usure en peigne

Lorsque l'arête de coupe subit des refroidissements brusques, des fissures perpendiculaires à l'arête apparaissent **Figure I-17**. Ce type de fissure est fréquent en cas de coupes interrompues, ce qui est courant en fraisage. L'utilisation de l'arrosage aggrave ce phénomène. [4]



Figure I-17: Usure en peigne

– Ecaillage ou rupture de l'arête

L'écaillage ou la rupture de l'arête survient en cas de surcharge des contraintes de traction mécanique **Figure I-18**. Celles-ci sont dues à différentes causes telles que le martèlement des copeaux, une profondeur de coupe ou une avance excessive, des inclusions de sable dans la matière de la pièce, des arêtes rapportées, des vibrations ou une usure excessive de la plaquette.

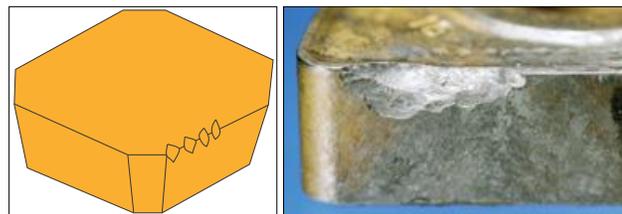


Figure I-18: Ecaillage ou rupture de l'arête

I.8.2.6. Les causes d'usure pour les outils de coupe

Elle est due essentiellement :

- À la diffusion des constituants de l'outil dans le copeau qui est un transfert homogène des molécules de l'outil sur la pièce au frottement pièce ou copeau /outil.
- À l'oxydation de la matière de l'outil qui est une attaque chimique par l'oxygène.
- À l'arrachement mécanique, l'adhésion dus au frottement.

I.9. La méthode des surfaces de réponse MSR

I.9.1. Les principes généraux

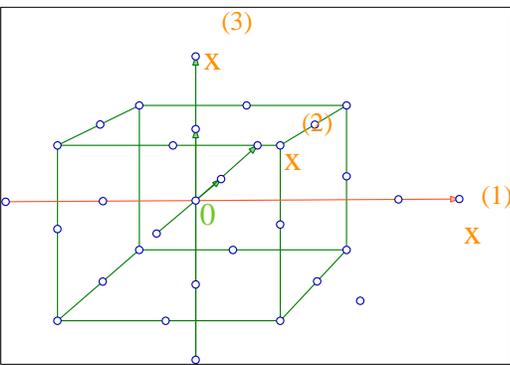
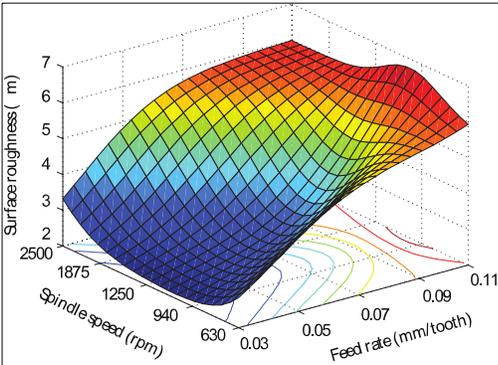
La méthode des surfaces de réponse (*MSR*) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants [5].

L'objectif de cette méthode est plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs.

I.9.2. Étapes de la méthodologie de surface de réponse

Le *Tableau I-3* schématise l'enchaînement des étapes de la méthodologie de surface de réponses, Les phases de construction du plan et de modélisation sont étroitement liées et peuvent être menées de manière itérative. Dans une première étape, on construit un plan d'expérience optimal pour le modèle le plus simple possible. Ensuite, ce plan pourrait, éventuellement, être complété si les phases de modélisation et de validation montrent que le modèle présupposé s'avère inadéquat [7].

Tableau I-3: Etapes de méthodologie de surface de réponse

1 ^{er} étape : Construction du plan expérimental	2 ^{ème} étape : Modélisation de la réponse Régression linéaire multiple Validation du modèle	3 ^{ème} étape : Représentation Graphique Surface de réponse
		

I.9.3. Planification expérimental

Pour une bonne planification expérimentale, il est souhaitable que le nombre d'expériences effectuées, soit le plus faible possible afin de réduire les besoins informatiques, le délai et les coûts d'expérimentation. Une bonne sélection des points pour l'expérimentation permettra de réduire la variance des coefficients de

notre modèle mathématique, ce qui rendra les surfaces de réponses obtenues plus fiables. Pour ce faire, il faut déterminer le plan d'expérience le plus approprié afin d'obtenir les expériences les plus intéressantes pour notre type de problème. Les plans utilisés dans le cadre d'une étude d'MSR sont des plans quadratiques tels que les plans centraux composites (Box-Wilson) ou les plans de **Box-Behnken**. Le plan central composite (CCD) est le plus souvent employé. Mais d'autres types de plan quadratique s'offrent à l'expérimentateur. [5]

I.9.4. Modélisation

Lorsque l'on utilise la MSR, on cherche à relier une réponse continue y à k facteurs continus et contrôlés X_1, X_2, \dots, X_k à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire :

$$y = f_{\beta}(X_1, X_2, \dots, X_p) + \varepsilon \dots\dots\dots(I-8)$$

Bien que la forme précise de la fonction de réponse $f/3$ soit inconnue, l'expérience montre que l'on peut en avoir une bonne approximation par un polynôme.

Dans le cas de deux facteurs, le modèle de régression linéaire est de la forme :

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \dots\dots\dots(I-9)$$

Il s'agit d'un des modèles les plus simples qui correspond à un modèle du premier degré avec interaction. Lorsque ce modèle est insuffisant pour décrire avec efficacité la réalité expérimentale, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs qui, dans la plupart des cas, est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés.

Un modèle de surface de réponses du second degré avec d variables peut s'écrire de la manière suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \dots\dots\dots(I-10)$$

Où :

x_i : Variables de prédiction codées appelées facteurs

β : Coefficient de régression

ε : Erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse.

Dans la phase d'expérimentation de (*MSR*), il convient de transformer les variables de conception réelles en variables codées, qui sont définies comme étant sans dimension avec une moyenne de zéro et le même écart-type. Le but de l'opération est de traiter tous les facteurs de la même manière et de façon plus aisée car, simplifiée. La règle de passage des variables courantes aux variables codées est :

$$x_i = \frac{2R_i - [R_{max} + R_{min}]}{[R_{max} - R_{min}]} \dots\dots\dots(I-11)$$

Où :
 x_i : Variables de prédiction centrée réduite (codée)
 R_i : Variable courante (naturelle, réelle)

Les coefficients de régression, paramètres inconnus du modèle (**II-10**), sont estimés par la technique des moindres carrés et la qualité d'ajustement du modèle est évaluée à l'aide d'outils classiques de régression linéaire multiple.

Le modèle d'approximation peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\hat{y} = Xb \dots\dots\dots(I-12)$$

$\hat{y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$: Estimation de la vecteur réponse des n réponses observées

X : La matrice de terme de modèle évalué aux points de conception

b : Est l'estimateur des moindres carrés du vecteur de régression β , dont la valeur est estimée en minimisant la somme des carrés de l'erreur SS_E définie par :

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \dots\dots\dots(I-13)$$

Une fois les modèles mathématiques obtenus, il est nécessaire de vérifier que ces modèles donnent une approximation adéquate du système réel à l'étude.

I.9.5. Validation des modèles

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des mesures statistiques importantes sont à considérer :

- Le coefficient de détermination statistique R^2
- le coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2
- L'erreur rms : RMSE.

Leurs définitions impliquent la partition de l'erreur totale :

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2 \dots\dots\dots(I-14)$$

En une somme de l'erreur accidentelle et de l'erreur systématique.

$$SS_T = SS_R + SS_E \dots\dots\dots(I-15)$$

Où: $\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}$ Est la moyenne des réponses.

Quant au coefficient de détermination R^2 il permet d'estimer la variation de la réponse autour de la moyenne qui peut être représentée par le modèle. Il est compris entre 0 et 1 et un R^2 de 1 exprime une correspondance parfaite entre l'évaluation et la valeur réelle ($\hat{y}_i = y_i$). Par contre, un R^2 de 0 signifie que l'évaluation est incapable de prédire la valeur réelle [7].

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \dots\dots\dots(I-16)$$

Le coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 est une mesure améliorée de R^2 . Contrairement à R^2 , R_{adj}^2 , n'augmente pas lorsque des paramètres redondants sont ajoutés à l'approximation de surface de réponse.

$$R_{adj}^2 = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2) \dots\dots\dots(I-17)$$

Quant à la RMSE, il s'agit d'une estimation de la déviation standard de l'erreur aléatoire et peut s'écrire :

$$MSE = \sqrt{\frac{SS_E}{(n-p)}} \dots\dots\dots(I-18)$$

I.10. Travaux de recherche (état de l'art)

Dans cet article de GAITONDE, VN, et AL [9] ont réalisé une étude expérimentale de rugosité de la surface dans le perçage à grande vitesse pour le polyamide non renforcé (PA6) et du polyamide renforcé avec 30% de fibres de verre (PA66 GF30) dans le perçage.

Les expériences ont été prévues selon la pleine conception factorielle d'expériences. Les effets de V_c et f sur R_a de ligne centrale, la crête maximum à la taille de vallée, et les comptes maximaux ont été analysés en développant les modèles mathématiques de troisième ordre basés sur MSR. L'analyse paramétrique indique clairement l'influence de la fibre renforcée sur l'état de la surface quand la coupe à grande vitesse dans le perçage est utilisée.



Figure I-19: Composantes percer pour : (a) Polyamides non renforcés (PA6), (b) Polyamides renforcés avec 30% de fibres de verre (PA66 GF30).

L’auteur développée un modèle mathématique pour chaque paramètre étudié aux multi-niveaux dans ordre pour étudier l’effet de **non-linéarité** des paramètres de processus. Par conséquent, des modèles mathématiques basés sur l’MSR de troisième ordre pour la rugosité de la surface moyenne de ligne centrale, (R_a) et (R_z) ont été développés avec (v) et l’avance (f) comme paramètres de processus. Est-il obtenu le modèle suivant :

$$Ra(PA6) = 18.19515 - 0.12741v - 1.70535f + 0.022854vf + 0.0000705v^2 + 1.5429149f^2 + 0.00000018v^3 + 0.01119f^3 - 0.01119f^3 - 0.000034v^2 f + 0.000139vf^2 \dots\dots\dots (I-19)$$

$$Ra (PA66GF30) = 0.921186 - 0.0093v - 1.199911f + 0.002651vf + 0.000026v^2 - 0.31879018f^2 + 0.0000000658v^3 + 0.021875f^3 - 0.000003v^2 f + 0.000093vf^2 \dots\dots\dots (I-20)$$

$$Rz(PA6) = 87.8253 - 0.61022v - 6.29508f + 0.108452vf + 0.000429v^2 - 1.00299695f^2 + 0.000000739v^3 + 0.065949f^3 - 0.00016 + 0.0000623vf^2 \dots\dots\dots (I-21)$$

$$Rz (PA66GF30) = 12,85267 - 0,10622v - 4,856366f + 0,023728vf + 0,00005v^2 + 1,49324098f^2 + 0.000000334v^3 + 0,102912f^3 - 0.000029v^2 + 0.00048vf^2 \dots\dots\dots (I-22)$$

Les résultats trouvés par les chercheurs dans le cadre de ce travail sont comme suite :

- Il existe des relations non linéaires entre la rugosité de surface et les conditions de coupe justifié l'utilisation du modèle à base de (*MSR*) troisième ordre.

- Les valeurs R_a et R_z pour PA66 GF30 est faible par rapport au matériau de PA6 pour toutes les valeurs de l'avance et la vitesse.
- Le R_a et R_z diminuent avec l'augmentation de la vitesse d'avance lorsque la vitesse est maintenue à 4000 tr/min et 40.000 tr/ min, alors qu'ils montrent tendance à la baisse lorsque la vitesse est à 8000 m/min.

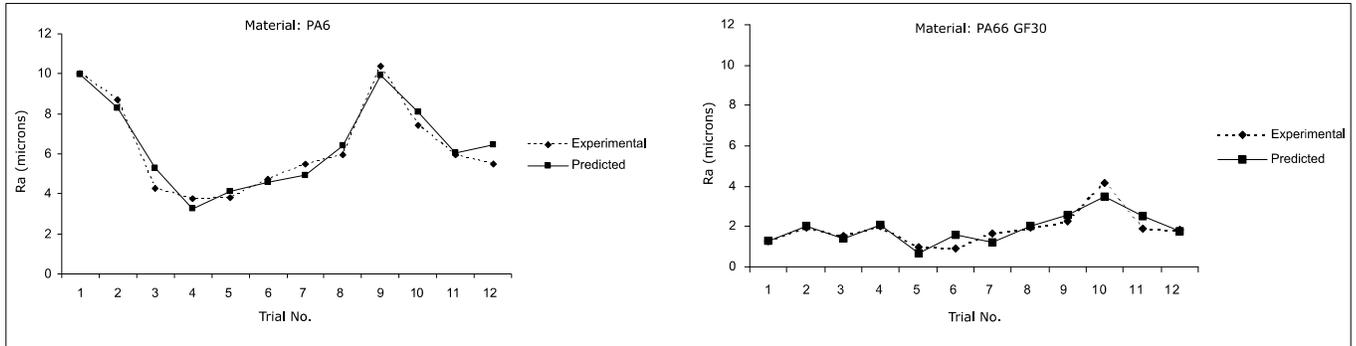


Figure I-20: Comparaison des valeurs expérimentales et prévues de R_a .

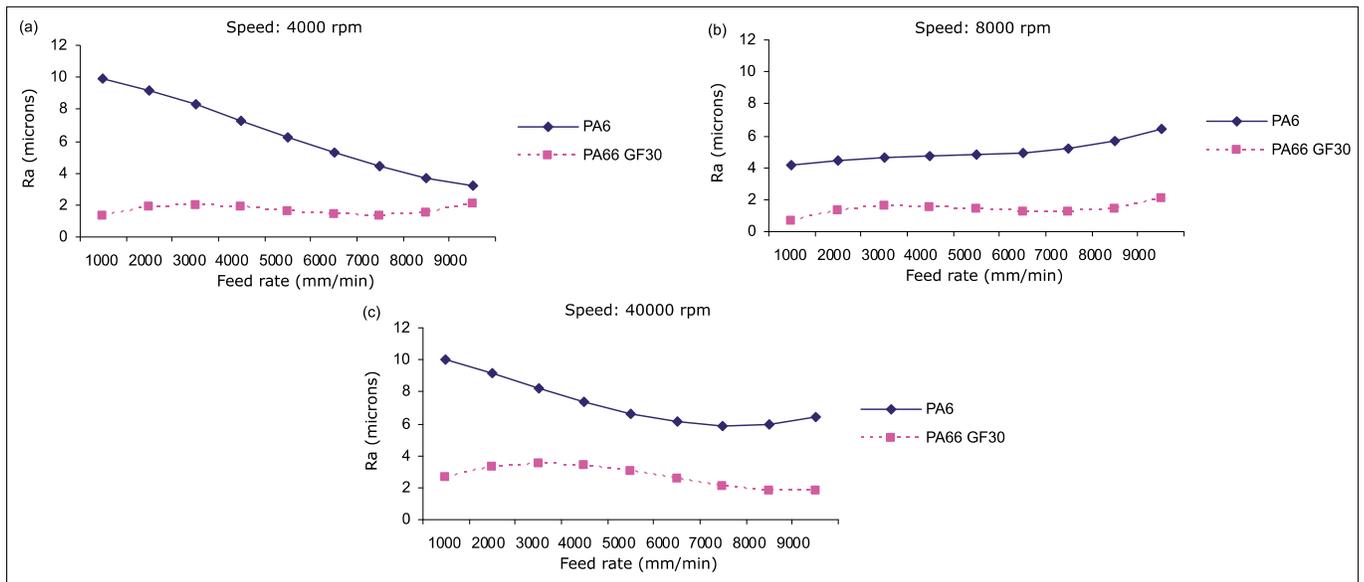


Figure I-21: Vitesse de coupe et avance par tour d'effet sur R_a

L'étude de **Madic, Milos. Et AL [10]** basé sur Optimisation de rugosité de la surface en tournant le polyamide en utilise l'approche d'ANN-IHSA et présente un approche en accouplant l'(ANN) et l'(IHSA) pour déterminer les réglages optimaux de paramètre de coupe pour la rugosité de la surface de minimisation le tournage de polyamide.

Une rugosité de la surface de modèle d'ANN a été développée en termes V_c , f , a et r de l'outil en utilise le plan d'expérience selon taguchi.

Les réglages optimaux de paramètre de coupe ont été déterminés en appliquant l'IHSA au modèle développé de rugosité de la surface d'ANN. Les résultats prouvent que l'approche proposée d'optimisation peut être efficacement utilisé pour l'optimisation des réglages de paramètre de coupe pendant le tournage de PA6 non renforcé. Bien que la détermination des paramètres d'ANN et d'IHSA est simplifiée en utilise le plan taguchi.

Le matériau utilisé est le PA6 non renforcé, L'expérience longitudinale de tournage a été effectuée dans la longueur de 100 mm et la pièce de 92 [mm] de diamètre sur la machine universelle de tour, une gamme de vitesse $n= 20\div 2000$ t /min, et une gamme longitudinale d'avance par tour outil de coupe $f= 0.04\div 9.16$ [mm/tr]. La géométrie d'outil :

Angle d'attaque $\gamma= 7^\circ$, angle de dépouille $\alpha= 7^\circ$, angle d'arête tranchante $\chi=93^\circ$, cornière d'inclination d'arête tranchante $\lambda= 0^\circ$.

La capacité de performance du modèle développé l'ANN pour estimer (Ra) a été examinée et basé sur le coefficient de corrélation entre les prévisions d'ANN et les valeurs expérimentales en utilise les essais **Figure I-22**.

Il peut voir que les prévisions d'ANN sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Par conséquent le modèle d'ANN peut être utilisé pour effectuer l'évaluation fiable de la rugosité (Ra) et peut être utilisé comme fonction objective pour le but d'optimisation.

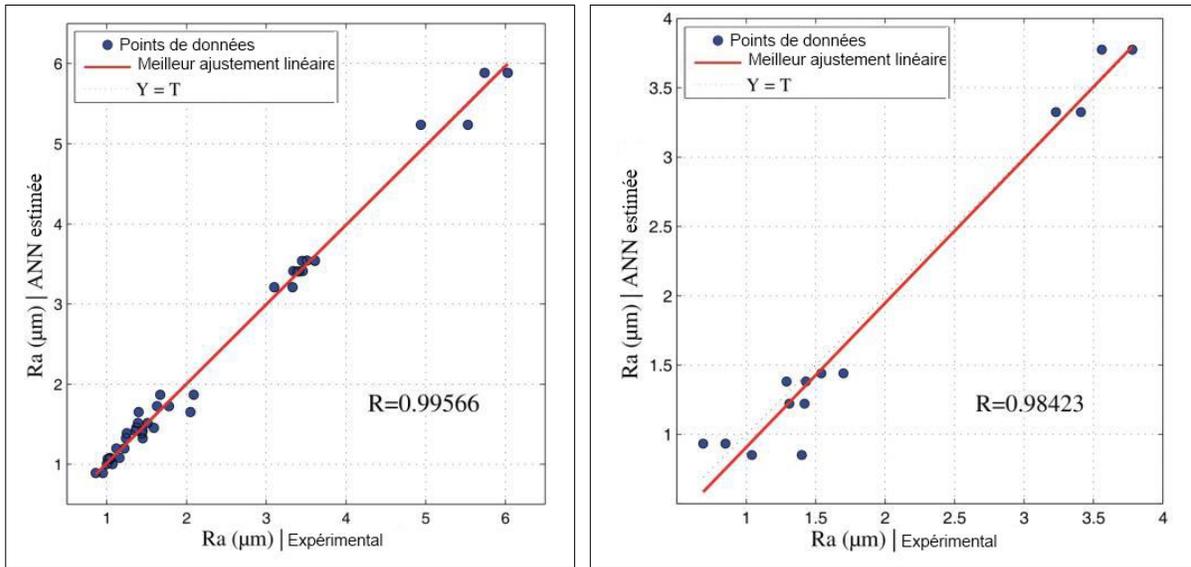
Les résultats obtenus d'optimisation sont donnés dans le **Tableau I-4**.

Tableau I-4: Résultat et comparaison d'optimisation

Réglage de paramètres de coupe optimal				Ra [μm]	\overline{Ra} [μm]
V_c [m/min]	f [mm/rev]	a [mm]	r [mm]	ANN+IHSA	Expérience
65.03	0.049	1	0.8	0.6507	0.7274

Cette étude a discuté sur l'application d'ANN et a amélioré l'algorithme de recherche d'harmonie pour l'optimisation de la rugosité de la surface quand tournage de polyamide PA6. L'expérience a été effectuée selon la méthode expérimentale de la conception de taguchi et les données obtenues ont été employées pour développer le modèle d'ANN pour la rugosité de la surface moyenne en termes de V_c , f , a et r de l'outil.

Le modèle développé est utilisé comme fonction objective dans l'algorithme de recherche d'harmonie, et les arrangements optimaux de paramètre de coupe rapportant la rugosité de la surface moyenne minimum ont été obtenus. Les résultats d'optimisation alors ont été expérimentalement validés. L'approche proposée indique que l'ANN peut être efficacement utilisée pour la modélisation mathématique, tandis que l'IHSA peut être utilisé effectivement pour trouver les arrangements optimaux de paramètre de coupe. Bien que la détermination des paramètres d'ANN et d'IHSA soit tout à fait complexe pour le problème, elle peut être simplifiée en utilise la conception expérimentale de taguchi.



(a) : L'ensemble de données de formation

(b) : l'ensemble d'essais

Figure I-22: Comparaison des évaluations d'ANN avec des valeurs expérimentales

Dans ce travail de **Davim, J. Paulo et AL [11]** présente une étude expérimentale sur procédé de coupe pour les polyamides PA 6 les polyamides PA 66-GF30 (renforcé avec des fibres de verre de 30%). L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence du renforcement de fibres de verre sur le taux de compression de copeau.

L'objectif de ce travail expérimental est d'évaluer l'influence de la fibre de verre sur le modèle de coupe pendant le procédé de tournage de petits objets sous des paramètres de coupe mis en tête.

Le **Tableau I-5** présente les valeurs prévues du τ de contrainte tangentielle, σ de contrainte normale, et la déformation de copeau lié au procédé de coupe.

Le Contraintes normales σ diminué avec (f) pour le PA 66-GF30 présente des valeurs plus grandes pour le σ que la PA 6 due à l'effet du renfort. Cependant, les contraintes tangentielles sont pas sensiblement influencées par f et le PA 66-GF30 présente de plus petites valeurs de τ que la PA 6.

Tableau I-5: Valeurs de τ de contrainte tangentielle, σ de contrainte normale et ϵ de déformation

V [m/min]	f [m/min]	PA6			PA66 GF30		
		σ [N/mm ²]	τ [N/mm ²]	ϵ	σ [N/mm ²]	τ [N/mm ²]	ϵ
200	0.05	124.40	101.61	2.13	178.17	83.17	2.21
200	0.1	106.70	71.29	2.09	109.53	87.77	2.09
200	0.15	105.95	95.27	2.05	118.51	99.26	2.09
200	0.2	89.43	95.53	2.05	115.56	83.90	2.08
100	0.05	127.60	101.29	2.20	170.45	77.93	2.20
100	0.1	106.59	95.78	2.13	131.37	84.52	2.10
100	0.15	96.02	96.42	2.10	119.73	84.43	2.09
100	0.2	89.11	96.50	2.08	115.12	81.42	2.08
50	0.05	136.76	102.73	2.21	179.06	81.81	2.20
50	0.1	113.62	93.85	2.16	137.76	85.40	2.09
50	0.15	113.13	94.34	2.12	127.87	98.29	2.08
50	0.2	94.80	94.57	2.10	123.08	83.23	2.07

Le polyamide PA 6 présente des valeurs plus grandes des contraintes tangentielles et de la déformation de copeau que le PA 66-GF30.

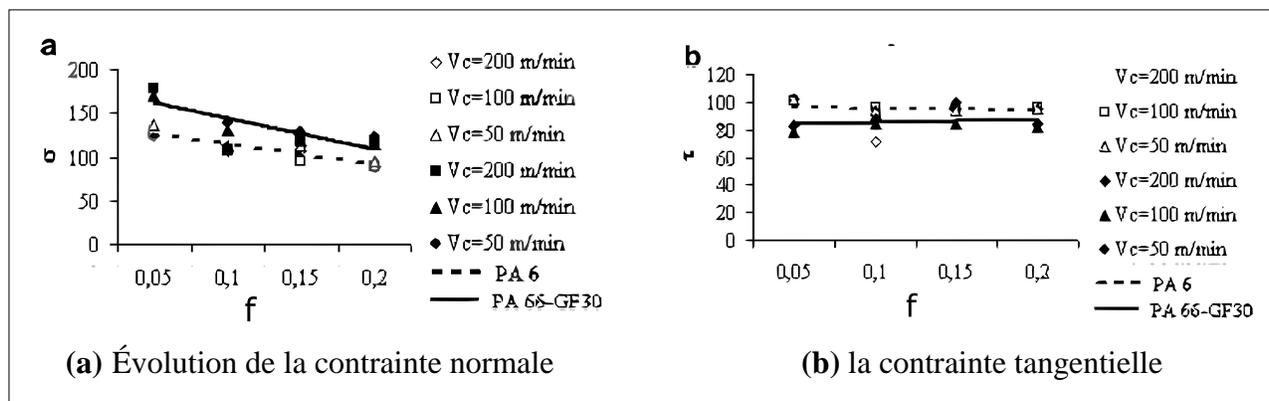


Figure I-23: Évolution des contraintes en fonction des paramètres de coupe

Pour l'étude de Lazarević [12] et AL étudiée Conditions robustes pour la minimisation d'efforts de coupe dans le procédé de tournage de polyamide, L'optimisation des efforts de coupe est critique dans des fonctionnements de tournage parce que des efforts de coupe sont directement liés à plusieurs caractéristiques de fonctionnement d'usinage. L'étude se concentre sur l'approche modelé d'optimisation pour la minimisation des efforts de coupe dans le procédé de tournage de polyamide.

L'influence de quatre paramètres de coupe, tels que (V_c , f , a_p) et r de l'outil sur les efforts de coupe principaux s'est analysée sur la base du tableau orthogonale de taguchi. Les résultats expérimentaux rassemblés se sont analysés avec l'aide de l'analyse des moyens et de l'analyse de la variance. Les réglages de tournage optimaux proches de paramètres déterminés considérant la méthodologie de la conception robuste de taguchi.

Tableau I-6: Paramètres et niveaux de tournage utilisés

Paramètre de coupe	Niveau		
	1	2	3
A - V_c [m/min]	65.03	115.61	213.88
B - f [mm/tr]	0.049	0.098	0.196
C - a_p [mm]	1	2	4
D - r [mm]	0.4	O.S	-

L'étude présenté l'optimisation robuste méthodologie pour la minimisation des efforts de coupe principaux dans le procédé de rotation de polyamide. Quatre paramètres de tournage ont été variés dans l'expérience, c.-à-d. vitesse de coupe, avance par tour, profondeurs de passe et rayon du bec de l'outil. Sur la base des résultats expérimentaux et de l'analyse dérivée, des conclusions suivantes peuvent être tirées :

Les profondeurs de passe de suivies de l'avance par tour sont la plupart paramètre de coupe significatif affectant la force efforts de coupe.

- L'effet de la vitesse de coupe est beaucoup plus petit, alors que l'effet du rayon du bec de l'outil est négligeable.
- Les effets d'interaction des paramètres de coupe ne sont pas prononcés.
- Les résultats obtenus proposent que la vitesse de coupe élevée, l'avance par tour et les profondeurs de passe inférieures, et le plus petit rayon du bec de l'outil soient avantageux pour la minimisation de la force d'efforts de coupe dans le procédé de rotation de polyamide.

La méthodologie robuste d'optimisation proposée par (G. Taguchi) donne l'approche simple et modelées pour l'optimisation de processus.

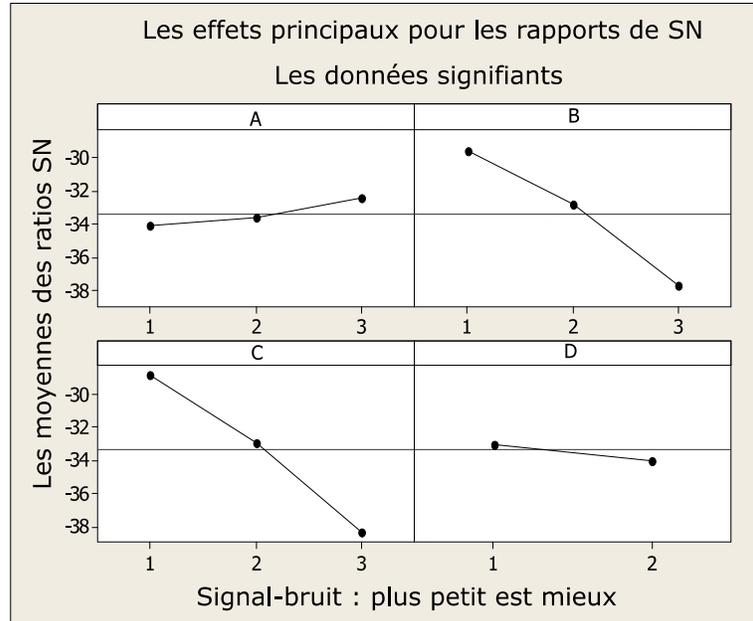


Figure I-24: L'effet principal de rapport de S/N pour les efforts de coupe principaux.

Dans l'article de **Madić, M. [13]** et **AL** présente la méthodologie de la modélisation mathématique de la rugosité de la surface dans le tournage du polyamide basé sur le ANN.

Le modèle de rugosité de la surface a été développé en termes de paramètres principaux de coupe tels que (V_c, f, ap) et r de l'outil. Selon taguchi. En plus de la modélisation, en appliquant la méthode recto d'optimisation, la rugosité de la surface de minimisation d'arrangement optimal de paramètre de coupe, était déterminée. De l'analyse modèle exécutée en produisant de la réaction 3D représente graphiquement les conclusions suivantes sont tirés **[6]**.

L'avance par tour est le facteur dominant affectant la rugosité de la surface, suivie du rayon du bec de l'outil et des profondeurs de passe. Quand la vitesse de coupe, son effet n'est pas très important. La rugosité de la surface minimale donne droit avec la combinaison de la basse avance par tour, des basses profondeurs de passe, de la basse vitesse de coupe et du rayon du bec de l'outil élevé.

l'ANN basée modèle mathématique est développée afin de rapporter les paramètres de coupe (V_c, f, ap) et r de l'outil) et la rugosité de la surface dans le tournage de polyamide.

Des expériences ont été exécutées selon la méthode de taguchi **[8]** et les données obtenues ont été utilisées pour la formation d'ANN. Après la formation réussie, l'ANN développée a été avec succès validée sur des essais en utilise trois mesures statistiques de performance. Vu l'architecture d'ANN, l'activation utilisée

fonctionne, et des poids et les polarisations de l'ANN qualifiée, le modèle mathématique pour la rugosité de la surface ont été développés. En appliquant la méthode recto d'optimisation sur le modèle développé de rugosité de la surface, l'arrangement optimal de paramètre de coupe, rugosité de la surface de minimisation, était déterminé. Les résultats d'optimisation alors ont été expérimentalement vérifiés. Les résultats de l'analyse exécutée prouvent que f et r de l'outil sont les facteurs les plus influents sur la rugosité de la surface. Les profondeurs de passe et la vitesse de coupe ont une influence négligeable sur la rugosité de la surface. En résumé, on lui a montré que les rapports complexes d'entrée et de rendement dans l'usinage peuvent être efficacement modélés par l'ANN et représenté dans la **Figure I-25**, a) $V_c = 65.03$ m/min, $r = 0.4$ mm ; b) $V_c = 65.03$ m/min, $r = 0.8$ mm, c) $V_c = 213.88$ m/min, $r = 0.4$ mm ; d) $V_c = 213.88$ m/min, $r = 0.8$ mm.

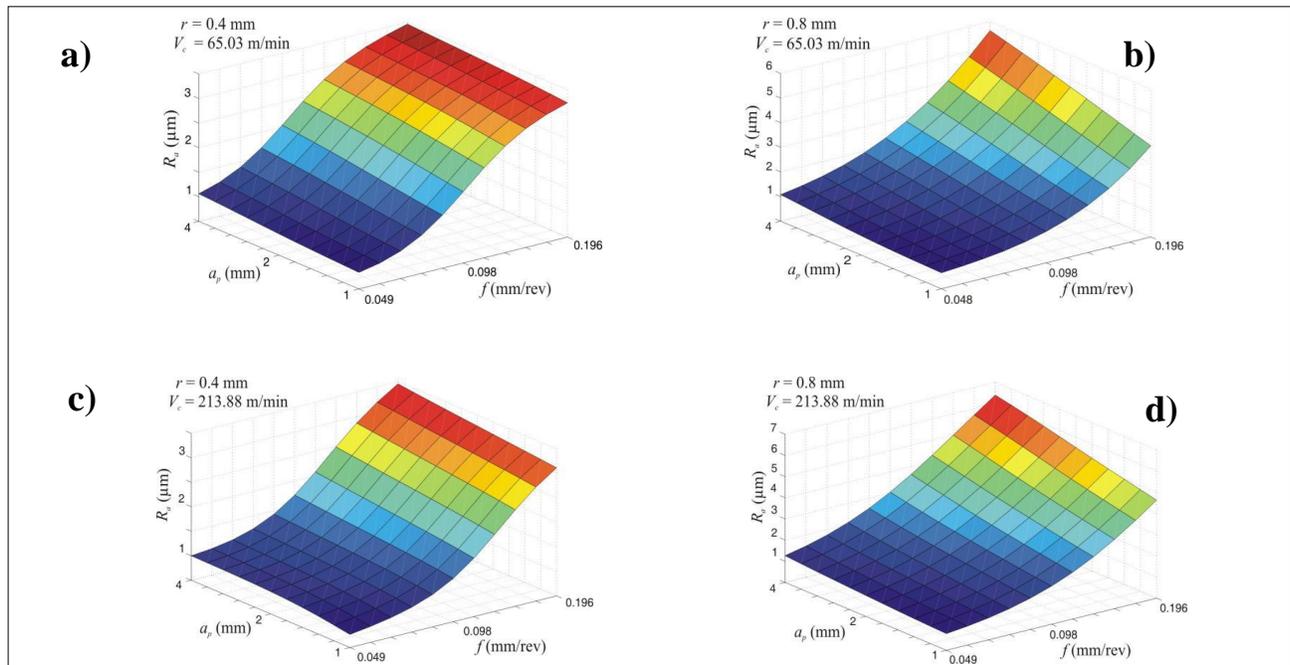


Figure I-25: L'influence de l'avance par tour et profondeurs de passe à de diverses combinaisons de la vitesse de coupe et du rayon du bec de l'outil

I.11. Conclusion

Ce chapitre a été réservé à l'étude bibliographique sur la coupe des polyamides en générale et la modélisation de la rugosité en particulier. La dernière partie de cette étude bibliographique est consacrée aux travaux de recherche en tournage et le perçage et particulièrement la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe. Cette étude nous a permis de comprendre les phénomènes physiques intervenants dans le processus de coupe et aussi les méthodes modernes d'optimisation des conditions de coupe pour la modélisation de la rugosité.

Chapitre III

Procédure Expérimentale

Ce chapitre présente la procédure expérimentale de travail, et le matériau de travail et les matériels utilisés tel que le machine-outil et aussi Matériels de mesure intégrés pour la mesure des efforts de coupe, et la mesure de la rugosité, Réglage nécessaire pour déterminer les conditions de coupe, nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f , a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (rugosité et efforts de coupe) en utilisant la méthodologie de surface de réponse MSR à l'aide des logiciels statistiques d'optimisation.

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des moyens exploités pour la réalisation des expériences, afin de caractériser le comportement du couple (outil-matière). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés et qui servent au suivi de l'évolution de l'usure, de l'effort de coupe générée et de la rugosité de surfaces obtenue. Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique et au laboratoire de LMS à l'Université de 08 Mai 1945.

II.2. Banc d'essais et équipement de mesure

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences. Un banc d'essais comportant un tour à charioter et à fileter, une plateforme Kistler pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée et un microscope pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe.

II.3. Matériels utilisés

II.3.1. Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque « TOS TRENCIN », Modèle SN 40C de puissance sur la broche égale à 6,6 KW *Figure II-1*, Les fréquences de rotation, les avances et les vitesses disponibles sur la machine présenté dans le *Tableau II-1*.

Tableau II-1: Les fréquences de rotation et les avances disponibles sur la machine

Les fréquences de rotation disponibles sur le tour	45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400 et 2000 tr/min
Les avances disponibles sur la machine	0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24;...0,8... ; 6,4 mm/tr



Figure II-1: Machine de Tour à charioter et à fileter modèle SN40

La Figure II-2 illustre la machine de tour à charioter et à fileter modèle SN 40 pour les essais de travail.

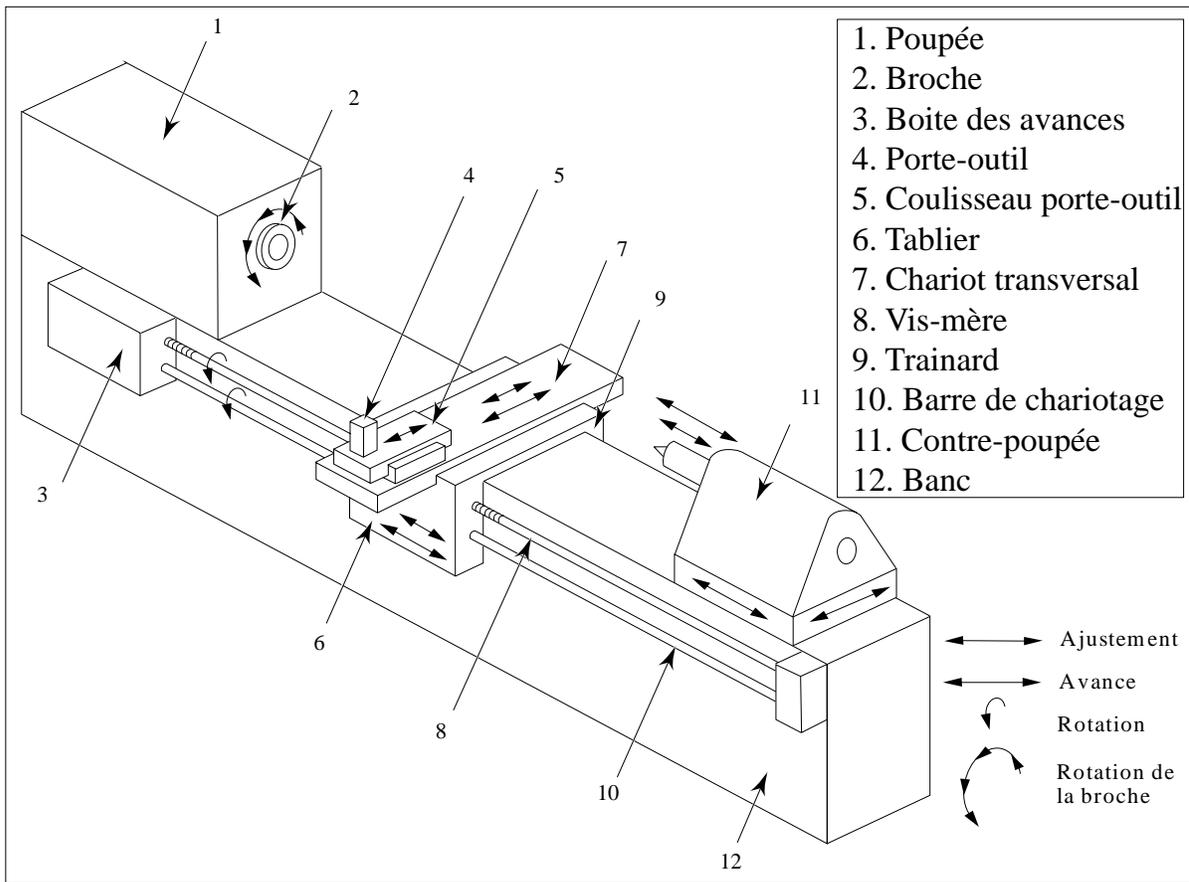


Figure II-2: Illustration pour la machine de tour à charioter et à fileter modèle SN40

II.3.2. Matériels de mesure

II.3.2.1. Plateforme kistler

- **Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe**

Pour connaître l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne dynamomètre (KISTLER9257 B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe.



Figure II-3: Plateforme d'effort de coupe KISTLER

Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en site : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz *Figure II-5*.

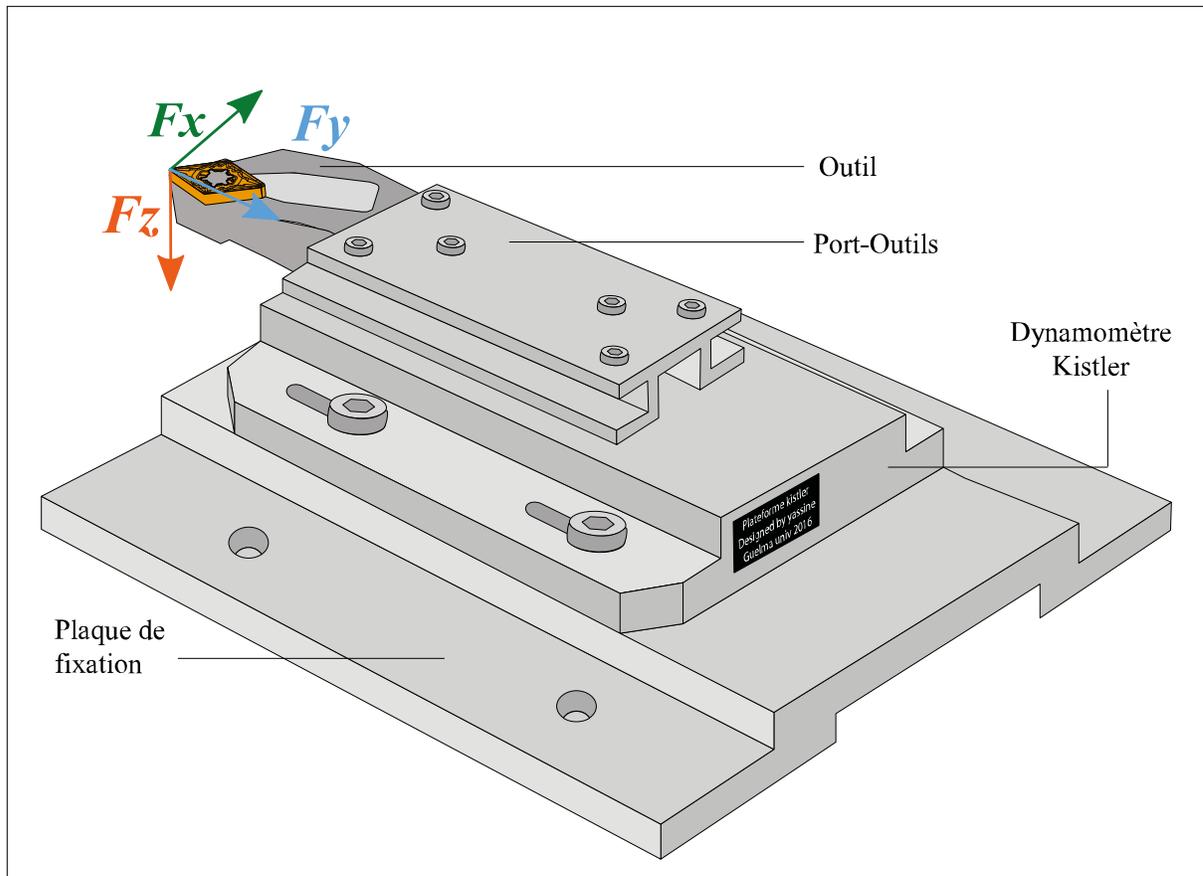


Figure II-4: Schéma qui illustre le Montage du dynamomètre sur la table de la machine

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques. Ces dernières sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.

Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes :

- Force axiale : $F_x (F_a)$
- Force radiale : $F_y (F_r)$
- Force tangentielle : $F_z (F_v)$.

Les couches d'isolation s'apparièrent dans la **Figure II-5** et aussi les couches d'isolation pour la plateforme Kistler.

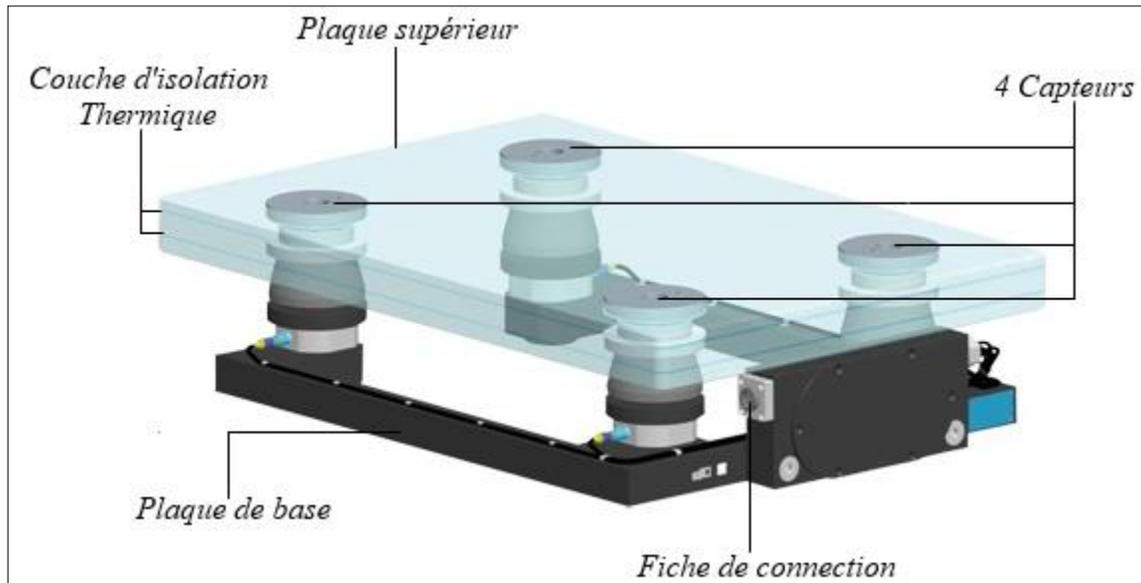


Figure II-5: Capteur d'effort de coupe KISTLER

- **Chaîne de mesure et caractéristiques**

Dynamomètre à trois composantes (9257 B) : la porte outil type 9403 visible est employée pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26.

Grande rigidité, fréquence propre très élevée :

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



Figure II-6: Amplificateur de la charge KISTLER

II.3.2.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo) *Figure II-7*. Il est constitué d'une pointe endiamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.



Figure II-7: Rugosimètre pour la mesure de la rugosité SurfTest 201 (Mitutoyo)

II.3.2.3. Equipements supplémentaires

- Un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce ;
- Un appareil photo-numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés.
- Nous avons des logiciels dans notre étude et qui sont :
 - Logiciel **Dynoware** pour la mesure des efforts au laboratoire et représenté dans la *Figure II-8*.

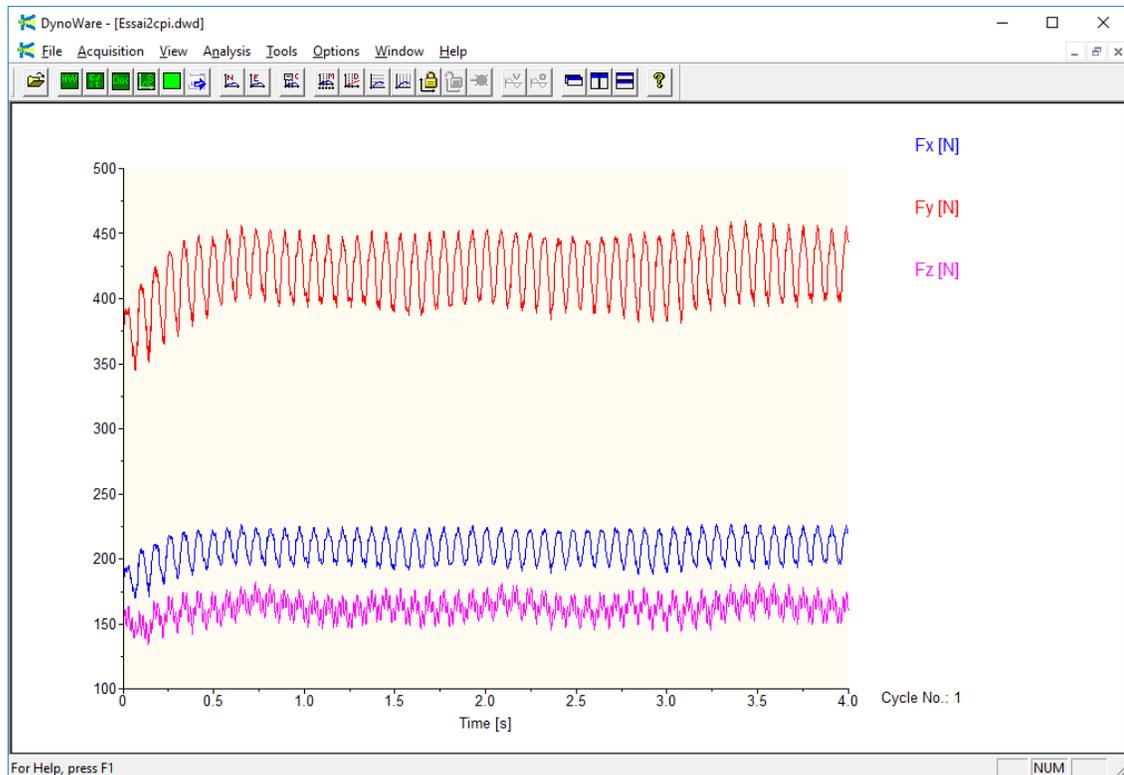


Figure II-8: Logiciel Dynoware développé par Kistler

- Logiciel **Design Expert** qu'il développé par la société de **Stat-ease** pour effectuer l'optimisation de la rugosité en utilise la méthodologie de surface de réponse (*RSM*). voir la *Figure II-9*.

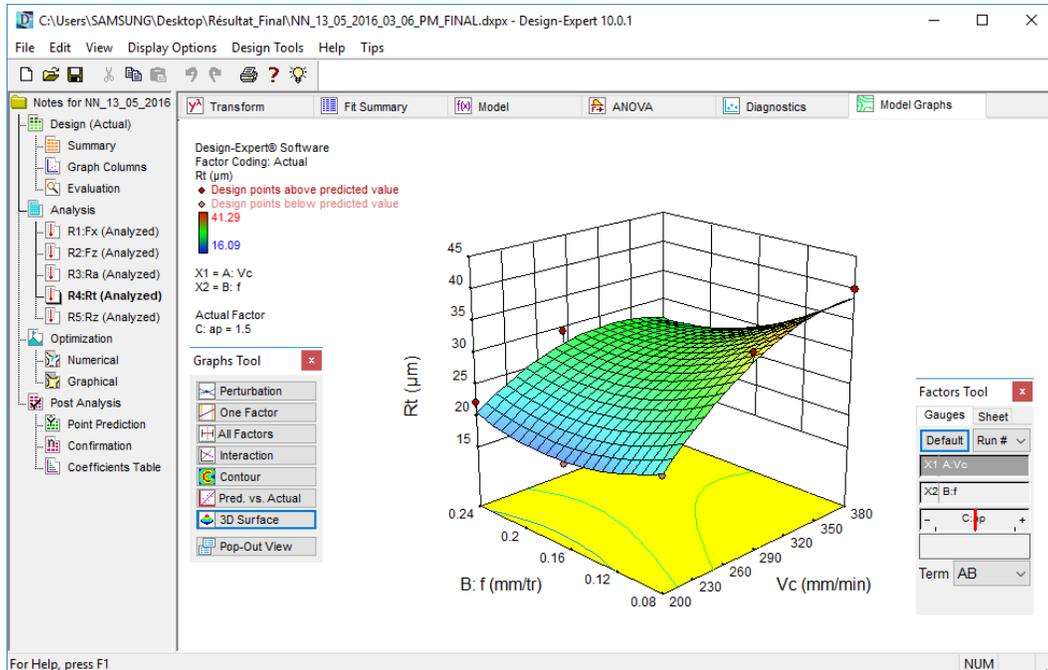


Figure II-9: Interface de logiciel Design Expert développé par Stat-ease

- Logiciel **MiniTAB v 16** pour la modélisation des efforts de coupe et la rugosité de surface pour obtenir les modèles de prédiction **Figure II-10**.

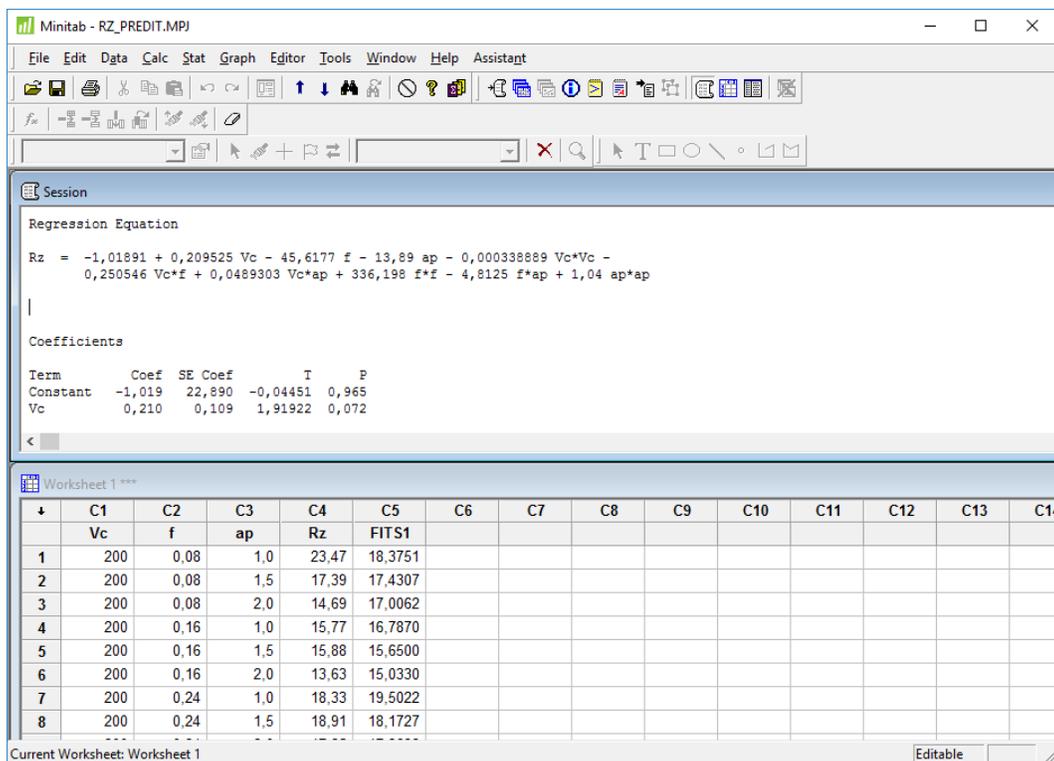


Figure II-10: Interface de logiciel MiniTAB v16

II.3.3. Type de polyamide pour l'usinage

Le matériau utilisé dans notre étude c'est le Polyamide PA6 de Couleurs blanche **Figure II-11**, tous les caractéristiques Physiques et Thermiques pour le Polyamide PA6 données dans le **Tableau II-2**.

Tableau II-2: Les propriétés physiques et thermiques pour le polyamide PA6

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

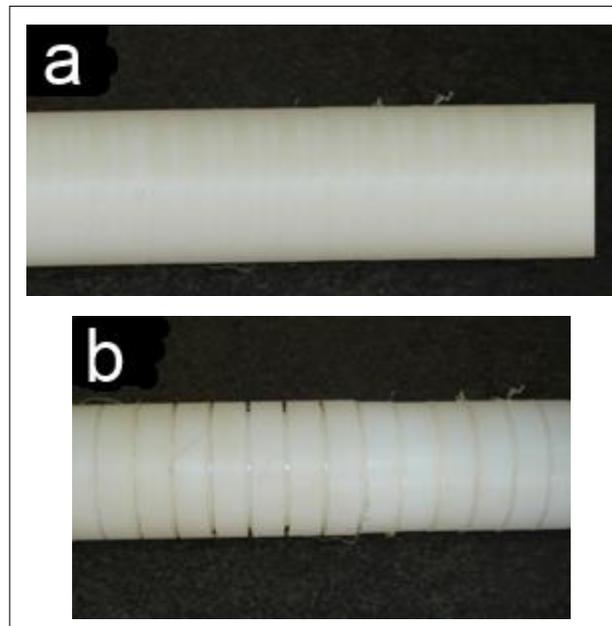


Figure II-11: Le polyamide PA6 pour l'étude

II.3.4. Outils de coupe

II.3.4.1. Plaquette de coupe

Le plaquette est amovible de forme carrée *Figure II-12*.



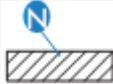
Figure II-12: Plaquettes de coupe utilisée

Toutes les informations qui concernent le plaquette de coupe sont regroupées dans le *Tableau II-3* et *Tableau II-4*.

Tableau II-3: désignation des plaquettes de coupe

<i>Matériaux de coupe</i>	<i>Désignation</i>	<i>codes</i>	<i>Géométrie</i>
carbure	SPUN 120408	SPUNT150	SPUN 12-04-08

Tableau II-4: Description dimensionnelle des plaquettes

<i>Désignation</i>	<i>Forme de la plaquette</i>	<i>Angle de dépouille</i>	<i>Mode de fixation</i>	<i>Longueur de l'arête de coupe</i>	<i>Epaisseur de la plaquette</i>	<i>Rayon du bec r_ϵ</i>
SPUN 12-04-08	carré	11°		12 mm	3,18 mm	0,8 mm

II.3.4.2. Porte-outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil dont la désignation est indiquée au *Tableau II-5*.

Tableau II-5: Caractéristiques de porte plaquette utilisé.

<i>Désignation</i>	<i>Marque</i>	χ	α	γ	λ	χ_r
CSBNR25x25M12	TIZIT SIMPLEX	75°	6°	-6°	-6°	15°



Figure II-13: Porte outil utilisé.

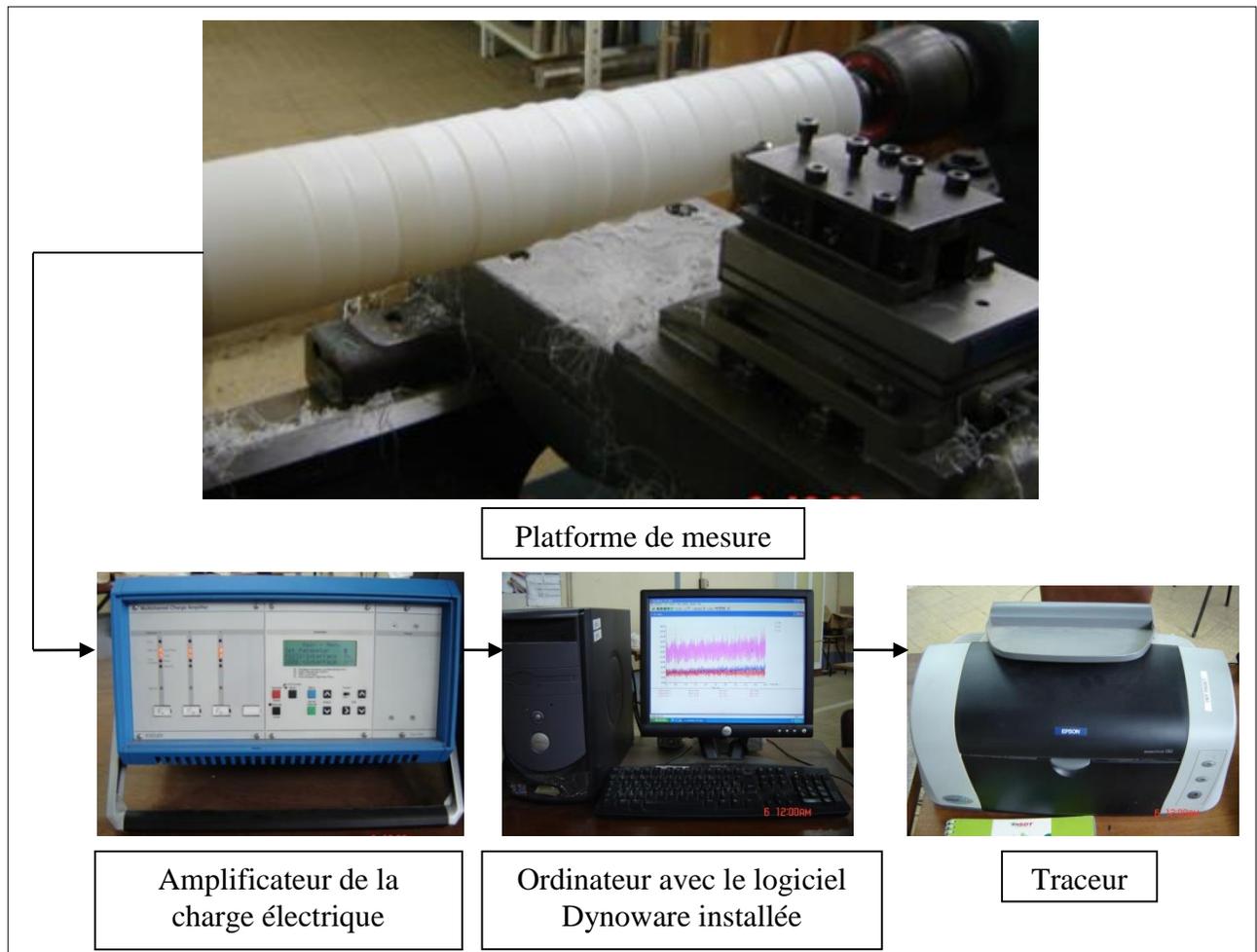


Figure II-14: Montage de la chaîne et plateforme de mesure des efforts de coupe.

II.4. Planification des expériences

Définition

Entre le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer, les éléments du régime de coupe (V_c, ap, f), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine, ...etc.). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. Les efforts de coupe, la rugosité et le volume de copeau enlevé, représentent les paramètres de sortie.

II.4.1. Méthodologie de recherche

Un très grand nombre de facteurs agit sur l'usinabilité d'un matériau, tels que les paramètres du régime de coupe (V_c, ap, f), la géométrie de l'outil ($\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \chi, \dots$, etc.), les caractéristiques du matériau usiné (dureté, (R_r), le pourcentage de carbone % C, le pourcentage des éléments d'addition, etc.) et les conditions de travail, etc.

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

II.4.2. Méthode de planification des expériences

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

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

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c, f, ap) sur les diverses fonctions d'optimisation (rugosité et efforts de coupe, puissance de coupe et débit de copeau) en utilisant la méthodologie de surface de réponse MSR à l'aide de logiciel statistique d'optimisation Design Expert pour les résultats obtenus comme la forme suivant :

$$N = q^k \dots\dots\dots(II-1)$$

Où :

N : Nombre d'essais

q : Nombre de niveaux de variations des facteurs de base

k : Nombre de facteurs de base

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)), Nous avons alors : $N=3^3=27$.

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le **Tableau II-6** selon le plan de taguchi.

Tableau II-6: Matrice de planification pour un plan L27

N° d'essai	Facteurs		
	Vc [m/min]	f [mm/tr]	ap [mm]
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

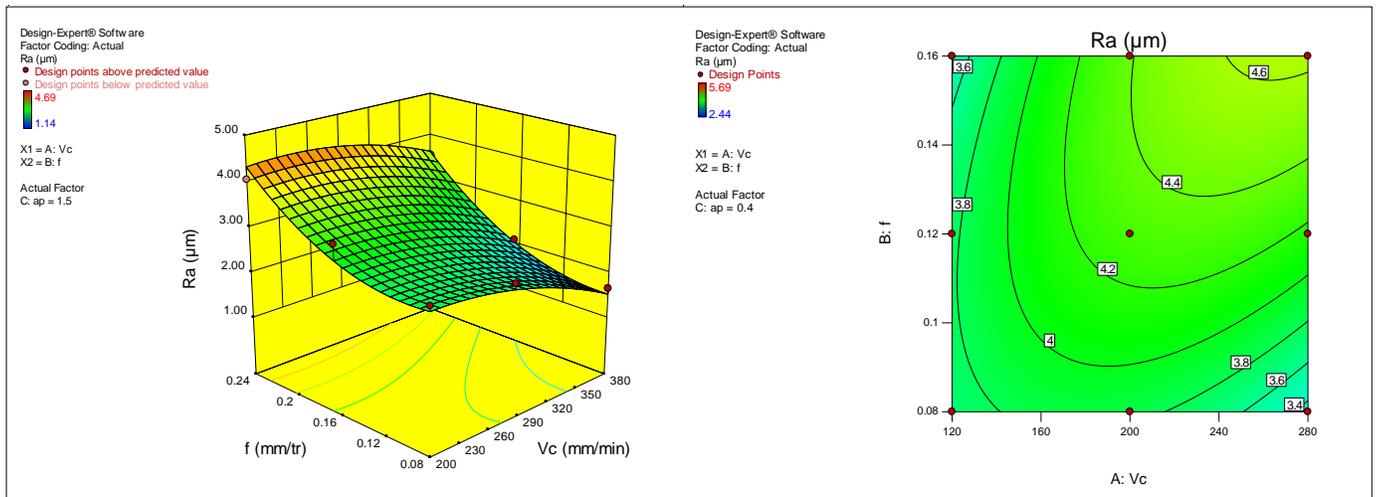


Figure II-15: Exemple de surface de réponse 3D et graphique de contour

II.5. Conclusion

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

Nous avons présenté aussi la méthodologie d'optimisation qui développe le modèle mathématique et le régime optimale d'usinage pour la rugosité mesurée.

Chapitre III

Modélisation de la rugosité et des efforts de coupes

Ce chapitre, présente une étude statistique qui repose sur l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression, afin de déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés tels que : les efforts de coupe, la rugosité de surface. Le plan d'expérience utilisé est le plan factoriel complet 3^3 avec un nombre de 27 essais. Ainsi les valeurs des coefficients de corrélations et les constantes associées ont été calculées. Une comparaison entre les modèles mathématiques obtenus par la méthode de régression et les données expérimentales a été faite.

III.1. Introduction

Le travail pour ce chapitre consacré pour la déterminons les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe (V_c , f , ap) et les paramètres technologiques d'usinage étudiés (*Effort de coupe*, *Rugosité de surface*, *puissance de coupe et débit de copeau*), lors de l'usinage de Polyamide PA6 avec un outil en carbure métallique. Ils permettent aussi d'optimiser le processus de coupe, Pour faire une analyse de la variance (*ANOVA*) et pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (*RMS*), on a utilisé par l'utilisation deux logiciels statistiques « *MiniTAB 16*, *Design-Expert 10* ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés, et de proposer des modèles mathématiques de prédiction pour chaque phénomène étudié.

La méthodologie de surface de réponse est une procédure visant a déterminé une relation entre les paramètres indépendants du processus d'entrée et les données de sortie (réponse du procédé). Cette procédure comprend 6 étapes [18] :

- 1) Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées,
- 2) Adopter un plan de conception expérimentale,
- 3) Effectuer une analyse statistique de la variance (*ANOVA*) des variables d'entrées indépendantes afin de trouver les paramètres les plus significatifs qui affectent la réponse,
- 4) Effectuer une analyse de régression avec le modèle quadratique de (*MSR*),
- 5) Déterminer la situation du modèle quadratique de (*MSR*) et enfin,
- 6) Optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédites.

Le concept de surface de réponse modélise une variable dépendante Y , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1 , X_2 , ..., X_k , permettant d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. Dans la présente étude, la relation entre les paramètres d'entrées (conditions de coupe) à savoir la vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (f), la profondeur de coupe (ap) et les paramètres de sorties (*efforts de coupe*, *rugosité*, *puissance de coupe et débit de copeau*).

III.2. 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, et elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie [15]. 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 (Non signifiant)
- Si $P < 0,05$, le paramètre est signifiant

La somme des carrés (*SC*) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale

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

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

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

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \dots\dots\dots(III-2)$$

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

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \dots\dots\dots(III-3)$$

Avec : *MC_e* les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA (*Contribution en %*), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat [16] et [17].

$$Cont.\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \dots\dots\dots(III-4)$$

III.3. Analyse de régression

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre l'entrée, appelé les conditions de coupe (vitesse de coupe (V_c), La vitesse d'avance (f), La profondeur de passe (ap)) et la sortie (Y), défini comme un des aspects d'usinabilité (paramètres technologiques d'usinage) est donnée par :

$$Y = f(V_c, f, ap) \dots\dots\dots(III-5)$$

Où : Y est la fonction de réponse.

L'approximation des Y est proposé au moyen d'un modèle mathématique non-linéaire (quadratique), qui est approprié pour l'étude des effets d'interaction des paramètres de coupe. Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale est donné par :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \varepsilon_{ij} \dots\dots\dots(III-6)$$

$$\varepsilon_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij} \dots\dots\dots(III-7)$$

Où : b_0 est le terme constant de l'équation de régression, les coefficients $b_1, b_2 \dots b_k$ et b_{11}, b_{22}, b_{kk} sont les termes linéaires et quadratiques respectivement, tandis que b_{12}, b_{13}, b_{k-1} sont les termes d'interaction.

X_i représente les paramètres d'entrée (V_c, f, ap) ε_{ij} présente l'erreur d'ajustement pour le modèle de régression. y_{ij} est l'observation correspondante des essais, et \bar{y}_{ij} est la valeur ajusté.

Le coefficient de détermination R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats [19], donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots(III-8)$$

Avec :

y_i : Valeur de la réponse calculée à la $i^{ème}$ expérience

\bar{y}_i : Valeur mesurée à la $i^{ème}$ expérience

\bar{y} : Valeur moyenne des réponses mesurées

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%, à chaque fois que la valeur de F -calculée est supérieure à la valeur de F -table. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérés statistiquement significatives. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réel (expérimentales). [14]

III.4. Résultat d'expériences

Le *Tableau III-1* présente les résultats expérimentaux correspondants aux efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) et la rugosité de surface (R_a , R_z). Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan $N = 3^3$ de Taguchi), lors de tournage de polyamide PA6. L'analyse des résultats de ce tableau montre que les valeurs minimales correspondent aux efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) ont été trouvées suivant les conditions des essais.

Tableau III-1: Résultats de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe lors de l'usinage de polyamide PA6.

Les valeurs d'entrer (Facteur d'entrer)				Les valeurs de sortie (réponse)				
N d'essai	V_c [m/min]	f [mm/tr]	ap [mm]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	R_a [μm]	R_z [μm]
1	200	0,08	1	10,13	11,41	20,38	2,73	19,09
2	200	0,08	1,5	23,75	15,09	37,28	2,78	17,39
3	200	0,08	2	20,93	8,30	35,42	2,76	14,49
4	200	0,16	1	21,67	14,24	43,34	2,51	13,33
5	200	0,16	1,5	27,06	19,94	59,77	3,31	16,29
6	200	0,16	2	32,35	22,46	65,88	2,39	12,34
7	200	0,24	1	11,73	16,74	43,13	4,59	18,25
8	200	0,24	1,5	23,55	22,27	74,27	4,06	16,56
9	200	0,24	2	33,11	23,60	95,98	4,49	19,06
10	280	0,08	1	16,06	17,15	12,57	2,74	13,49
11	280	0,08	1,5	25,65	22,58	30,37	2,57	13,57
12	280	0,08	2	32,09	19,46	19,54	1,90	10,84
13	280	0,16	1	24,6	26,74	45,88	2,93	13,70
14	280	0,16	1,5	42,01	34,12	74,43	2,66	13,35
15	280	0,16	2	42,69	28,89	76,89	2,66	13,33
16	280	0,24	1	28,40	32,36	57,89	4,69	18,71
17	280	0,24	1,5	41,00	36,45	92,3	4,08	19,58
18	280	0,24	2	48,14	35,65	105,81	4,23	20,01
19	380	0,08	1	25,14	15,08	32,11	1,36	8,29
20	380	0,08	1,5	29,81	18,58	42,52	1,65	7,52
21	380	0,08	2	30,00	19,22	48,98	1,14	6,51
22	380	0,16	1	21,93	23,47	43,07	2,11	10,52
23	380	0,16	1,5	30,04	31,45	49,00	2,09	10,87
24	380	0,16	2	42,39	28,68	76,69	2,57	12,07
25	380	0,24	1	22,33	21,51	37,47	3,07	14,91
26	380	0,24	1,5	30,14	31,34	70,69	3,51	17,98
27	380	0,24	2	41,00	35,76	99,17	3,77	19,25

III.5. Modélisation des efforts de coupe

III.5.1. L'effort axial F_x

III.5.1.1. Analyse de variance ANOVA pour F_x

L'analyse ANOVA *Tableau III-2*, montre que le profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important qui affecte (F_x), sa contribution est 46,27 %, suivie par les produits (Vc^2) et la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (f) avec un pourcentage de contribution de (13,51 ; 10,99 et 10,00) % respectivement. Les interactions ($Vc*f$, $Vc*ap$, $f*ap$) et le produit (ap^2) n'ont pas d'effets significative sur l'effort (F_x).

Tableau III-2: Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_x

Source	Somme des carrés	df	Mean Square	F Value	P-value Prob > F	% de contribution	Remarques
Model	2097,74	9	233,08	14,4	< 0,0001	88,40	Signifiant
Vc	260,68	1	260,68	16,1	0,0009	10,99	Signifiant
f	237,32	1	237,32	14,66	0,0013	10,00	Signifiant
ap	1098,02	1	1098,02	67,83	< 0,0001	46,27	Signifiant
$Vc*f$	4,65	1	4,65	0,29	0,5991	0,20	Non Signifiant
$Vc*ap$	0,011	1	0,011	6,54E-04	0,9799	0,00	Non Signifiant
$f*ap$	65,8	1	65,8	4,06	0,0599	2,77	Non Signifiant
Vc^2	320,52	1	320,52	19,8	0,0004	13,51	Signifiant
f^2	108,43	1	108,43	6,7	0,0191	4,57	Signifiant
ap^2	31,63	1	31,63	1,95	0,1801	1,33	Non Signifiant
Résiduel	275,2	17	16,19			11,60	
Cor Total	2372,94	26				100,00	

III.5.1.2. Les effets principaux pour F_x

Le *Figure III-1* expose les graphiques des effets principaux pour l'effort (F_x) il est claire que la pente de profondeur de passe (ap) est plus grande que les autres facteurs.

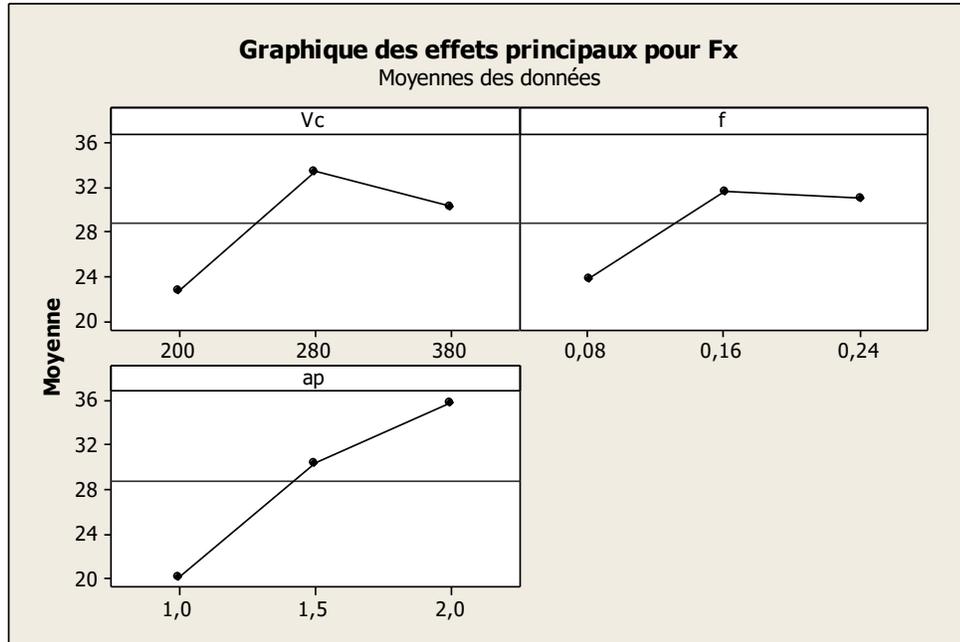


Figure III-1: Effet de conditions de coupe sur l'effort F_x

III.5.1.3. Analyse de régression pour F_x

La relation fonctionnelle entre la variable dépendante pour l'effort axial (F_x) et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et ap) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 88,40\%$) correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire, l'effort (F_x) de coupe selon les facteurs étudiés. Le modèle obtenu présente l'évolution de l'effort de coupe (F_x) en fonction de (V_c , f , et ap) est présenté respectivement par l'équations (III-9).

$$F_x = -109,031 + 0,586V_c + 195,186 f + 33,632 ap - 0,001 V_c * V_c - 0,0862 V_c * f + 0,001 V_c * ap - 664,236 f * f + 58,542 f * ap - 9,184 ap * ap \text{ [N]} \dots \dots \dots \text{(III-9)}$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédits pour l'effort (F_x) est présentée dans la Figure III-2 et la Figure III-3. L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision de modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

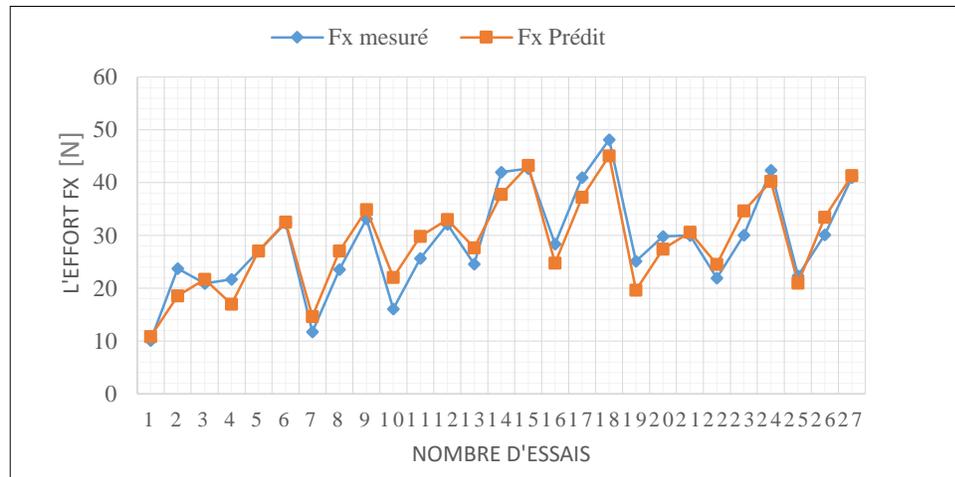


Figure III-2: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour l'effort F_x

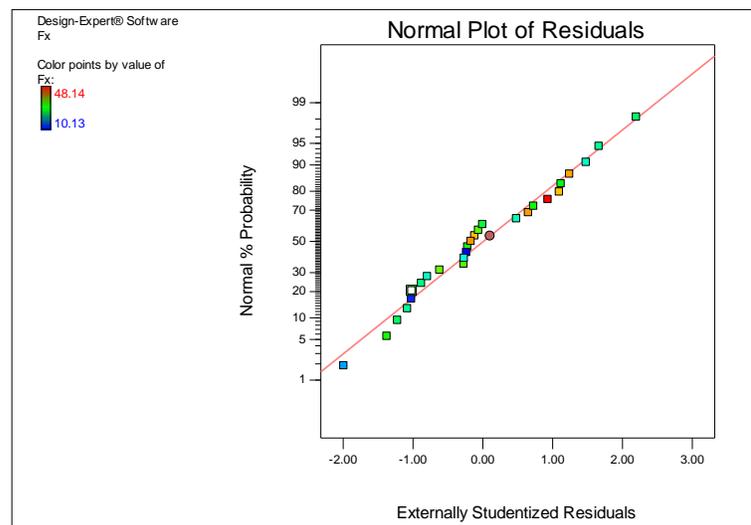


Figure III-3: les valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour l'effort F_x

III.5.1.4. Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour F_x

Le graphe de surface de réponse **Figure III-4** représente les résultats de la surface de réponse (3D) de l'effort (F_x), en fonction des paramètres de coupe (V_c, f, ap). La **Figure III-4** présente aussi les contours en 2D, l'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la pente de la profondeur de passe (ap) est importante, donc ce facteur (ap) possède l'effet le plus significatif sur la composante (F_x).

Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (F_x), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

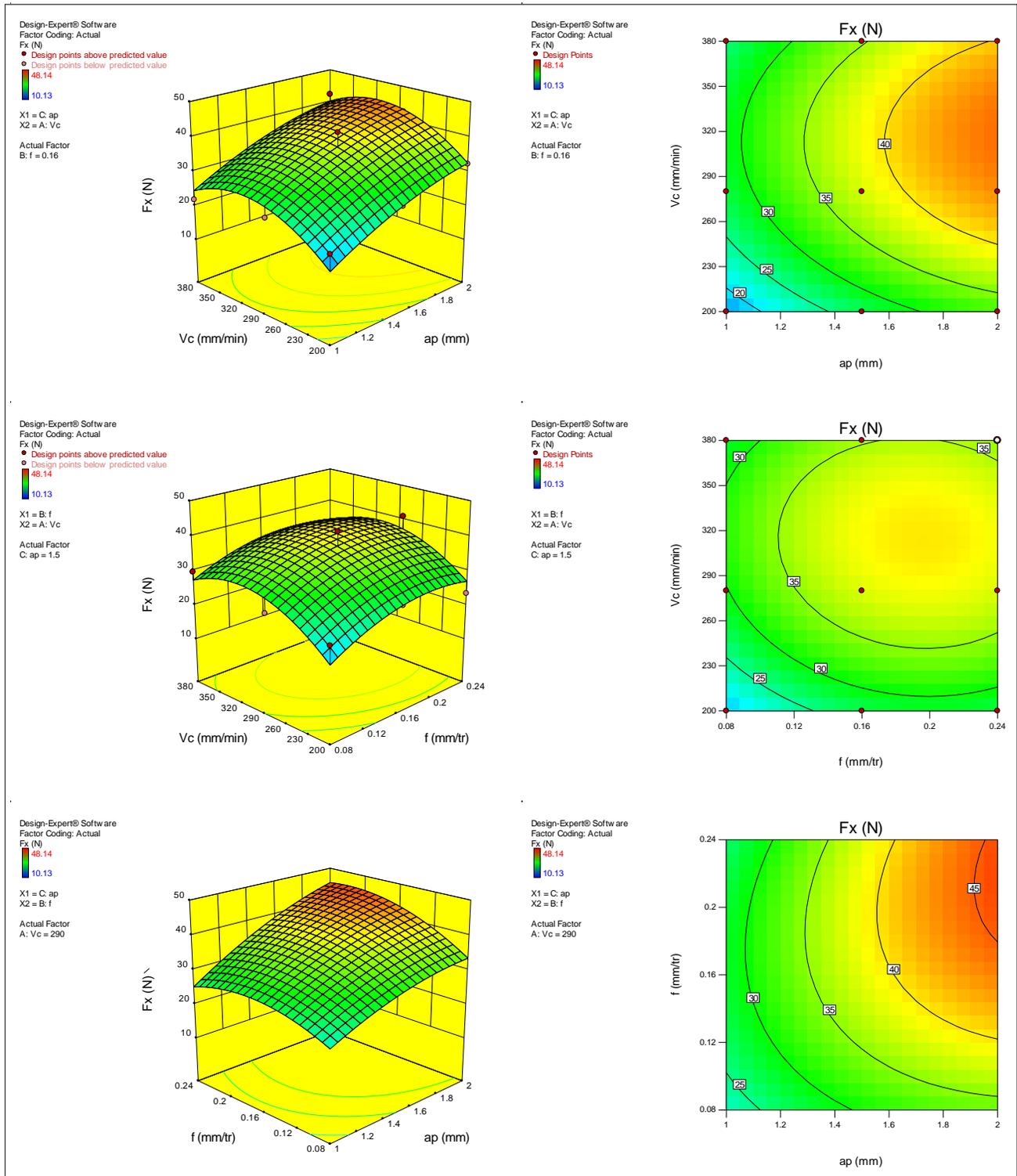


Figure III-4: Surface de réponse et le contour pour l'effort F_x en fonction de (V_c, f, a_p)

III.5.2. Modélisation de l'effort axial F_y

III.5.2.1. Analyse de variance ANOVA pour F_y

L'analyse ANOVA présenté dans le **Tableau III-3** montre que l'avance (f) est le facteur le plus important qui affecte (F_y). Sa contribution est 28,66 %, suivie par la vitesse de coupe (V_c) ont 25,55 % puis le produit V_c^2 ont 14,73 % suivie par la profondeur de passe (ap), sa contribution 12,92 % puis l'interaction (V_c*ap) ont 4,84 % puis le produit (f^2), sa contribution est 3,35 %, mais les interactions (V_c*f ; $f*ap$) et le produit ap^2 n'ont pas d'influence significatif sur l'effort (F_y).

Tableau III-3: Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_y

Source	Somme des carrés	df	Mean of Square	F Value	p-value Prob > F	% de contribution	Remarques
Model	1583.86	9	175.98	16.74	< 0.0001	89,86	Signifiant
V_c	450.40	1	450.40	42.83	< 0.0001	25,55	Signifiant
f	505.08	1	505.08	48.03	< 0.0001	28,66	Signifiant
ap	227.76	1	227.76	21.66	0.0002	12,92	Signifiant
V_c*f	3.57	1	3.57	0.34	0.5676	0,20	Non signifiant
V_c*ap	85.39	1	85.39	8.12	0.0111	4,84	Signifiant
$f*ap$	5.41	1	5.41	0.51	0.4828	0,31	Non signifiant
V_c^2	259.70	1	259.70	24.70	0.0001	14,73	Signifiant
f^2	58.97	1	58.97	5.61	0.0300	3,35	Signifiant
ap^2	35.72	1	35.72	3.40	0.0828	2,03	Non signifiant
Résiduel	178.76	17	10.52			10,14	
Cor Total	1762.62	26				100,00	

III.5.2.2. Effets principaux pour F_y

La **Figure III-5** expose les graphiques des effets principaux pour l'effort (F_y), il est claire que l'influence de l'avance (f) est plus grand que le vitesse de coupe (V_c), suivie par la profondeur de passe (ap).

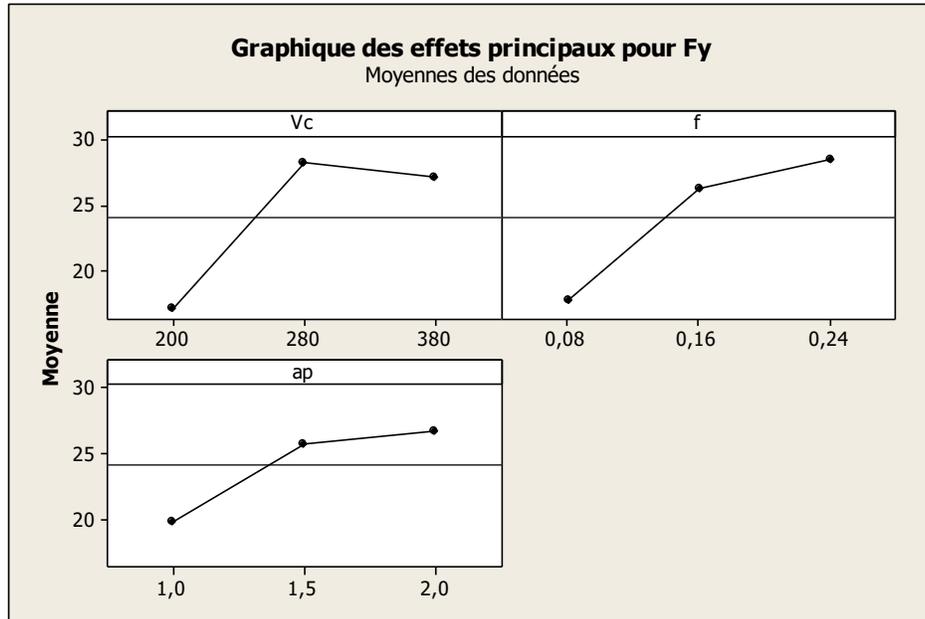


Figure III-5: Effet de conditions de coupe sur l'effort F_y

III.5.2.3. Analyse de régression pour F_y

La relation fonctionnelle entre la variable dépendante pour la composante dans le sens perpendiculaire ou l'effort de refoulement (F_y) et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et ap) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 89,86\%$), correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire l'effort (F_y) de coupe selon les facteurs étudiés. Le modèle obtenu présente l'évolution de l'effort de coupe (F_y) en fonction de (V_c , f , et ap) il est présenté par l'équation (III-10).

$$F_y = -82.444 + 0.457 * V_c + 219.778 * f + 16.559 * ap - 0.076 * V_c * f + 0.059 * V_c * ap + 16.792 * f * ap - 0.001 * V_c^2 - 489.844 * f^2 - 9.760 * ap^2 \dots \dots \dots (III-10)$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites est présentée dans les Figure III-6, et Figure III-7, l'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision du modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

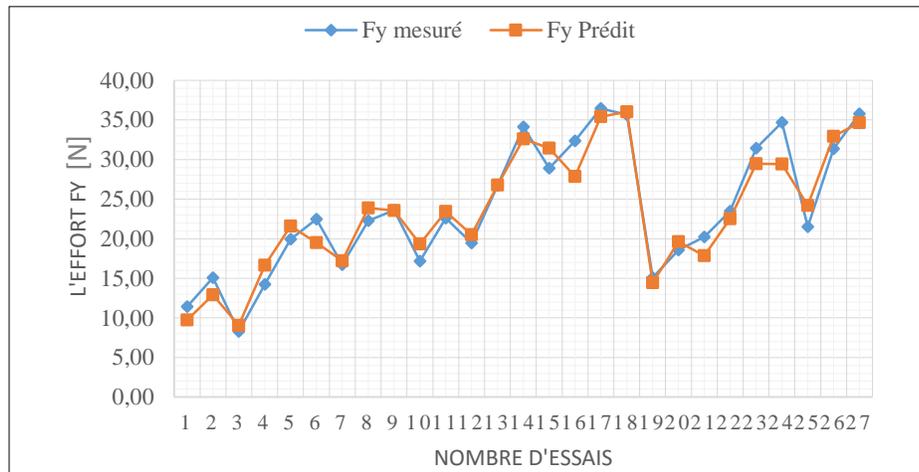


Figure III-6: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour l'effort F_y

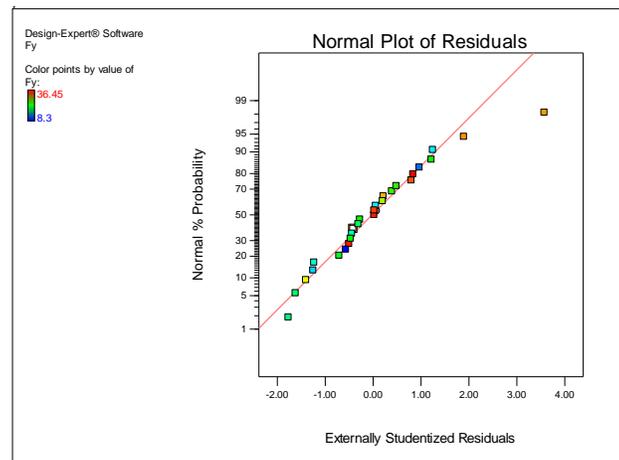


Figure III-7: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour l'effort F_y

III.5.2.4. Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour F_y

Le graphe de surface de réponse *Figure III-8* représente les résultats de la surface de réponse (3D) de l'effort (F_y), en fonction des paramètres de coupe (V_c, f, a_p), il présente aussi les contours en 2D. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la pente de la vitesse d'avance (f) est importante, donc ce facteur (f) possède l'effet le plus significatif sur la composante (F_y).

Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (F_y), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

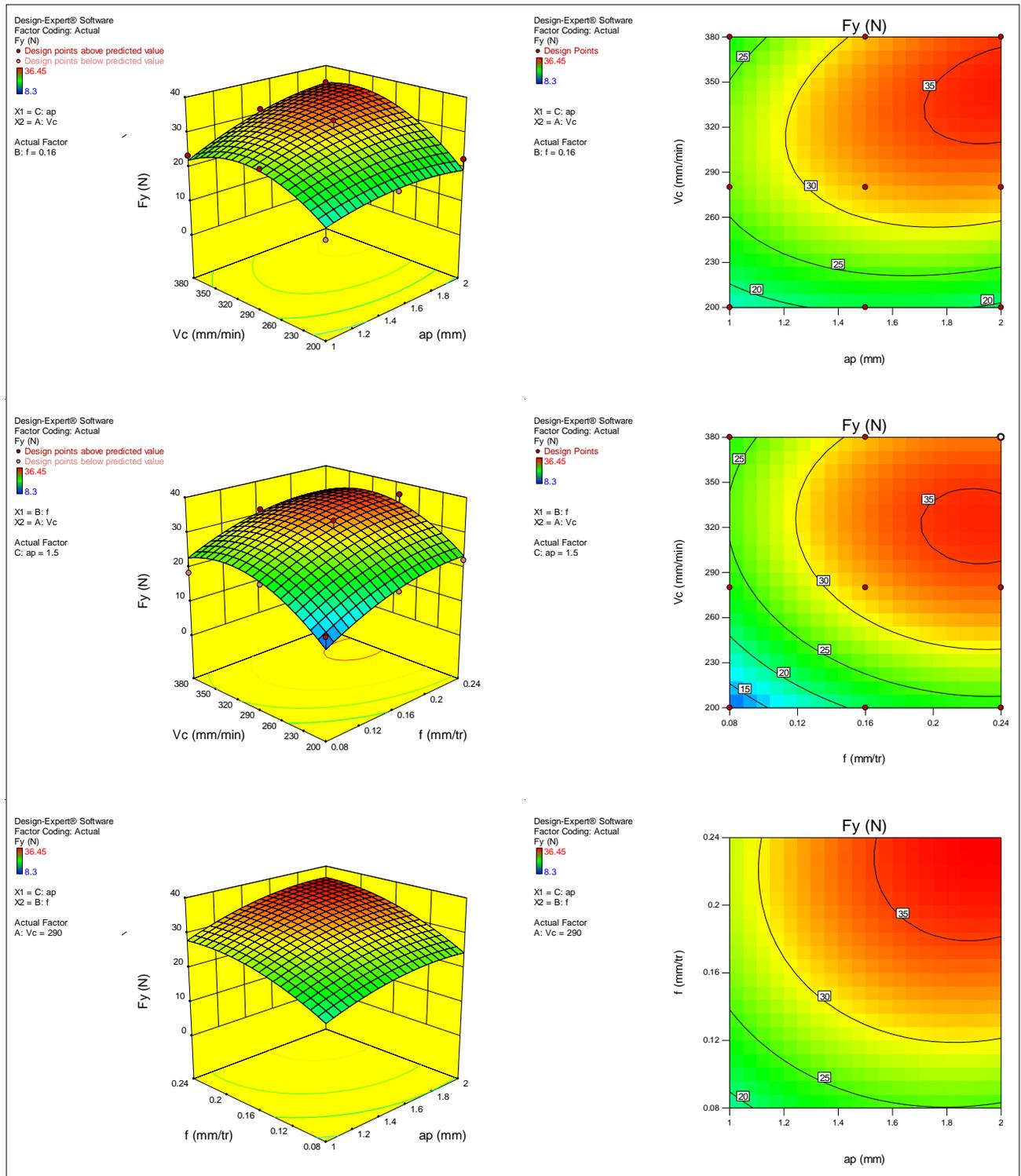


Figure III-8: Surface de réponse et le contour pour l'effort F_y en fonction de (V_c, f, a_p)

III.5.3. Modélisation de l'effort axial F_z

III.5.3.1. Analyse de variance ANOVA pour F_z

Les résultats de l'ANOVA présentée au **Tableau III-4**, montre que l'avance (f) est le facteur le plus important qui affecte (F_z), sa contribution est 51,47%, suivie par la profondeur de passe (ap) avec la contribution de 27,68% puis le produit ($f*ap$) de 7.57 %, mais la vitesse de coupe (V_c) et les interactions (V_c*f , V_c*ap) et les produits (V_c^2 , f^2 , ap^2) n'ont pas d'effet significatif sur l'effort (F_z).

Tableau III-4: Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_z

Source	Somme des carrés	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	% de contribution	Remarques
Model	15398.03	9	1710.89	20.48	< 0.0001	91,56	Signifiant
V_c	32.67	1	32.67	0.39	0.5400	0,19	Non signifiant
f	8656.51	1	8656.51	103.63	< 0.0001	<u>51,47</u>	Signifiant
ap	4655.82	1	4655.82	55.74	< 0.0001	27,68	Signifiant
V_c*f	156.02	1	156.02	1.87	0.1895	0,93	Non signifiant
V_c*ap	43.53	1	43.53	0.52	0.4802	0,26	Non signifiant
$f*ap$	1272.87	1	1272.87	15.24	0.0011	7,57	Signifiant
V_c^2	63.99	1	63.99	0.77	0.3936	0,38	Non signifiant
f^2	240.75	1	240.75	2.88	0.1078	1,43	Non signifiant
ap^2	189.13	1	189.13	2.26	0.1507	1,12	Non signifiant
Résiduel	1420.01	17	83.53			8,44	Non signifiant
Cor Total	16818.05	26				100,00	

III.5.3.2. Effets principaux pour F_z

La **Figure III-9** illustre les graphiques des effets principaux pour l'effort (F_z) il est montré que l'influence de l'avance (f) est plus grande suivie par la profondeur de passe (ap).

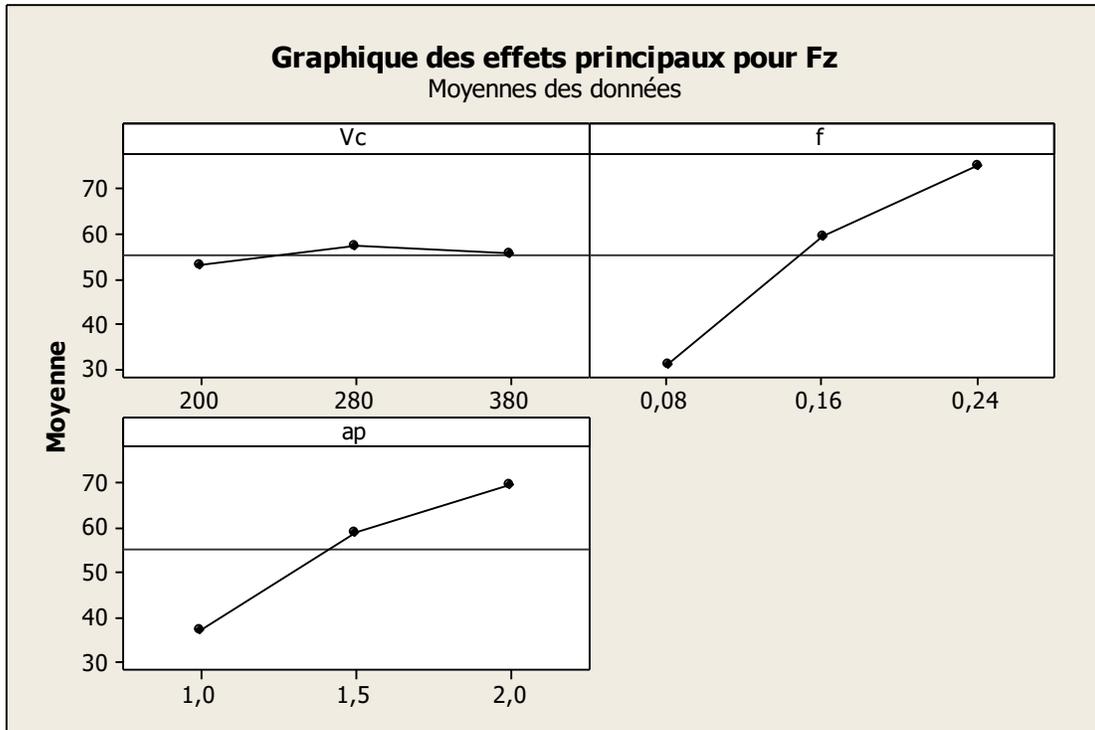


Figure III-9: Effet de conditions de coupe sur l'effort Fz

III.5.3.3. Analyse de régression pour Fz

La relation fonctionnelle entre la variable dépendante pour la composante dans le sens de vitesse de coupe, ou l'effort tangentiel (F_z) et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et ap) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 91,56 \%$) correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire l'effort (F_z) de coupe selon les facteurs étudiés, Le modèle obtenu présente l'évolution de l'effort de coupe (F_z) en fonction de (V_c , f , et ap) est présenté par l'équation (III-11).

$$F_z = -84,381 + 0,269 V_c + 349,843 f + 46,127 ap - 0,001 V_c * V_c - 0,500 V_c * f + 0,042 V_c * ap - 989,757 f * f + 257,479 f * ap - 22,458 ap * ap \text{ [N]} \dots \dots \dots \text{(III-11)}$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites est présentée dans les **Figure III-10**, et **Figure III-11** . L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision du modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

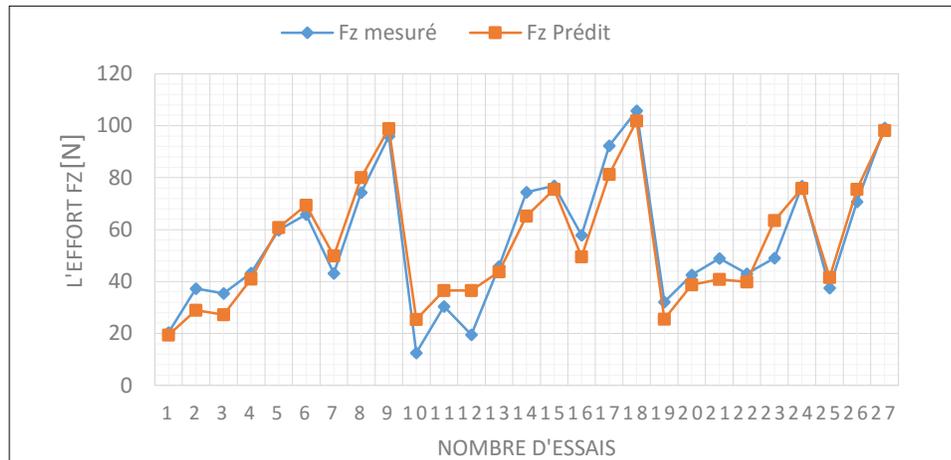


Figure III-10: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour l'effort F_z

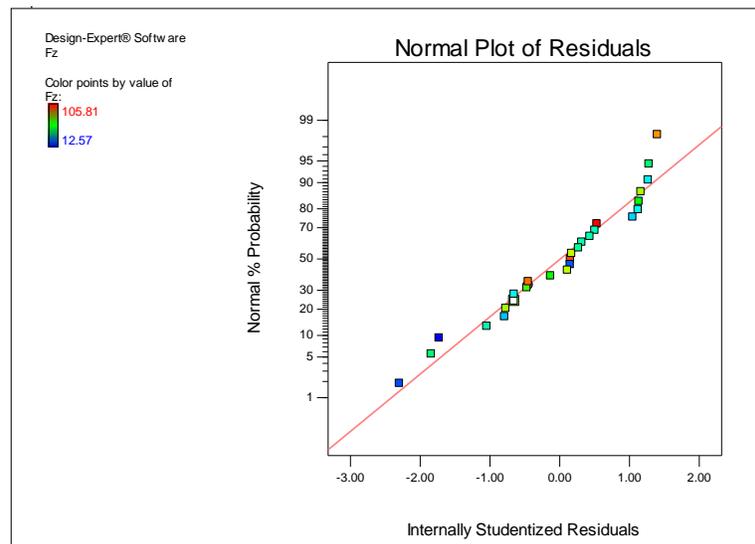


Figure III-11: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour l'effort F_z

III.5.3.4. Analyse de surface de réponse et graphique des contours pour F_z

Le graphe de surface de réponse **Figure III-12** représente les résultats de la surface de réponse (3D) de l'effort (F_z), en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , ap), il présente aussi les contours en 2D. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la pente de la vitesse d'avance (f) est importante, donc ce facteur (f) possède l'effet le plus significatif sur la composante (F_z).

Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (F_z), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

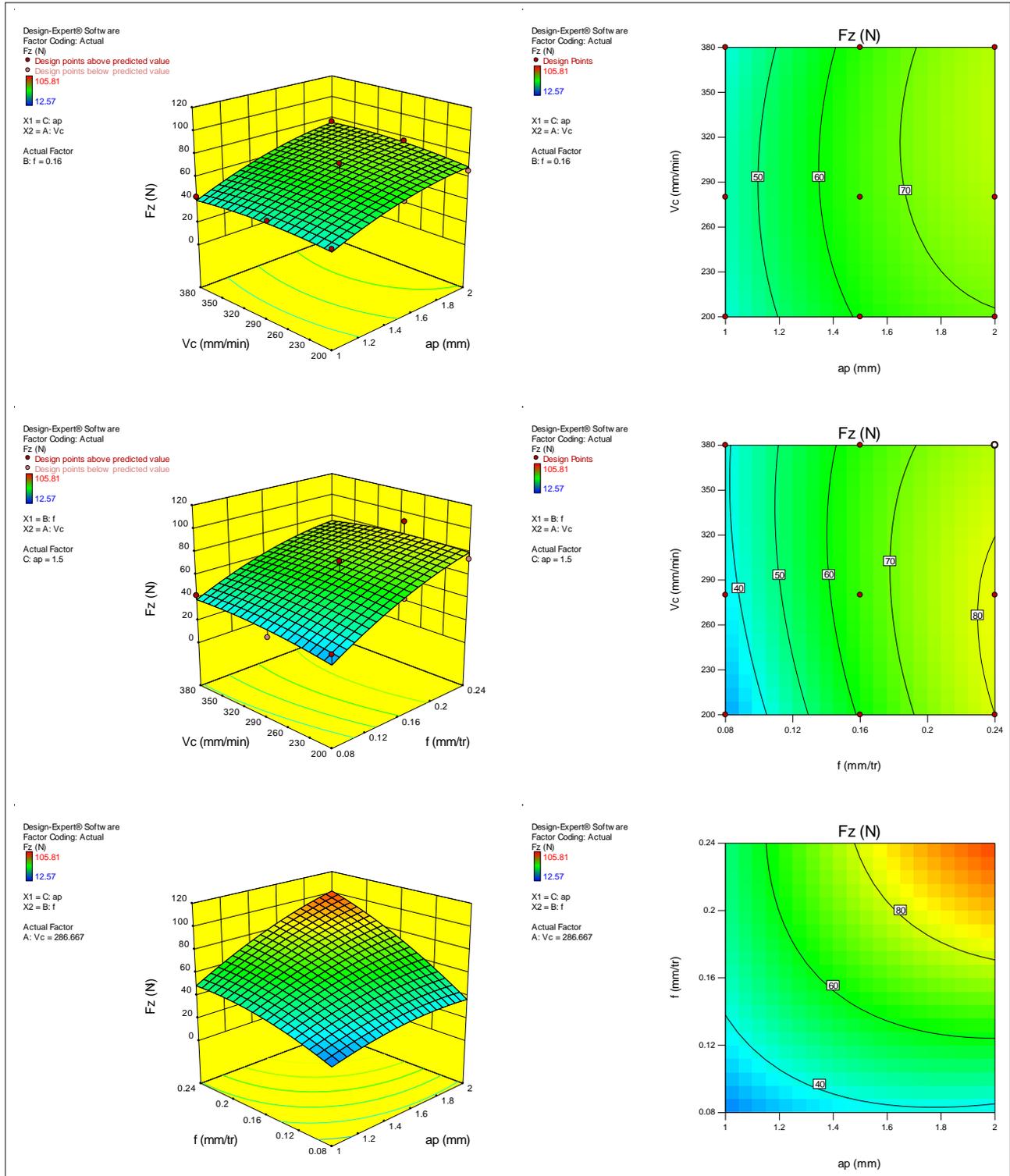


Figure III-12: Surface de réponse et le contour pour l'effort F_z en fonction de (V_c , f , a_p)

III.6. Modélisation de la rugosité de surface

III.6.1. Critère de rugosité Ra

III.6.1.1. Analyse de variance ANOVA pour Ra

Le résultat de **Tableau III-5** montre que l'avance (f) est le facteur le plus important qui affecte la rugosité moyenne arithmétique (Ra). Sa contribution est 64,83%, Suivie par la vitesse de coupe (Vc) avec la contribution de 15,79 % puis le produit de l'avance (f^2) de 7.06 %. Nous observons ici que la profondeur de passe (ap) et les interactions ($Vc*f$, $Vc*ap$, $f*ap$) et les produits (Vc^2 , ap^2) n'ont pas d'influence significatif sur la rugosité (Ra).

Tableau III-5: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Ra

Source	Somme des carrés	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	% de contribution	Remarques
Model	22.50	9	2.50	21.06	< 0.0001	91,80	Signifiant
Vc	3.87	1	3.87	32.63	< 0.0001	15,79	Signifiant
f	15.89	1	15.89	133.91	< 0.0001	64,83	Signifiant
ap	0.031	1	0.031	0.26	0.6185	0,13	Non signifiant
$Vc*f$	0.14	1	0.14	1.19	0.2905	0,57	Non signifiant
$Vc*ap$	0.13	1	0.13	1.13	0.3028	0,53	Non signifiant
$f*ap$	0.11	1	0.11	0.95	0.3437	0,45	Non signifiant
Vc^2	0.48	1	0.48	4.03	0.0609	1,96	Non signifiant
f^2	1.73	1	1.73	14.55	0.0014	7,06	Signifiant
ap^2	0.012	1	0.012	0.098	0.7576	0,05	Non signifiant
Résiduel	2.02	17	0.12			8,24	
Cor Total	24.51	26				100,00	

III.6.1.2. Effets principaux pour Ra

La **Figure III-13** expose les graphiques des effets principaux pour la rugosité (Ra) en fonction de conditions de coupe (Vc , f , ap), l'analyse des graphes montre que l'influence de l'avance (f) est la plus grande, et suivie par la vitesse de coupe (Vc).

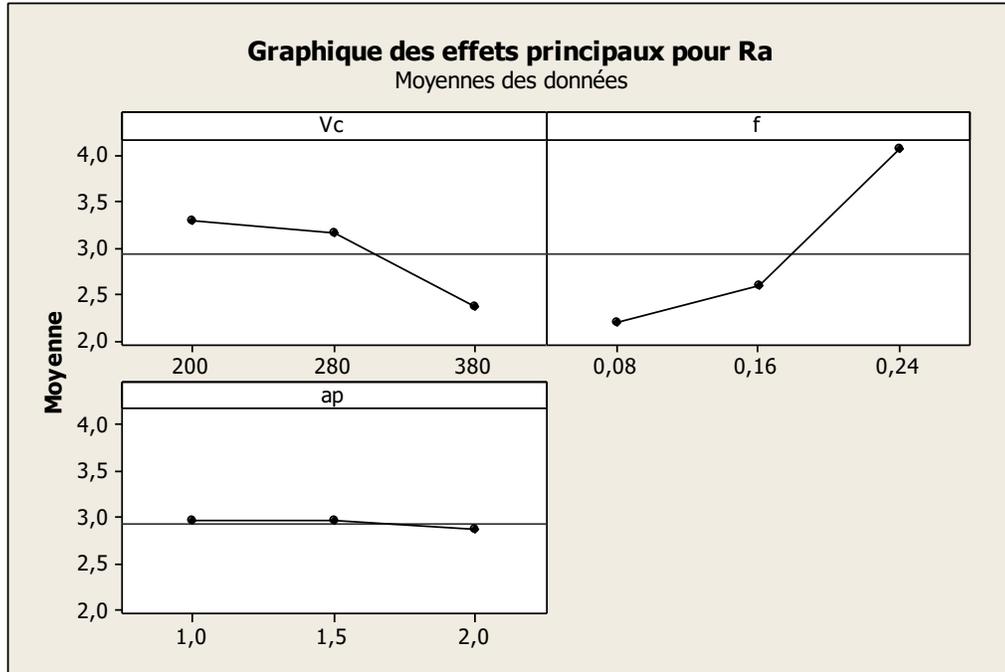


Figure III-13: Effet de conditions de coupe sur la rugosité Ra

III.6.1.3. Analyse de régression pour Ra

La relation fonctionnelle entre la rugosité moyenne arithmétique (Ra) et les variables indépendantes étudiées (Vc , f et ap) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 91,77\%$) correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la rugosité de la surface (Ra) selon les facteurs étudiés. Le modèle obtenu présente l'évolution de l'état de la surface pour la rugosité moyenne arithmétique en fonction de (Vc , f , et ap), il est présenté par l'équation (III-12).

$$Ra = 3,596 + 0,009 Vc - 23,058 f - 0,620 ap - 3,535e-005 Vc*Vc + 0,015 Vc*f + 0,002 Vc*ap + 83,818 f*f + 2,422 f*ap - 0,176 ap*ap [\mu m] \dots\dots\dots(III-12)$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites est présentée dans les Figure III-14 et Figure III-15 . L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision de modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

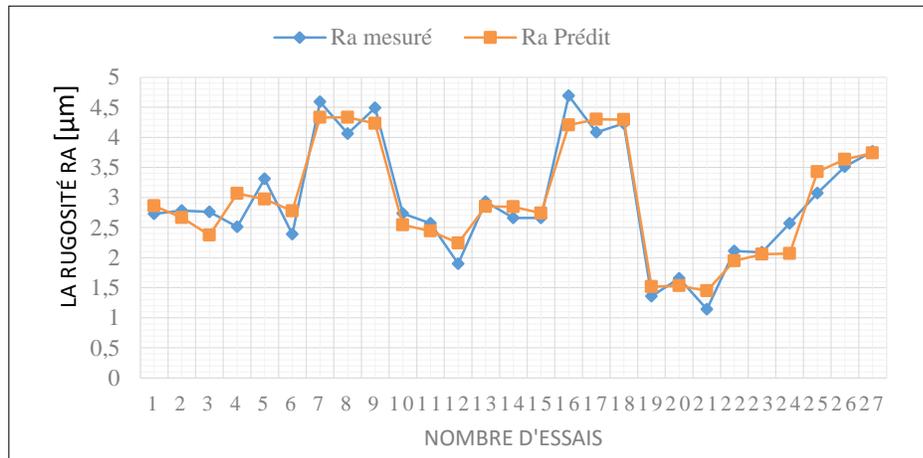


Figure III-14: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour la rugosité Ra

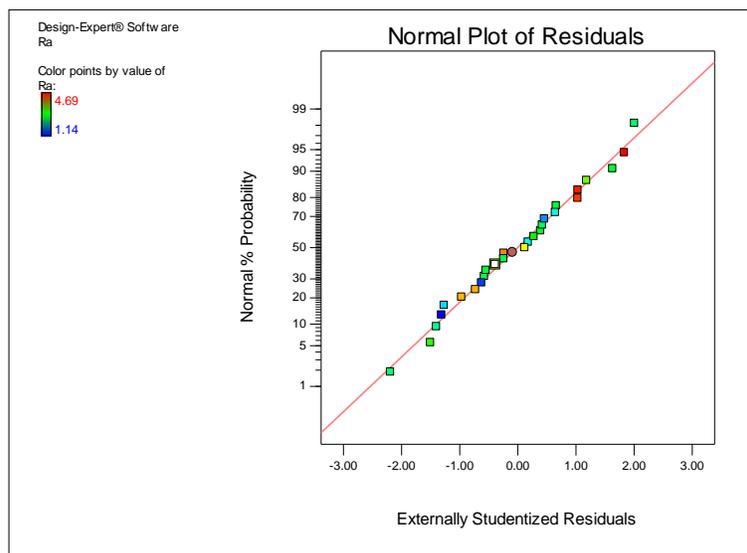


Figure III-15: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour la rugosité Ra

III.6.1.4. Analyse de surface de réponse et graphique de contours pour Ra

Le graphique de surface de réponse **Figure III-16** représente les résultats de la surface de réponse (3D) de la rugosité (Ra), en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , ap), il présente aussi les contours en 2D, l'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque 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).

Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (Ra), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

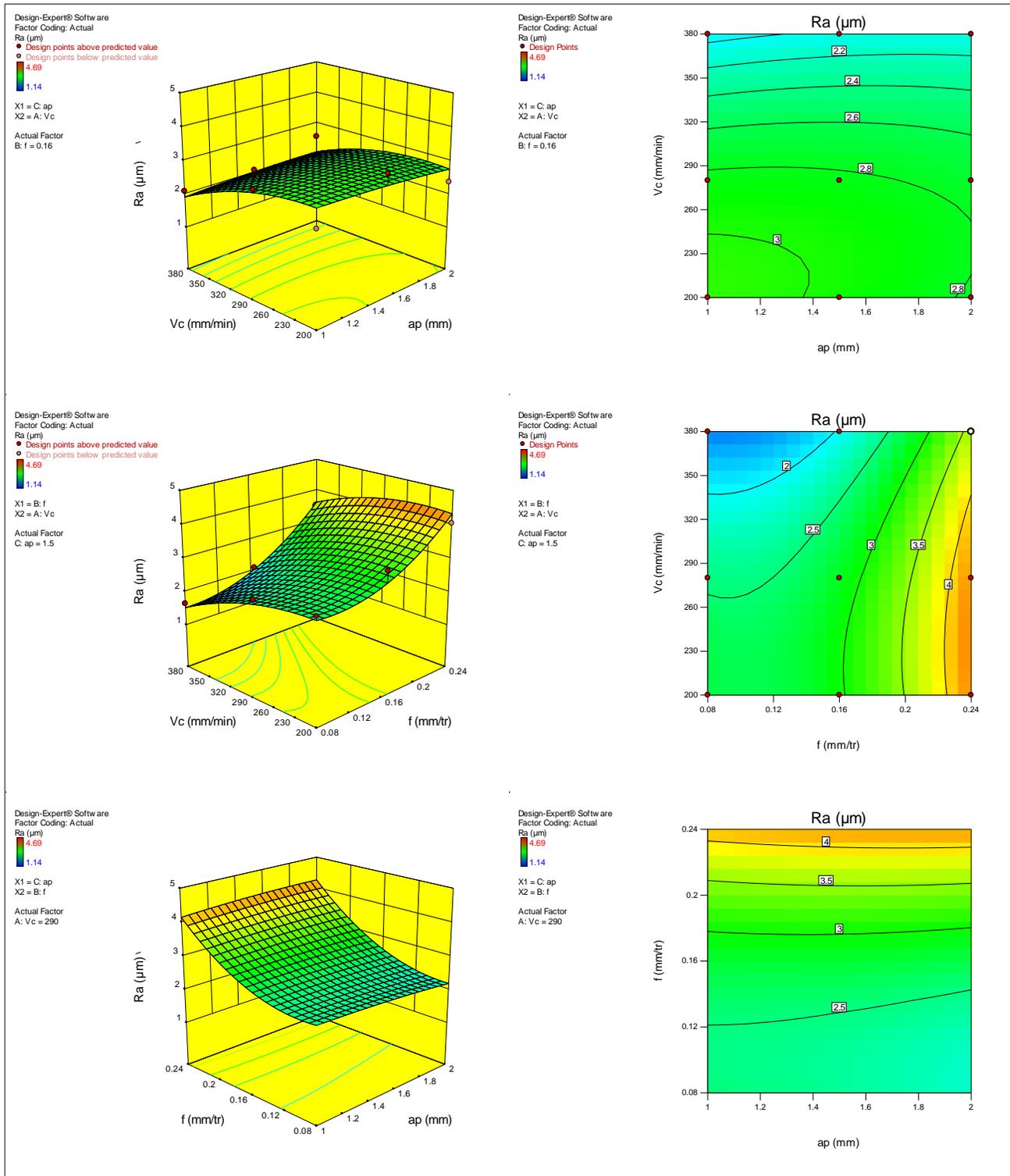


Figure III-16: Surface de réponse et le contour pour la rugosité Ra en fonction des conditions de coupe (Vc, f, ap)

III.6.2. Analyse de la rugosité de surface R_z

III.6.2.1. Analyse de variance ANOVA pour R_z

L'analyse ANOVA **Tableau III-6** montre que l'avance (f) c'est la première condition qui affecte la rugosité (R_z) avec un pourcentage de contribution 42,26%, puis la vitesse de coupe (V_c) de 21,47% suivie par l'interaction (V_c*f) de 15,03%, le produit de l'avance (f^2) de 9,12%, Les interactions suivantes ($f*ap$, V_c*ap) ont la contribution de (5,11 ; 1,72)% respectivement. Les autres (ap , V_c^2 , ap^2) n'ont pas d'effet significatif sur la rugosité (R_z).

Tableau III-6: Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité R_z

Source	Somme des carrés	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	% de contribution	Remarque
Model	369.80	9	41.09	32.64	< 0.0001	94,53	Signifiant
V_c	83.98	1	83.98	66.72	< 0.0001	21,47	Signifiant
f	165.31	1	165.31	131.34	< 0.0001	42,26	Signifiant
ap	0.20	1	0.20	0.16	0.6959	0,05	Non signifiant
V_c*f	58.81	1	58.81	46.73	< 0.0001	15,03	Signifiant
V_c*ap	6.73	1	6.73	5.34	0.0336	1,72	Signifiant
$f*ap$	19.98	1	19.98	15.87	0.0010	5,11	Signifiant
V_c^2	3.67	1	3.67	2.92	0.1058	0,94	Non signifiant
f^2	35.67	1	35.67	28.34	< 0.0001	9,12	Signifiant
ap^2	1.19	1	1.19	0.95	0.3439	0,30	Non signifiant
Résiduel	21.40	17	1.26			5,47	
Cor Total	391.20	26				100,00	

III.6.2.2. Effets principaux pour R_z

La **Figure III-17** expose les graphiques des effets principaux pour la rugosité (R_z) 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 vitesse de coupe (V_c).

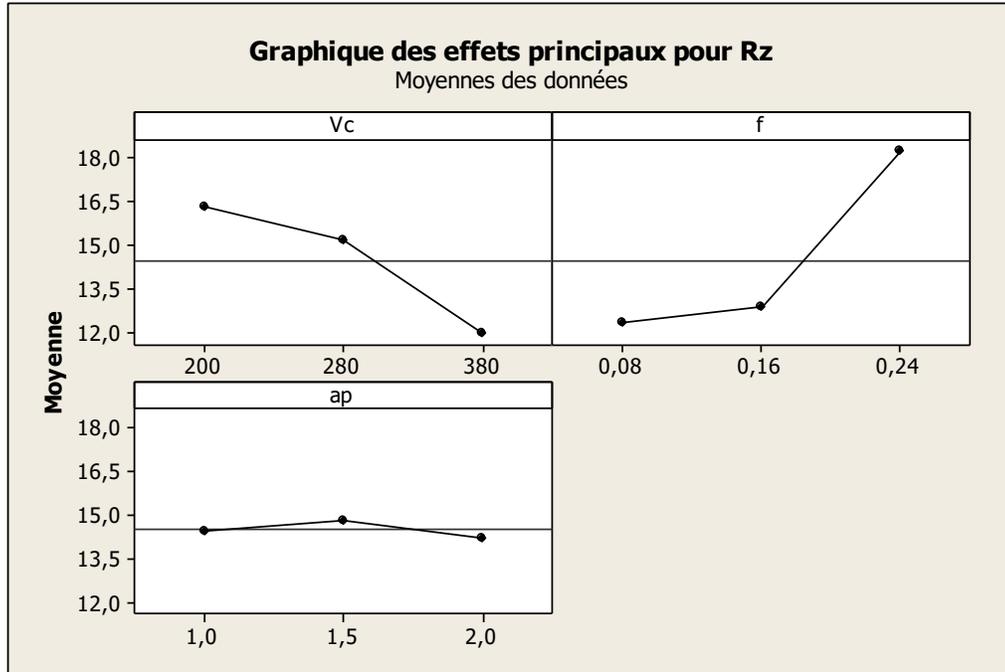


Figure III-17: Effet de conditions de coupe sur la rugosité Rz

III.6.2.3. Analyse de régression pour Rz

La relation fonctionnelle relative à la rugosité (R_z) et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et ap) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 94,53 \%$). Correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la rugosité (R_z) de la surface (R_z) selon les facteurs étudiés. Le modèle obtenu présente l'évolution de l'état de la surface pour la rugosité (R_z) en fonction de (V_c , f , et ap), il est présenté par l'équation (III-13).

$$R_z = 41,525 - 0,041 V_c - 221,359 f - 4,835 ap - 9,799e-005 V_c * V_c + 0,307 V_c * f + 0,017 V_c * ap + 380,968 f * f + 32,255 f * ap - 1,784 ap * ap \text{ [}\mu\text{m].....(III-13)}$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (R_z) est présentée dans la Figure III-18, et Figure III-19. l'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision et la robustesse du modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

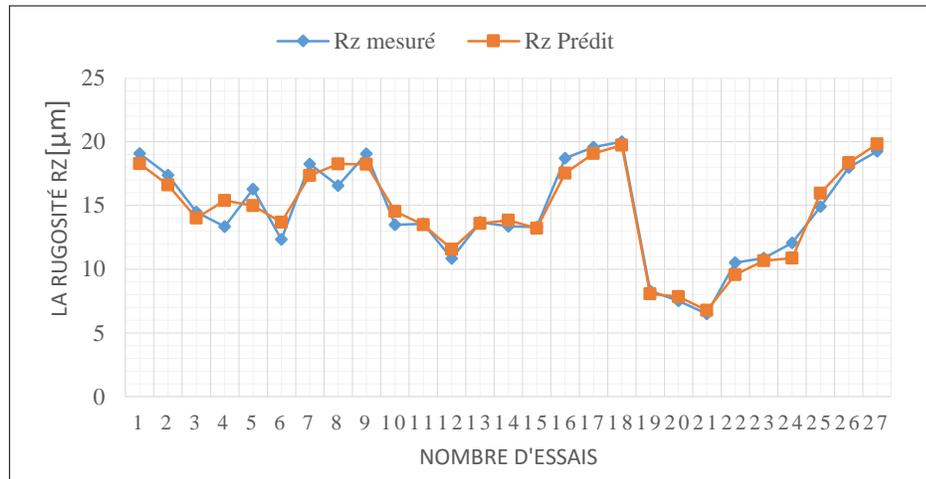


Figure III-18: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour la rugosité R_z

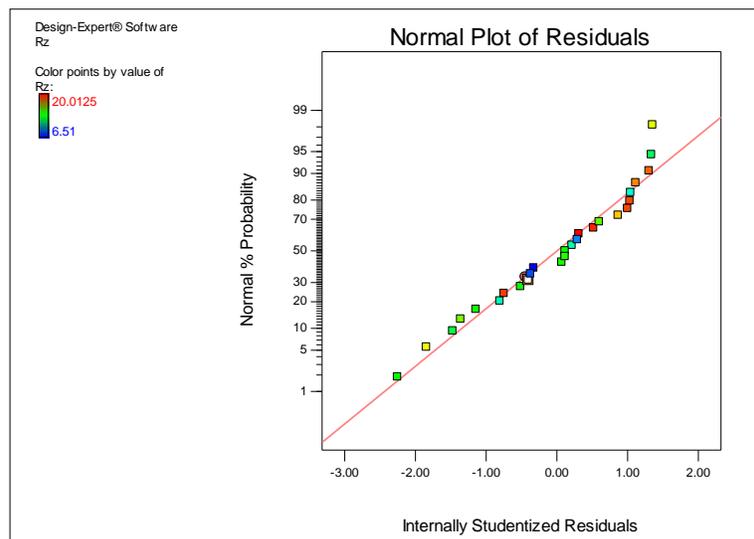


Figure III-19: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour la rugosité R_z

III.6.2.4. Analyse de surface de réponse et graphique de contours pour R_z

Le graphe de surface de réponse **Figure III-20** représente les résultats de la surface de réponse (3D) de la rugosité (R_z), en fonction des paramètres de coupe (V_c, f, a_p), il présente aussi les contours en 2D. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la pente de la vitesse d'avance (f) est importante, donc ce facteur (f) possède l'effet le plus significatif sur la rugosité (R_z).

Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (R_z), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

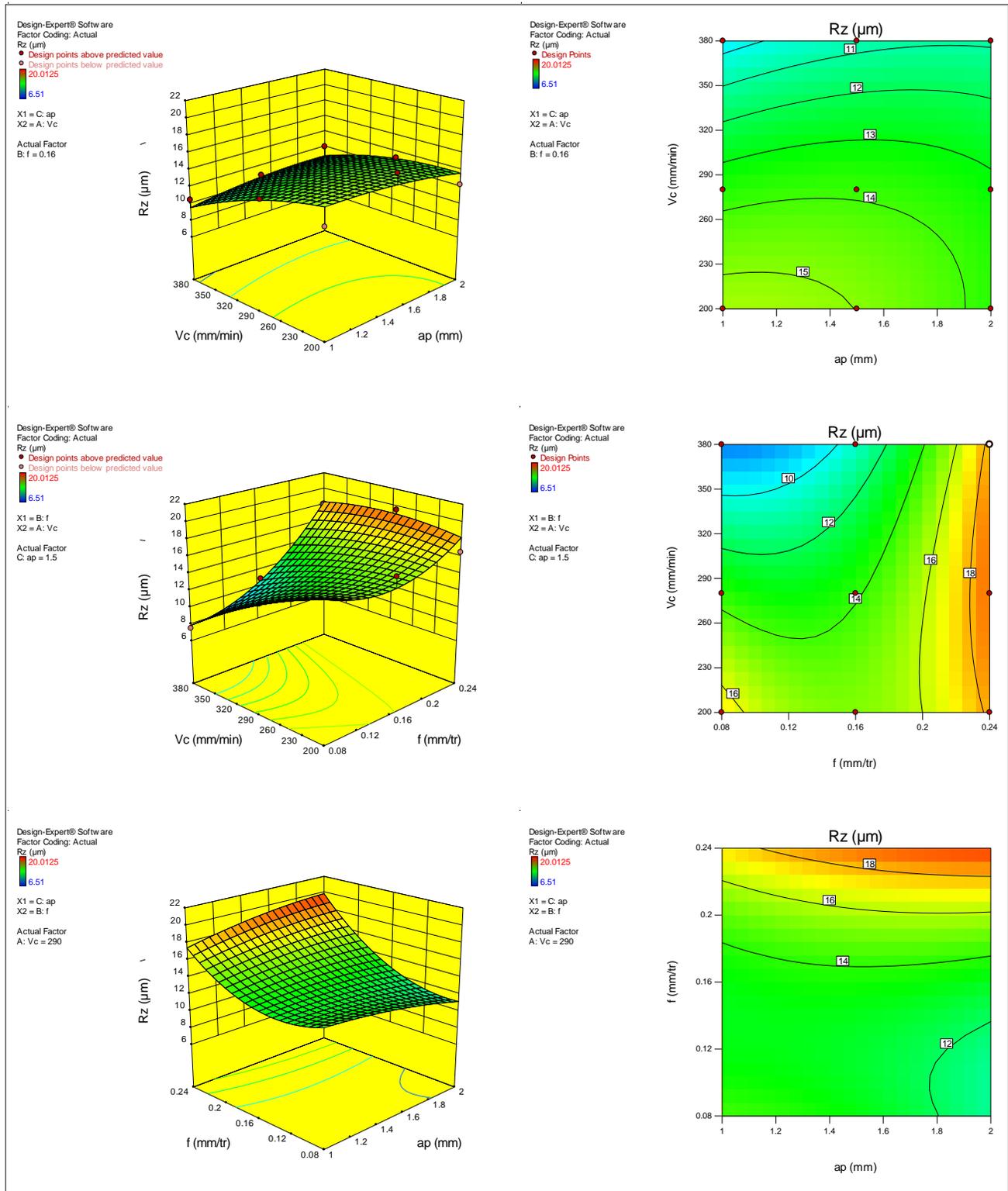


Figure III-20: Surface de réponse et le contour pour la rugosité R_z en fonction de (V_c , f , a_p)

III.7. Modélisation de la puissance de coupe

III.7.1. Analyse de variance ANOVA pour P_c

Le résultat du **Tableau III-7** montre que l'avance (f) est le facteur le plus important qui affecte la puissance de coupe (P_c). Sa contribution est de 35,54 %, suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec la contribution de 26,28 % puis la profondeur de passe (ap) avec la contribution de 21,66 % et suivie par les interactions ($f*ap$, V_c*ap) avec les contributions de (5,70 ; 2,73) % respectivement. Finalement l'interaction (V_c*f) et les produits (V_c^2 , f^2 , ap^2) n'ont pas d'influence significatif sur la puissance (P_c).

Tableau III-7: Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe P_c

Source	Somme des carrés	df	Mean Square	F Value	Prob > F	% de contribution	Remarques
Modèle	4.895E+005	9	54385.86	24.11	< 0.0001	92,74	Signifiant
V_c	1.387E+005	1	1.387E+005	61.49	< 0.0001	26,28	Signifiant
f	1.876E+005	1	1.876E+005	83.20	< 0.0001	35,54	Signifiant
ap	1.143E+005	1	1.143E+005	50.69	< 0.0001	21,66	Signifiant
V_c*f	777.99	1	777.99	0.34	0.5647	0,15	
V_c*ap	14423.74	1	14423.74	6.40	0.0216	2,73	Signifiant
$f*ap$	30105.76	1	30105.76	13.35	0.0020	5,70	Signifiant
V_c^2	1053.12	1	1053.12	0.47	0.5036	0,20	
f^2	4648.79	1	4648.79	2.06	0.1692	0,88	
ap^2	2940.54	1	2940.54	1.30	0.2693	0,56	
Résiduel	38340.34	17	2255.31			7,26	
Cor Total	5.278E+005	26				100,00	

III.7.2. Effets principaux pour la puissance P_c

La **Figure III-21** expose les graphiques des effets principaux pour la puissance (P_c) 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 vitesse de coupe (V_c) et enfin par la profondeur de passe (ap).

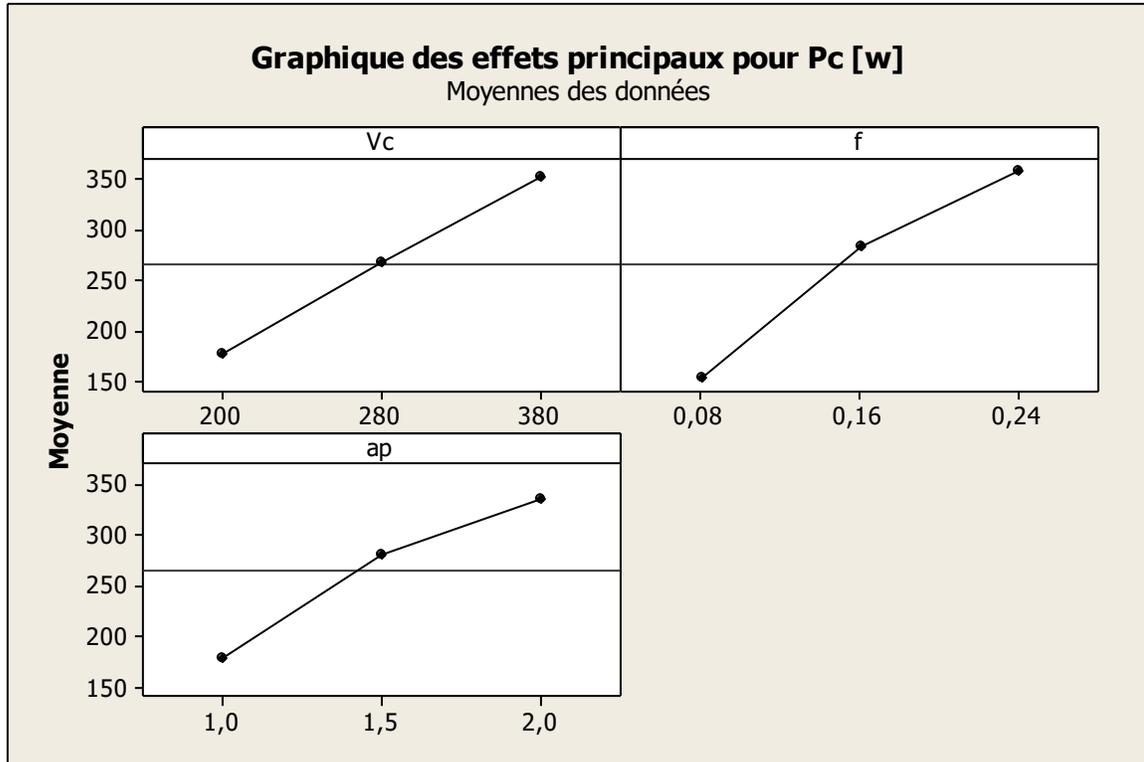


Figure III-21: Effet de conditions de coupe sur la puissance de coupe Pc

III.7.3. Analyse de régression pour la puissance de coupe Pc

La relation fonctionnelle relative à la puissance de coupe (P_c) et les variables indépendantes étudiées (V_c, f et ap) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 92,74\%$), correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la puissance de coupe (P_c) selon les facteurs étudiés. Le modèle obtenu présente l'évolution de la puissance de coupe (P_c) en fonction de (V_c, f , et ap) est présenté par l'équation (III-14).

$$P_c = -179.308 + 0.605 * V_c + 467.365 * f + 1.880 * ap + 1.116 * V_c * f + 0.769 * V_c * ap + 1252.201 * f * ap - 0.02 * V_c^2 - 4349.248 * f^2 - 88.552 * ap^2 [w] \dots \dots \dots (III-14)$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la puissance (P_c) est présentée dans la Figure III-22 et la Figure III-23. L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision et la robustesse du modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

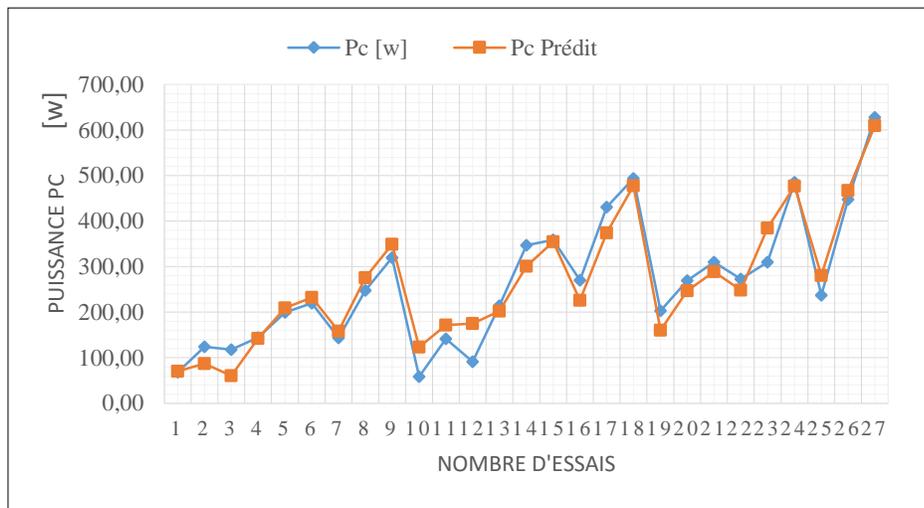


Figure III-22: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour la puissance de coupe P_c

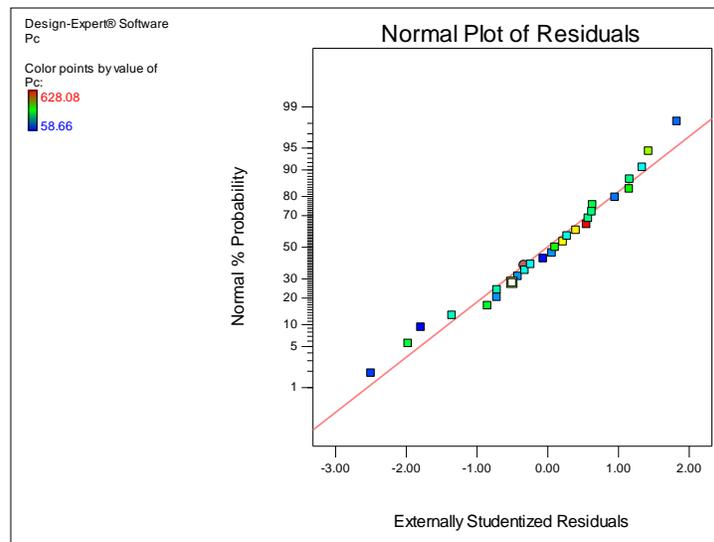


Figure III-23: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour la puissance de coupe P_c

III.7.4. Analyse de surface de réponse et graphique de contours pour P_c

Le graphe de surface de réponse **Figure III-24** représente les résultats de la surface de réponse (3D) de la puissance de coupe (P_c) en fonction des paramètres de coupe (V_c, f, a_p), il présente aussi les contours en 2D. L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la pente de la vitesse d'avance (f) est importante, donc ce facteur (f) possède l'effet le plus significatif sur la puissance de coupe (P_c).

Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (P_c), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

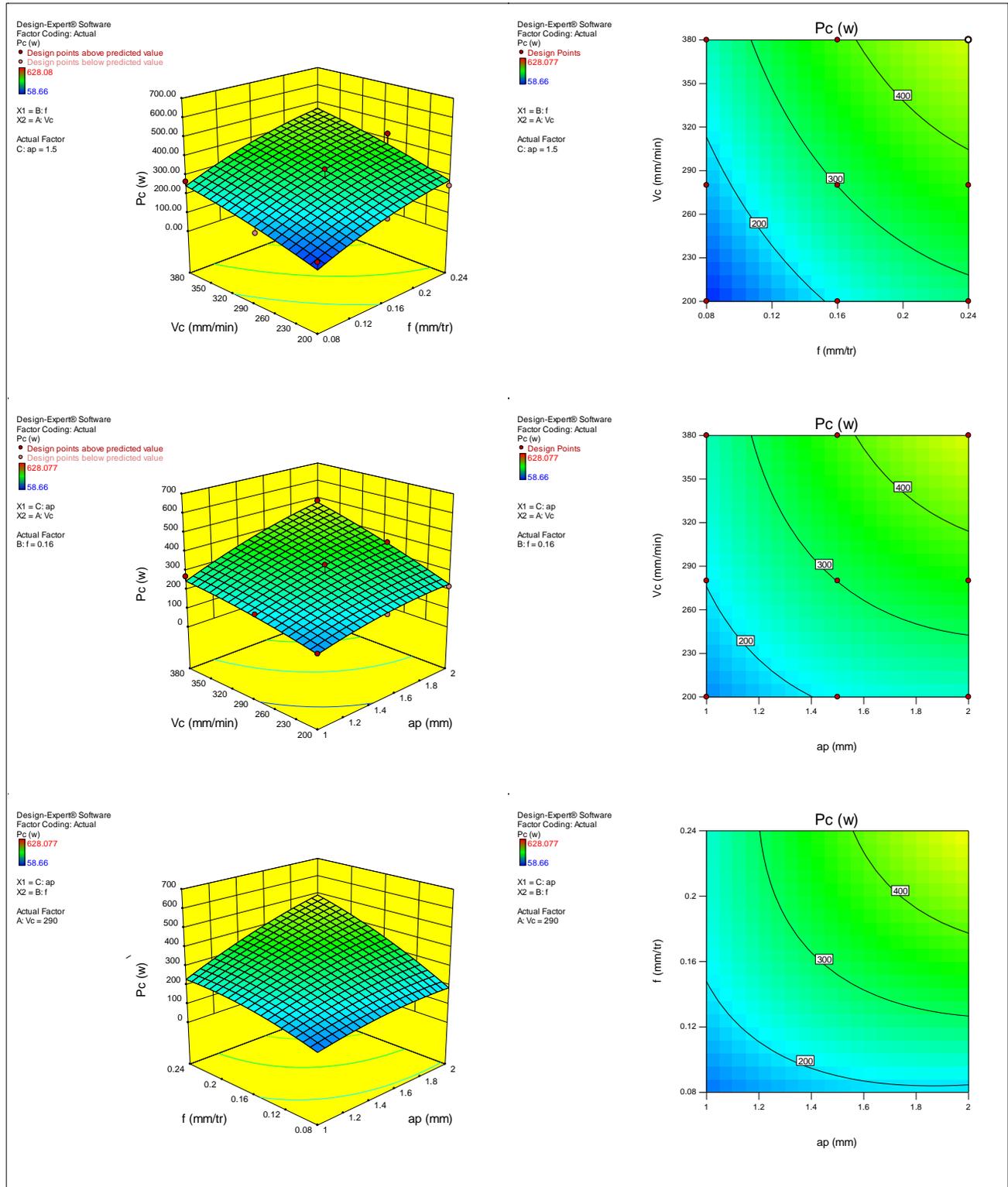


Figure III-24: Surface de réponse et le contour pour la puissance de coupe P_c en fonction de (V_c, f, ap)

III.8. Modélisation de débit de copeau *MRR*

III.8.1. Analyse de variance *ANOVA* pour *MRR*

L'analyse *ANOVA* *Tableau III-8* montre que l'avance (f) c'est la première condition qui affecte le débit de copeau (*MRR*) avec pourcentage de contribution 50,69 % puis la profondeur de passe (ap) de 22,53 % suivie par la vitesse de coupe (Vc) de 19,57%. Les interactions suivantes ($f*ap$, $Vc*f$, $Vc*ap$) ont la contribution de (3,68 ; 3,28 ; 1,46) % respectivement, Les produits (Vc^2 , f^2 , ap^2) n'ont pas d'effet significatif sur le débit de copeau (*MRR*).

Tableau III-8: Analyse de la variance (*ANOVA*) pour le débit de copeau *MRR*

Source	Somme des carrés	df	Square	Value	Prob > F	% de contribution	Remarques
Model	42807.89	9	4756.43	776.70	< 0.0001	99,76	Signifiant
Vc	8398.08	1	8398.08	1371.36	< 0.0001	19,57	Signifiant
f	21754.14	1	21754.14	3552.32	< 0.0001	50,69	Signifiant
ap	9668.51	1	9668.51	1578.81	< 0.0001	22,53	Signifiant
Vc*f	1405.44	1	1405.44	229.50	< 0.0001	3,28	Signifiant
Vc*ap	624.64	1	624.64	102.00	< 0.0001	1,46	Signifiant
f*ap	1577.81	1	1577.81	257.65	< 0.0001	3,68	Signifiant
Vc ²	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	0,00	Non signifiant
f ²	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	0,00	Non signifiant
ap ²	0.000	1	0.000	0.000	1.0000	0,00	Non signifiant
Résiduel	104.11	17	6.12			0,24	
Cor Total	42912.00	26				100,00	

III.8.2. Les effets principaux sur le débit de copeau *MRR*

La *Figure III-25* expose les graphiques des effets principaux pour le débit de copeau (*MRR*) en fonction de conditions de coupe (Vc , 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 (Vc).

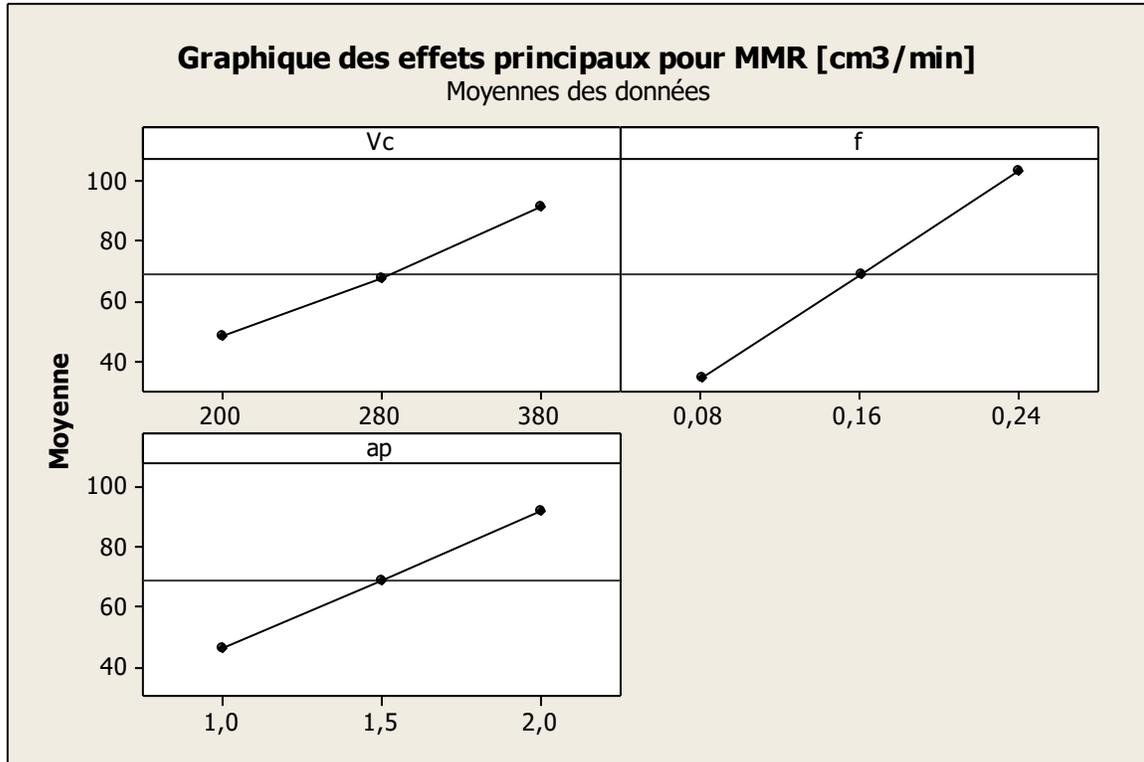


Figure III-25: Effet de conditions de coupe sur le débit de copeau MRR

III.8.3. Analyse de régression pour le débit de copeau MRR

La relation fonctionnelle relatif aux débit de copeau (*MRR*) et les variables indépendantes étudiées (*Vc*, *f* et *ap*) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 99,76\%$). Correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire le débit de copeau (*MRR*) selon les facteurs étudiés. Le modèle obtenu présente l'évolution du débit de copeau (*MRR*) en fonction de (*Vc*, *f*, et *ap*) il présenté par l'équation (III-15).

$$MRR = +68.780 - 0.240 * Vc - 430 * f - 45.867 * ap + 1.500 * Vc * f + 0.160 * Vc * ap + 286.667 * f * ap - 8.856 * Vc^2 - 0,001 * f^2 + 0,001 * ap^2 \text{ [cm}^3\text{/min]} \dots\dots\dots(III-15)$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédits pour le débit de copeau (*MRR*) est présentée dans la Figure III-26 et Figure III-27, l'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision et la robustesse de modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

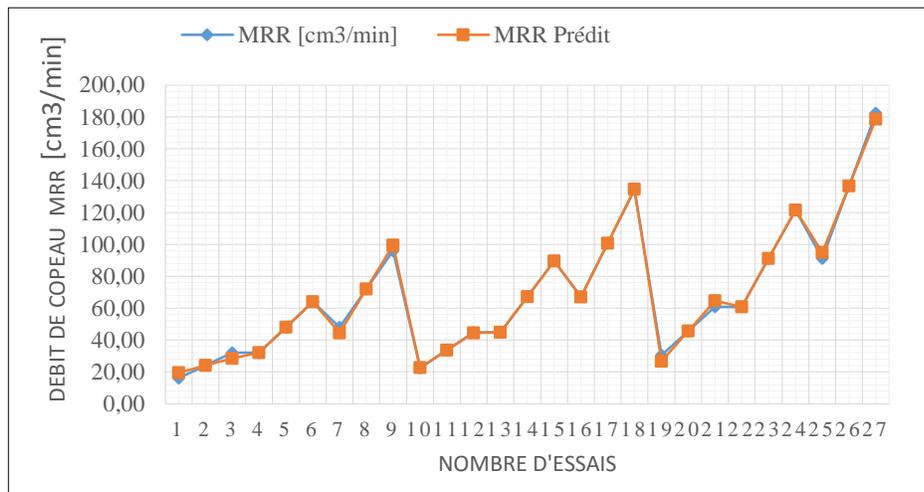


Figure III-26: Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour le débit de copeau MRR

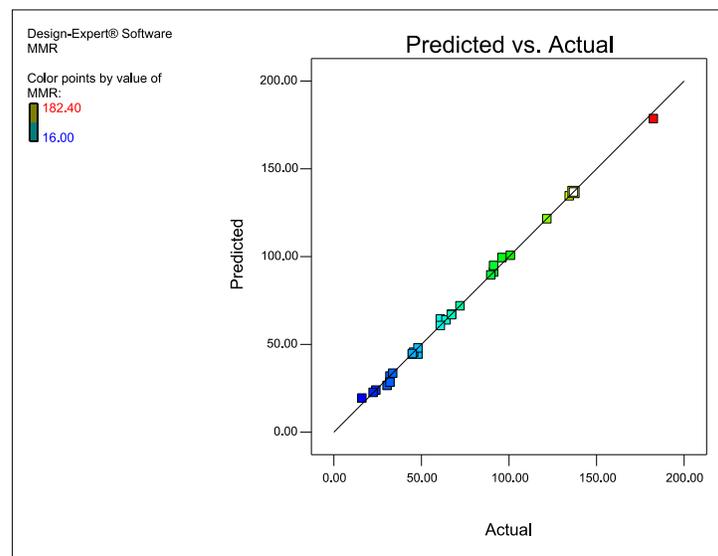


Figure III-27: Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour le débit de copeau MRR

III.8.4. Analyse de surface de réponse et graphique de contour pour MRR

Le graphe de surface de réponse *Figure III-28* représente les résultats de la surface de réponse (3D) pour le débit de copeau (*MRR*) en fonction des paramètres de coupe (V_c, f, a_p), elle présente aussi les contours en 2D, l'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la pente de la vitesse d'avance (f) est importante, donc ce facteur (f) possède l'effet le plus significatif sur le débit de copeau (*MRR*).

Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (MRR), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.

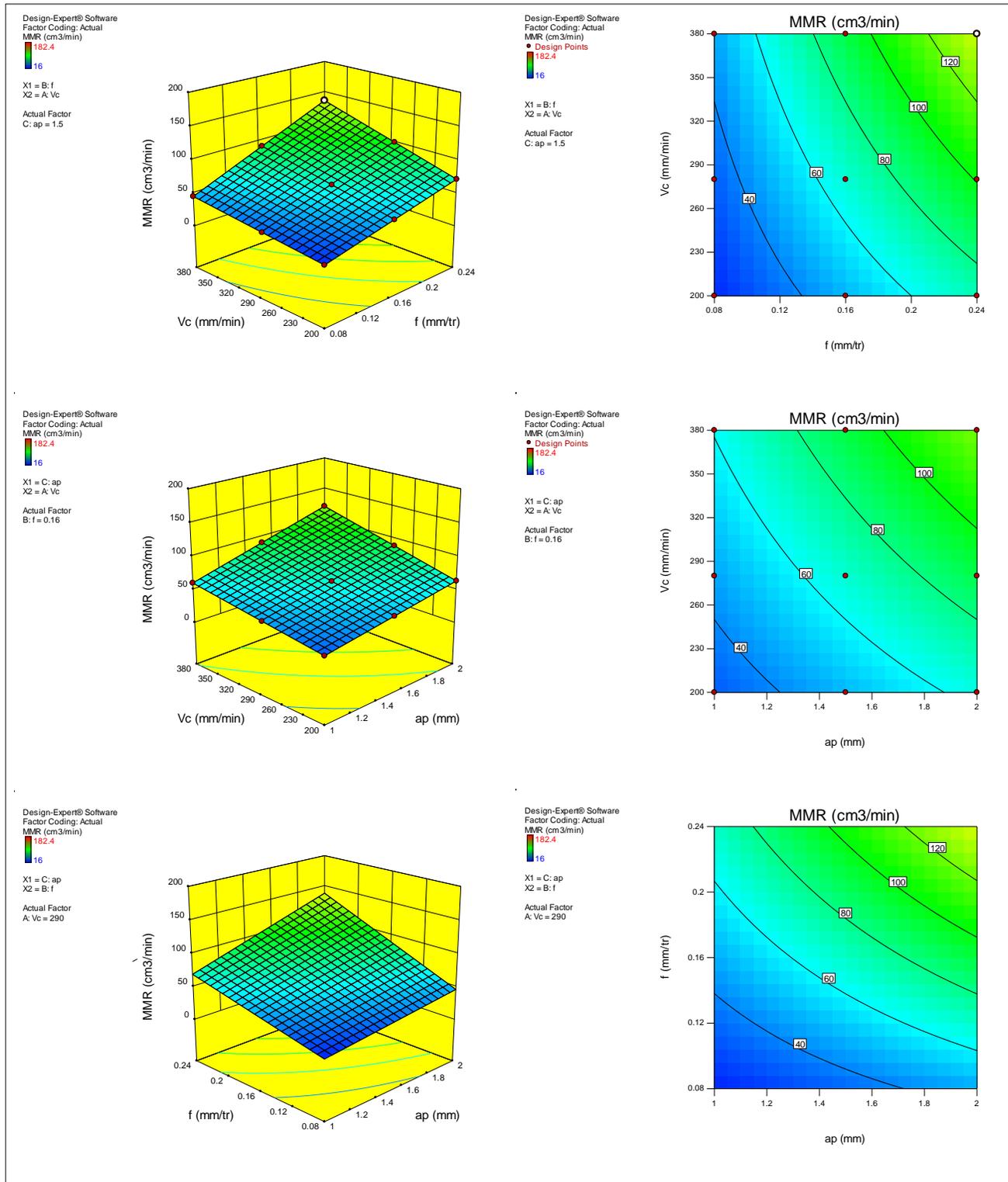


Figure III-28: Surface de réponse et le contour pour le débit de copeau MRR en fonction de (Vc, f, ap)

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de l'analyse de la variance *ANOVA*, l'analyse de régression en tournage conventionnel de polyamide PA6 a permis d'obtenir des modèles mathématiques à la fois pour les critères de la rugosité de surface (Ra et Rz), pour les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) et la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau (MRR) en fonction des paramètres d'usinage (V_c , f , ap). L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- L'analyse statistique de la variance *ANOVA* a confirmé que la profondeur de passe (ap) a la plus forte influence sur l'effort axial (F_x) avec la contribution 46,27%. L'analyse de variance *ANOVA* montre aussi que la vitesse d'avance (f) a la plus forte influence sur l'effort radial (F_y) et l'effort tangentiel (F_z) avec une contribution de 28,66 % et 51,47 %, successivement.
- L'analyse de variance *ANOVA* montre que la vitesse de l'avance (f) a la plus forte influence sur la rugosité de surface (Ra) et (Rz) avec la contribution de 64,83 % et 42,26 % successivement.
- L'analyse statistique de la variance *ANOVA* a confirmé que la vitesse d'avance (f) a la plus forte influence sur la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau (MRR) avec une contribution de 35,54 % et 50,69 %, respectivement.
- Les modèles mathématiques trouvés représentent un intérêt industriel important pour l'usinage de polyamide PA6, puisqu'ils permettent de faire des prédictions. Les R^2 des différents modèles sont tous élevés et dépasse la valeur de 88,40 %.

Chapitre IV

Optimisation des conditions de coupe

Dans ce chapitre, nous appliquons l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR). Le régime optimal a été déterminé pour chacun des paramètres technologiques d'usinage (Vitesse de coupe, avance, profondeur de passe) pour (la rugosité de surface, efforts de coupe, puissance de coupe, débit de copeau). Ce chapitre présente aussi trois types d'optimisations (Optimisation de qualité, Productivité et optimisation combiner).

IV.1. Introduction

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commandés afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération. Donc, l'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation des différentes méthodes d'optimisation.

Dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, l'objectif des chercheurs en général est de rechercher les conditions optimales d'usinage, qui permettent d'atteindre deux types d'objectifs, soit économiques soit technologiques soit les deux à la fois. Dans notre cas d'étude nous proposons de déterminer un régime optimal permettant d'atteindre des objectifs technologiques contradictoires. En effet par exemple pour atteindre un débit de copeau maximal il est demandé de travailler avec une vitesse de coupe (V_c) et une avance par tour (f) et profondeur de passe (ap) au niveau maximal, alors que si l'objectif est de minimiser la puissance de coupe il sera recommandé de travailler avec une vitesse de coupe (V_c), une avance par tour (f) et profondeur de passe (ap). Ce chapitre est consacré à l'optimisation en utilisant la méthodologie de surface de réponse (*MSR*).

Pour notre étude le travail est divisé en trois parties principales :

- Optimisation des conditions de coupe pour les rugosités minimales de surface usiné R_a et R_z (Qualité).
- Optimisation des conditions de coupe pour le débit de copeau maximale (Productivité).
- Optimisation combinée (Rugosités de surface usinée R_a et R_z , efforts de coupe (F_x , F_y , F_z), puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau (MRR)).

IV.1.1. Optimisation par la méthodologie de surface de réponse

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (*MSR*) a été étudié à trois niveaux différents, L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (*MSR*) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation de réponses

multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire 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.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface (*Ra et Rz*), les composantes de la force de coupe (*Fx, Fy et Fz*) souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (*MSR*) pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (*Ra et Rz*), les efforts de coupe (*Fx, Fy et Fz*).

Par outre vu il faut minimiser la puissance de coupe (*Pc*) et Maximiser le débit de coupeau (*MRR*) pour obtenir le régime optimal.

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, *F(x)*, est définie comme suit [20].

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \dots\dots\dots(IV-1)$$

Avec : $F(x) = -DF$

Où : *d_i* est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et *w_i* est la fonction de pondération de *d_i*. Pour différent 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 :

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

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \text{ Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \dots\dots\dots(IV-2)$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - \text{Sup}_i}{T_i - \text{Sup}_i} \right] \text{ Si } T_i \leq Y_i \leq \text{Sup}_i \dots\dots\dots(IV-3)$$

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

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

$$\begin{aligned}
 di &= 0 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i \\
 di &= \left[\frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \dots\dots\dots(IV-4) \\
 di &= 1 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 di &= 1 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i \\
 di &= \left[\frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \dots\dots\dots(IV-5) \\
 di &= 0 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i
 \end{aligned}$$

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 $F(x)$.

IV.1.2. Puissance de coupe

Lors d’une opération d’usinage la connaissance de la puissance de coupe est nécessaire afin de s’assurer que les organes de la machine permettent la transmission de cette puissance et qu’elle soit inférieure à la puissance disponible sur l’outil de la machine, et elle est donnée par la relation suivante :

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60 \times 10^3} [kw] \dots\dots\dots(IV-6)$$

Avec :

- P_c : Puissance de coupe [kw]
- F_z : Effort principal de coupe [N]
- V_c : Vitesse de coupe [m/min]

IV.1.3. Débit de copeau MRR

Le débit d'enlèvement de copeaux permet de mesurer la productivité d'une machine-outil 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 de copeaux enlevée par unité de temps. Il en résulte l'équation suivante :

$$Q = V_c \times A \dots\dots\dots(IV-7)$$

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

A : Section de coupe [m/min] avec :

$$A = ap \times f \dots\dots\dots(IV-8)$$

D'où :

$$Q = V_c \times ap \times f \dots\dots\dots(IV-9)$$

IV.2. Résultats relatifs aux puissance P_c et le débit de copeau MRR

Les résultats de la puissance de coupe est calculés en fonction des résultats expérimentaux de l'effort principale de coupe (F_z), le **Tableau IV-1** présente les résultats des paramètres technologiques calculées.

Tableau IV-1: Résultat des paramètres technologique calculées

N°	V_c [mm/min]	f [mm/tr]	ap [mm]	F_z [N]	P_c [w]	MRR [cm ³ /min]
1	200	0,08	1	20,38	67,93	16,00
2	200	0,08	1,5	37,28	124,27	24,00
3	200	0,08	2	35,42	118,07	32,00
4	200	0,16	1	43,34	144,47	32,00
5	200	0,16	1,5	59,77	199,23	48,00
6	200	0,16	2	65,88	219,60	64,00
7	200	0,24	1	43,13	143,77	48,00
8	200	0,24	1,5	74,27	247,57	72,00
9	200	0,24	2	95,98	319,93	96,00
10	280	0,08	1	12,57	58,66	22,40
11	280	0,08	1,5	30,37	141,73	33,60
12	280	0,08	2	19,54	91,19	44,80
13	280	0,16	1	45,88	214,11	44,80
14	280	0,16	1,5	74,43	347,34	67,20
15	280	0,16	2	76,89	358,82	89,60
16	280	0,24	1	57,89	270,15	67,20
17	280	0,24	1,5	92,30	430,73	100,80
18	280	0,24	2	105,81	493,78	134,40
19	380	0,08	1	32,11	203,36	30,40
20	380	0,08	1,5	42,52	269,29	45,60
21	380	0,08	2	48,98	310,21	60,80
22	380	0,16	1	43,07	272,78	60,80
23	380	0,16	1,5	49,00	310,33	91,20
24	380	0,16	2	76,69	485,70	121,60
25	380	0,24	1	37,47	237,31	91,20
26	380	0,24	1,5	70,69	447,70	136,80
27	380	0,24	2	99,17	628,08	182,40

IV.3. Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité R_a et R_z

Le **Tableau IV-2** présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe lors de tournage de polyamide PA6 pour les deux critères de rugosité (R_a , R_z).

Tableau IV-2: Contraintes d'optimisation pour la rugosité R_a et R_z

Conditions	Objectifs	Limite inférieur	Limite supérieur
V_c [m/min]	Gamme	200	380
f [mm/tr]	Gamme	0.08	0.24
ap [mm]	Gamme	1	2
R_a [μm]	minimisé	1.14	4.69
R_z [μm]	minimisé	6.51	20.0125

Le **Tableau IV-3** présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) des critères de rugosité (R_a et R_z), les paramètres de coupe optimaux s'avèrent : la vitesse de coupe (V_c) de 380 m/min, l'avance par tour (f) est (0,08) mm/tr et la profondeur de passe (ap) est 2 mm, Les rugosités de surface optimisées sont : $R_a = 1,446 \mu\text{m}$, $R_z = 6,763 \mu\text{m}$.

Tableau IV-3: Condition d'optimisation pour la rugosité R_a et R_z

N	V_c	f	ap	R_a	R_z	Désirabilité	
1	<u>380.000</u>	<u>0.080</u>	<u>2.000</u>	<u>1.446</u>	<u>6.763</u>	<u>0.947</u>	<i>Sélecté</i>
2	379.987	0.081	2.000	1.447	6.781	0.946	
3	380.000	0.080	1.994	1.447	6.781	0.946	
4	379.999	0.082	2.000	1.448	6.798	0.945	
5	380.000	0.080	1.988	1.449	6.801	0.945	
6	380.000	0.080	1.983	1.450	6.814	0.945	
7	379.982	0.083	2.000	1.449	6.820	0.944	
8	380.000	0.080	1.979	1.451	6.827	0.944	

La **Figure IV-1** représente le graphique de contour de désirabilité (94,70 %) pour les deux critères de rugosité de surface (R_a et R_z).

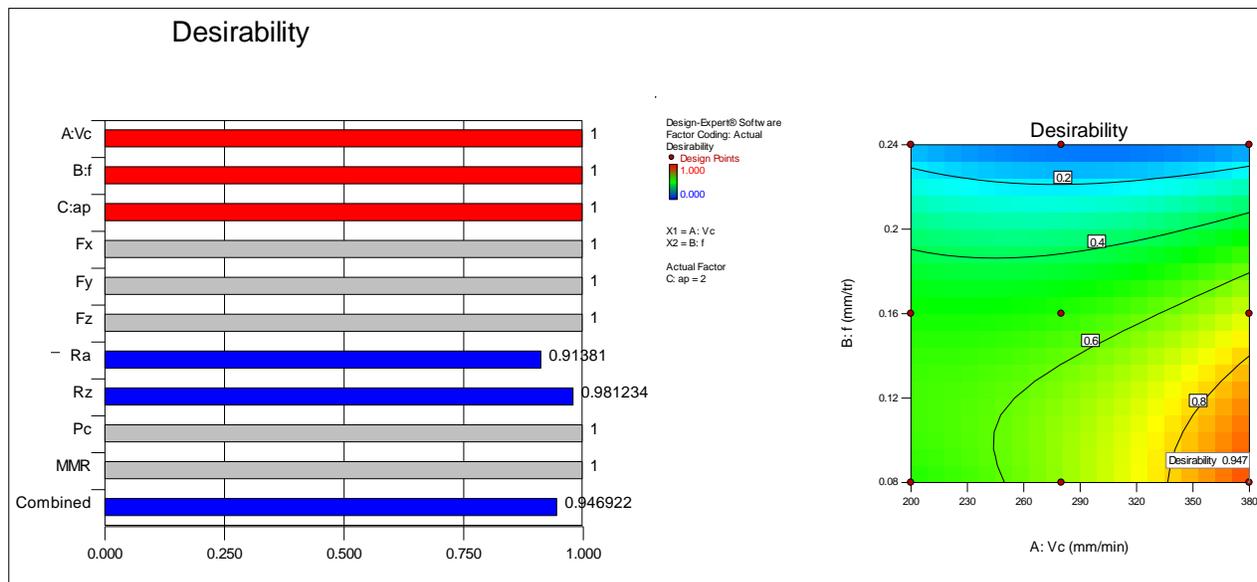


Figure IV-1: Le graphique de contour de désirabilité pour Ra et Rz

Le graphique de la solution optimale désiré est donné dans la **Figure IV-2** montre que la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d’usinage (Vc , f , ap) pour obtenir les plus basses valeurs des rugosités (Ra , Rz).

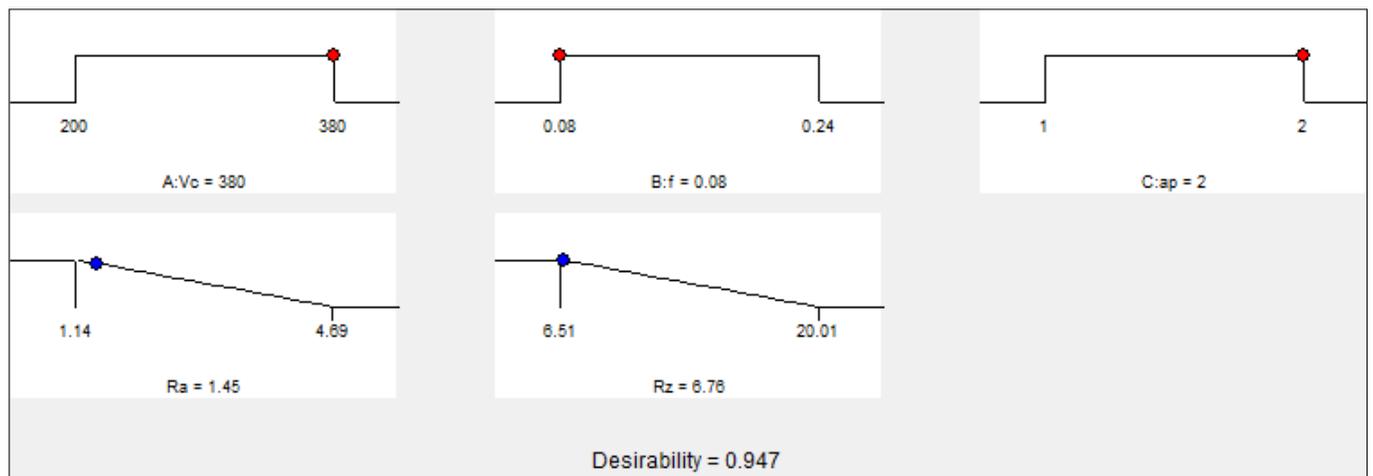


Figure IV-2: Diagramme d’optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (Ra , Rz)

IV.4. Optimisation des conditions de coupe pour le débit de copeau MRR

Le **Tableau IV-4** présente les conditions d’optimisation des paramètres de coupe lors de tournage de polyamide PA6 pour le débit de copeau (MRR).

Tableau IV-4: Contraintes d'optimisation pour le débit de copeau MRR

Conditions	Objectifs	Limite inférieur	Limite supérieur
V_c [m/min]	Gamme	200	380
f [mm/tr]	Gamme	0.08	0.24
a_p [mm]	Gamme	1	2
MRR [cm ³ /min]	maximisé	16	182.4

Le **Tableau IV-5** présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour le débit de copeau (MRR), les paramètres de coupe optimaux s'avèrent : la vitesse de coupe (V_c) de 380 m/min, l'avance par tour (f) est 0,24 mm/tr et la profondeur de passe (a_p) est 2 mm, le débit de copeau (MRR) optimisée est : $MRR = 178,667 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Tableau IV-5: Condition d'optimisation pour le débit de copeau MRR

N	V_c	f	a_p	MRR	Désirabilité	
1	380.000	0.240	2.000	178.667	0.978	Sélecté
2	380.000	0.240	2.000	178.666	0.978	
3	379.260	0.240	2.000	178.341	0.976	
4	380.000	0.240	1.996	178.334	0.976	
5	379.068	0.240	2.000	178.256	0.975	
6	380.000	0.239	2.000	178.151	0.974	
7	380.000	0.240	1.994	178.151	0.974	
8	380.000	0.239	2.000	177.778	0.972	

La **Figure IV-3** représente le graphique de contour de désirabilité (97,80 %) pour le débit de copeau (MRR).

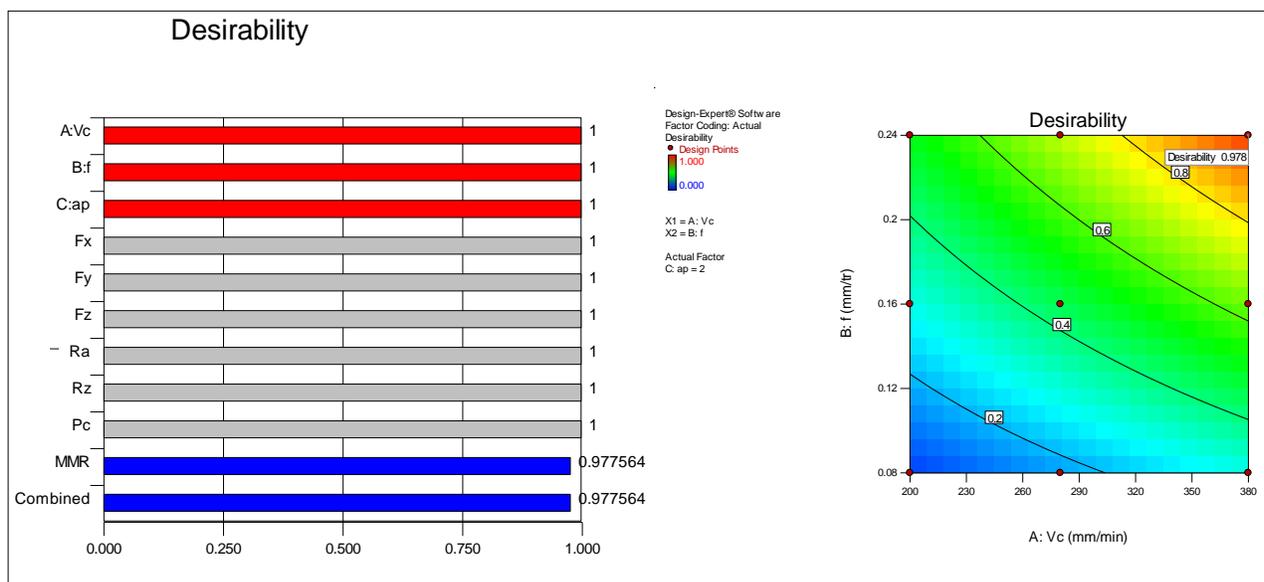


Figure IV-3: Le graphique de contour de désirabilité pour le débit de copeau MRR

Le graphique de la solution optimale désiré est donné dans la **Figure IV-4**, cette figure montre que la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c, f, ap) pour obtenir la plus grand valeur du débit de copeau (MRR).

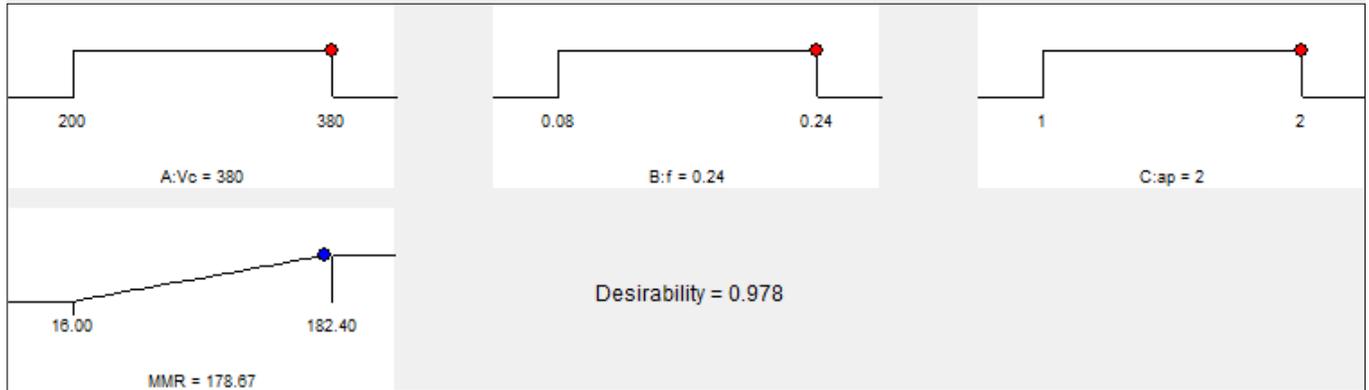


Figure IV-4: Diagramme d'optimisation de réponse du débit de copeau MRR

IV.5. Optimisation des conditions de coupe pour $F_x, F_y, F_z, Ra, Rz, Pc, MRR$

Le **Tableau IV-6** présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe lors de tournage de polyamide PA6 pour les deux critères de rugosité (Ra, Rz) et les composantes des efforts de coupe (F_x, F_y et F_z) et la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau (MRR).

Tableau IV-6: Contraintes d'optimisation combinée

Conditions	Objectifs	Limite inférieur	Limite supérieur
V_c [m/min]	Gamme	200	380
f [mm/tr]	Gamme	0.08	0.24
ap [mm]	Gamme	1	2
F_x [N]	Minimisé	10.13	48.14
F_y [N]	Minimisé	8.3	36.45
F_z [N]	Minimisé	12.57	105.81
Ra [μm]	Minimisé	1.14	4.69
Rz [μm]	Minimisé	6.51	20.0125
P_c [μm]	Minimisé	58.66	628.077
MRR [cm^3/min]	Maximisé	16	182.4

Le **Tableau IV-7** présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) des critères de rugosité (Ra et Rz) et des composantes de l'effort de coupe (F_x, F_y et F_z), et la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau (MRR), Les paramètres de coupe optimales s'avèrent : la vitesse de coupe (V_c) de 380 m/min, l'avance par tour (f) de 0,117 mm/tr et la profondeur de passe (ap) de 1 mm.

Les rugosités de surface optimisées sont : $Ra = 1,750 \mu\text{m}$, $Rz = 8,156 \mu\text{m}$, les efforts de coupe optimisés sont : $F_x = 22,945 \text{ N}$, $F_y = 19,079 \text{ N}$ et $F_z = 33,728 \text{ N}$. et la puissance de coupe optimisée est $P_c = 208,155$ puis le débit de copeau optimisée est : $MRR = 42,484 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Tableau IV-7: Condition d'optimisation combinée

N	V_c	f	ap	F_x	F_y	F_z	Ra	Rz	P_c	MRR	Désirabilité	
1	380.000	0.117	1.000	22.945	19.079	33.728	1.570	8.156	208.155	42.484	0.602	Sélecté
2	380.000	0.116	1.000	22.879	18.986	33.541	1.566	8.139	207.022	42.056	0.602	
3	380.000	0.115	1.000	22.829	18.916	33.401	1.563	8.128	206.180	41.740	0.602	
4	380.000	0.120	1.000	23.141	19.363	34.292	1.586	8.211	211.593	43.803	0.602	
5	380.000	0.113	1.000	22.672	18.698	32.966	1.553	8.095	203.568	40.771	0.602	
6	380.000	0.109	1.000	22.411	18.345	32.263	1.540	8.051	199.373	39.249	0.601	
7	379.544	0.119	1.000	23.144	19.341	34.168	1.587	8.223	210.556	43.396	0.601	
8	380.000	0.127	1.000	23.541	19.975	35.511	1.627	8.364	219.132	46.816	0.601	

La **Figure IV-5** représente le graphique de contour de désirabilité (60,02 %) pour les deux critères de rugosité de surface (Ra et Rz) et les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) et la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau (MRR).

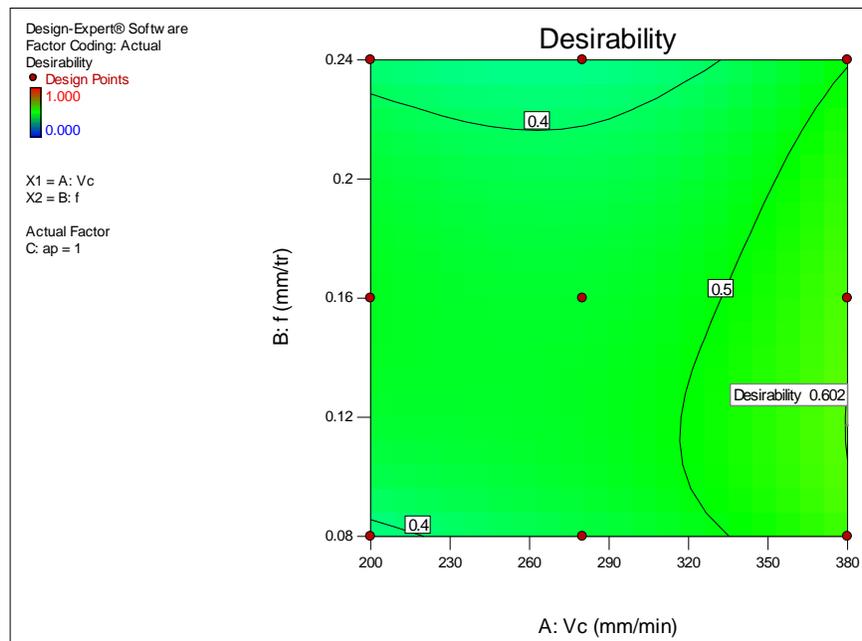


Figure IV-5: Le graphique de contour de désirabilité

Le graphique de la solution optimale désiré est donné dans la **Figure IV-6**, cette figure montre que la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f , ap) pour obtenir la plus basses valeurs des efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) et plus basses valeurs des rugosités (Ra , Rz) et plus basse valeur de la puissance de coupe (P_c) et plus grand valeur du débit de copeau (MRR).

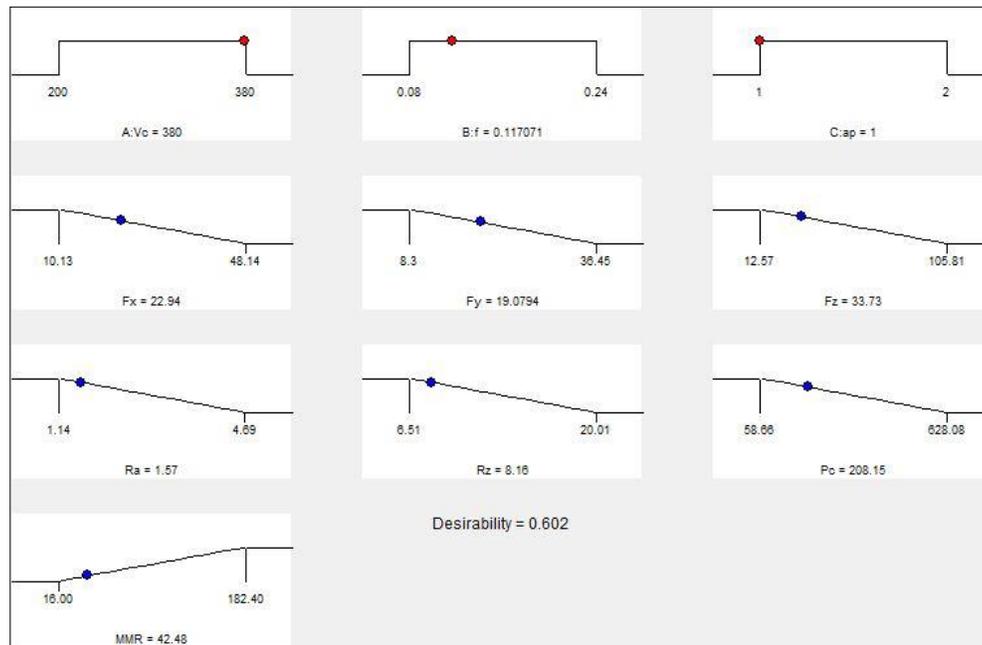


Figure IV-6: Diagramme d'optimisation de réponses multiples de la rugosité de surface (R_a , R_z) et les efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) et la puissance de coupe (P_c) et le débit de copeau (MRR)

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'optimisation par la méthode (*MSR*) pour trois différents cas :

- Pour l'objectif d'optimisation relative à la qualité (Rugosité minimale) :

L'optimisation par la méthode de surface de réponse (*MSR*) des conditions de coupe les mieux adaptées pour les rugosités ($R_a = 1,446 \mu\text{m}$ et $R_z = 6,763 \mu\text{m}$), nous a donné le régime optimal ($V_c = 380 \text{ m/min}$; $f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $ap = 2 \text{ mm}$) avec une désirabilité de 94,70 %.

- Pour l'objectif d'optimisation relative à la productivité (Débit de copeau maximale) :

L'optimisation des conditions de coupe les mieux adoptées pour le débit de copeau ($MRR = 178,667 \text{ cm}^3/\text{min}$), nous a donné le régime optimal ($V_c = 380 \text{ m/min}$; $f = 0,24 \text{ mm/tr}$; $ap = 2 \text{ mm}$) avec une désirabilité de 97,80 %.

- Pour l'objectif d'optimisation combinée :

L'optimisation des conditions de coupe les mieux adoptées pour les efforts de coupe ($F_x = 22,945 \text{ N}$; $F_y = 19,079 \text{ N}$; $F_z = 33,728 \text{ N}$) et les rugosités ($R_a = 1,570 \mu\text{m}$; $R_z = 8,156 \mu\text{m}$) et la puissance de coupe ($P_c = 208,155 \text{ w}$) et le débit de copeau ($MRR = 42,484 \text{ cm}^3/\text{min}$), nous a donné le régime optimal ($V_c = 380 \text{ m/min}$; $f = 0,117 \text{ mm/tr}$; $ap = 1 \text{ mm}$) avec une désirabilité de 60,20 %.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire sur la modélisation de la rugosité de surface, les efforts de coupe, la puissance de coupe et le débit de copeau et l'optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage du polyamide PA6 nous a conduit aux résultats suivants :

- Les résultats des efforts de coupe montrent que la profondeur de passe (ap) a une influence significative sur l'effort axial (F_x), avec un pourcentage de contribution de 46,27 %, Les résultats montrent aussi que le pourcentage de contribution de la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f) sont (10,99 % ; 10 %) successivement. La vitesse d'avance (f) est une influence significative sur l'effort (F_y), avec un pourcentage de contribution de 28,66 %, Les résultats montrent aussi que le pourcentage de contribution de la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (ap) sont (25,55 % ; 12,92 %) successivement. La vitesse d'avance a une influence significative sur l'effort (F_z), avec un pourcentage de contribution de 51,47 %, Les résultats montrent aussi que le pourcentage de contribution de la profondeur de passe (ap) de 27,68 %. La vitesse de coupe (V_c) n'est pas une influence significative sur l'effort (F_z).
- Les résultats des critères de rugosités montrent que l'avance (f) a une influence significative sur la rugosité (R_a) avec le pourcentage de contribution de 64,83 %, Les résultats montrent aussi que le pourcentage de contribution de la vitesse de coupe (V_c) de 15,79 %. La vitesse d'avance a une influence significative sur la rugosité (R_z), avec un pourcentage de contribution de 42,26 %, les résultats montrent aussi que le pourcentage de contribution de la vitesse de coupe (V_c) de 21,47 %. La profondeur de passe (ap) n'est pas une influence significative sur les rugosités de surface (R_a , R_z).
- Les résultats de la puissance de coupe montrent que l'avance (f) a une influence significative sur la puissance de coupe (P_c), avec un pourcentage de contribution de 35,54 %, les résultats montrent aussi que le pourcentage de contribution de la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (ap) sont (26,28 % ; 21,66 %) successivement.
- Les résultats de débit de copeau montrant que l'avance (f) a une influence significative sur le débit de copeau (MRR), avec un pourcentage de contribution de 50,69 %. Les résultats montrent aussi que le pourcentage de contribution de la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (V_c) sont (22,53 % ; 19,57 %) successivement.

- Pour l'objectif d'optimisation relative à la qualité (Rugosité minimale) :

L'optimisation par la méthode de surface de réponse (*MSR*) des conditions de coupe les mieux adaptées pour les rugosités ($Ra = 1,446 \mu\text{m}$ et $Rz = 6,763 \mu\text{m}$), nous a donné le régime optimal ($Vc = 380 \text{ m/min}$; $f = 0,08 \text{ mm/tr}$; $ap = 2 \text{ mm}$) avec une désirabilité de 94,70 %.

- Pour l'objectif d'optimisation relative à la productivité (Débit de copeau maximale) :

L'optimisation des conditions de coupe les mieux adoptées pour le débit de copeau ($MRR = 178,667 \text{ cm}^3/\text{min}$), nous a donné le régime optimal ($Vc = 380 \text{ m/min}$; $f = 0,24 \text{ mm/tr}$; $ap = 2 \text{ mm}$), avec une désirabilité de 97,80 %.

- Pour l'objectif d'optimisation combinée :

L'optimisation des conditions de coupe les mieux adoptées pour les efforts de coupe ($Fx = 22,945 \text{ N}$; $Fy = 19,079 \text{ N}$; $Fz = 33,728 \text{ N}$) et les rugosités ($Ra = 1,570 \mu\text{m}$; $Rz = 8,156 \mu\text{m}$) et la puissance de coupe ($Pc = 208,155 \text{ w}$) et le débit de copeau ($MRR = 42,484 \text{ cm}^3/\text{min}$), nous a donné le régime optimal ($Vc = 380 \text{ m/min}$; $f = 0,117 \text{ mm/tr}$; $ap = 1 \text{ mm}$), avec une désirabilité de 60,20 %.

Référence bibliographique

- [1] GARANT- La marque exclusive du groupe Hoffmann, Pages 78-81.
- [2] Les matières plastiques Généralités Fonds de formation professionnelle de la Construction. Rue Royale 451000 Bruxelles.
- [3] **Alain, D. (1999)**. Usinage des polymères. Ingénieur responsable du service Conception-industrialisation des polymères : Centre technique des industries mécaniques (CETIM).
- [4] Catalogue **Sandvik corommat**. Usures des outils de coupe.
- [5] **Jacques Goupy, Lee Creighton**, Introduction aux plans d'expériences, 3^{ème} Edition, DUNOD
- [6] **M. Madić, D. M. (2012, Sep 11)**. Optimization of Surface Roughness When Turning Polyamide Using ANN-IHSA Approach.434.
- [7] **Creighton, J. G. (2001-2006)**. Introduction aux plans d'expériences. 3^{ème} Edition, 184-194.
- [8] **M. Marković, M. Madić, G. Petrović**, Assessing the performance of improved harmony search algorithm (IHSA) for the optimization of unconstrained functions using Taguchi experimental design, Scientific Research and Essays Vol. 7, No. 12, (2012) pp. 1312-1318.
- [9] **GAITONDE, VN, et al.** "Surface roughness analysis in high-speed drilling of unreinforced and reinforced polyamides." Journal of composite materials46.21 (2012): 2659-2673.
- [10] **Madic, Milos.** "Optimization of surface roughness when turning polyamide using ANN-IHSA approach." International Journal of Engineering & Technology 1.4 (2012): 432-443.
- [11] **Davim, J. Paulo, and Francisco Mata.** "A comparative evaluation of the turning of reinforced and unreinforced polyamide." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 33.9-10 (2007): 911-914.

- [12] **Lazarević, Dragoljub, et al.** "Robust conditions for cutting force minimization in polyamide turning process." *FME Transactions* 43.2 (2015): 114-118.
- [13] **Madić, M., V. Marinković, and M. Radovanović.** "Mathematical modeling and optimization of surface roughness in turning of polyamide based on artificial neural network." *Mechanics* 18.5 (2012): 574.
- [14] **Süleyman N, Süleyman Y, Erol T.** Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology, *Measurement*, 44, pp. 580–587 (2011).
- [15] **Suresh R, Basavarajappa S, Samuel G.L.** Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer-coated carbide tool. *Measurement*, 45, pp.1872–1884 (2012).
- [16] **Khuri A.I, Cornel J.** Response surfaces: design and analysis, marcel dekker (éditeur), New York, NY, USA, (1987).
- [17] **Myers R.H.** Montgomery D.C. Response surface methodology, 2nd ed. Wiley & Sons (éditeurs), New York, NY, USA, (2002).
- [18] **Gained Y.N, Karnik S.R, Faustino M, Davim J.P.** Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in edm electrodes. *Int J Refract Metals hard Mater*, 27, pp. 754-63 (2009).
- [19] **Zarepour H, Fadaei H, Karimi D, Amini S.** Statistical analysis on surface roughness in edm process of tool steel DIN 1.2714 used in forging dies. In: proceedings of Ampt, Las Vegas, USA, July 30-august 3 (2006).
- [20] **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).

