

République Algérienne Démocratique & Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

De

L'université de 8 Mai 1945 Guelma

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Productique

Présentée par

Amel CHABBI

**Modélisation et optimisation des paramètres d'usinage lors
du tournage du polyacétal POM C**

Directeur de thèse : Pr. YALLESE Mohamed Athmane

Devant le jury d'examen composé de :

Pr. CHAOUI. K	Professeur à l'université Badji Mokhtar- Annaba	Président
Pr. ZEGHIB. N/E	Professeur à l'université Badji Mokhtar- Annaba	Examineur
MC. BELBAH. A	MC/A à l'université 8 Mai 1945- Guelma	Examineur
Pr. YALLESE. M.A	Professeur à l'université 8 Mai 1945- Guelma	Rapporteur
Dr. BELHADI. S	MC/B à l'université 8 Mai 1945- Guelma	invité

Juin 2018

Dédicaces

Je tiens à dédier cette thèse :

A mes très chers parents, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

Mes sœurs et mes frères ;

Toute ma famille ;

Mes chers ami(e)s.

Remerciements

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

Je remercie énormément Monsieur **YALLESE MOHAMMED ATHMANE**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 de Guelma d'avoir bien voulu accepter de diriger ce travail, pour son aide et ses encouragements. Je pense avoir reçu le message sur le but de cette recherche et avoir eu une vision d'une future recherche. Qu'il trouve ici mes profonds respects.

J'adresse aussi mes vifs remerciements à Monsieur **CHAOUI KAMEL**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar-Annaba qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur **ZEGHIB NACER EDDINE**, Professeur au département de Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar-Annaba, Monsieur **BELBAH AHMED**, Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 de Guelma et Monsieur **BELHADI SALIM**, Docteur au département de Génie Mécanique, Université 8 Mai 1945 de Guelma qui ont accepté d'examiner mon travail et participer au jury de thèse.

Je remercie profondément docteur **LAKHDAR BOUZID** qui n'a épargné aucun effort pour m'aider.

Je remercie aussi mes collègues doctorants ainsi que tous les membres et les techniciens du laboratoire de la Mécanique et de Structures (LMS).

Je remercie tous ceux qui ont aidé pour la réalisation de ce travail.

ملخص

تستخدم البوليمرات بنحو متزايد في الصناعة نظرا للمزايا العديدة التي تتمتع بها، مثل كثافتها المنخفضة ومقاومتها الممتازة للتآكل، وإمكانية استخدامها في الإنتاج الضخم، وانخفاض معامل الاحتكاك وإمكانية أن تعامل بهدوء ودون تزييت خارجي.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة وتحديد تأثير شروط قطع، أي سرعة القطع، التغذية وعمق التمريرة، زاوية التوجيه الرئيسية والتزييت على المعايير التكنولوجية للتصنيع (خشونة السطح، قوى القطع وضغط القطع المحدد ودرجة الحرارة في منطقة القطع) أثناء تشغيل البوليمر **(POM C) Polyoxyméthylène** باستعمال أداة قطع من الكربيد المعدني.

في جزء اخر من هذه الأطروحة ركزنا على استخراج نماذج رياضية لكل من معايير الخشونة وقوى القطع، بدلالة شروط القطع، وذلك باستخدام طريقتين للنمذجة: منهجية استجابة السطح **RSM** والشبكات العصبية الاصطناعية **(ANN)** ثم قمنا بمقارنة النتائج المتحصل عليها لمعرفة الطريقة الأكثر فعالية ودقة.

أما الجزء الأخير من هذا البحث فيتعلق بإيجاد شروط القطع المثلى في حالة وجود هدف وحيد وفي حالة تعدد الأهداف باستعمال تصميم **(Taguchi L16)**، منهجية استجابة السطح **(RSM)** بالتحليل التحسيني **(DF)** والتحليل العلائقي الرمادي **(GRA)**. تثبت النتائج المتحصل عليها أن طريقة **Taguchi** يمكن أن تكون أكثر كفاءة في حالة الاستجابة الفردية، ولكن أساليب **(GRA)** و **(DF)** هي الأفضل للتطوير متعدد الأهداف.

كلمات البحث:

خراطة، POM C، تصميم التجارب، ANOVA، العملية التحسينية، Taguchi، RSM، ANN، GRA.

Résumé

Les polymères sont de plus en plus utilisés dans l'industrie en raison de plusieurs avantages tels que : leurs faible densité, leurs excellente résistance à la corrosion, la possibilité de production en série, leurs faible coefficient de frottement et la possibilité d'être traité tranquillement et sans lubrification externe.

Le présent travail concerne une étude expérimentale portant sur les effets des paramètres de coupe sur la rugosité de surface, les efforts de coupe, la puissance de coupe, la pression de coupe et la température dans la zone coupe lors du tournage du polymère Polyoxyméthylène (POM C). Pour cela, un outil de coupe en carbure métallique a été utilisé. Le travail est divisé en trois parties. La première concerne les essais paramétriques (uni-factoriels), où l'évolution des paramètres d'usinage (critères de rugosité, composantes de l'effort de coupe et puissance de coupe, puissance spécifique de coupe et la température dans la zone de coupe) est étudiée en variant la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe, l'angle de direction principale de l'outil de coupe et la lubrification. La deuxième partie traite la modélisation des paramètres de sortie : rugosité arithmétique de surface, effort de coupe, puissance de coupe et le débit du copeau enlevé en utilisant les résultats d'un plan factoriel complet (L27). Deux techniques de modélisation ont été utilisées à savoir la méthode des surfaces de réponse (RSM) et les réseaux de neurones artificiels (ANN). Les résultats obtenus relatifs à deux techniques sont comparés afin de discerner la méthode la plus efficace et précise.

La dernière partie du travail est réservée à l'optimisation mono et multi-objective afin de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs de l'optimisation. Dans ce cadre, trois techniques d'optimisation ont été utilisées : La méthode de Taguchi, la fonction de désirabilité (DF) et l'analyse relationnelle grise (GRA). Les résultats trouvés prouvent que la méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse, par contre les méthodes GRA et DF sont les meilleurs pour l'optimisation multi-objectif.

Mots clés : Usinage, POM C, Plans d'expérience, ANOVA, optimisation, Taguchi, RSM, ANN, GRA.

Abstract

Polymers are more and more used in the industry because of several advantages such as low density, excellent corrosion resistance, the possibility of mass production, low coefficient of friction and the possibility of being treated quietly and without external lubrication.

The present work concerns an experimental study of the effects of cutting parameters on surface roughness, cutting force, cutting power, specific cutting force and cutting temperature during the turning of the Polyoxymethylene polymer (POM C). For this, a metal carbide-cutting tool was used. The work is divided into three parts. The first concerns parametric tests (uni-factorials), where the evolution of machining parameters (roughness criteria, components of cutting force, cutting power, specific cutting power and temperature in the cutting area) was studied by varying the cutting speed, feed rate, depth of cut, the main direction angle of the cutting tool and lubrication. The second part deals with the modeling of the output parameters (arithmetic roughness, cutting force, cutting power, and material removal rate) using the results of a complete factorial design (L27). Two modeling techniques were used: the Surface Response Method (RSM) and Artificial Neural Network (ANN). The results obtained for two techniques are compared to discern the most efficient and accurate method.

The last part of the work is reserved for mono and multi-objective optimization in order to find the optimal values of the cutting parameters in relation to the objectives of the optimization. In this framework, three optimization techniques were used: Taguchi's method, Desirability Function (DF) and the Grey Relational Analysis (GRA). The results found prove that Taguchi method can be more efficient in the case of a single response, but GRA and DF methods are the best for multi-objective optimization.

Key words: Machining, POM C, Design of Experiment, ANOVA, optimization, Taguchi, RSM, ANN, GRA.

Index des figures

Figure I.1	Choix des paramètres de coupe	7
Figure I.2	Dimensions de coupe dans le cas de tournage	8
Figure I.3	Vitesse de coupe (V_c)	9
Figure I.4	Vitesse d'avance (V_f)	9
Figure I.5	L'avance (f) dans le cas de tournage	9
Figure I.6	Profondeur de passe	10
Figure I.7	Composantes de l'effort de coupe	11
Figure I.8	Principaux critères de rugosité	12
Figure I.9	Etapas d'optimisation par la méthode de Taguchi	15
Figure I.10	Schéma algorithmique : Schématisation globale d'un A.G	16
Figure I.11	Schéma d'un neurone unique	16
Figure I.12	Modèle schématique de la synthèse d'un polymère	17
Figure I.13	Classification des plastiques	17
Figure I.14	Principales familles de thermoplastiques	18
Figure I.15	Illustration des différents états de la matière	19
Figure I.16	Structure d'un polymère semi-cristallin	20
Figure I.17	Géométrie type d'un outil de tournage	22
Figure I.18	Températures T_g et T_f	24
Figure I.19	Formule chimique du Polyoxyméthylène (POM)	24
Figure I.20	Engrenage conique en POM C	25
Figure I.21	Influence de paramètre de coupe sur la l'effort de coupe	28
Figure I.22	Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface	29
Figure I.23	Effet de la profondeur de passe sur la rugosité de surface	29
Figure I.24	Effet de l'avance sur la rugosité de surface	29
Figure I.25	Effet de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe	29
Figure I.26	Effet de la profondeur de passe sur l'effort de coupe	29
Figure I.27	Effet de l'avance sur l'effort de coupe	30
Figure I.28	Diagramme des effets principaux pour la rugosité de surface	31
Figure I.29	Effet de la vitesse d'avance et la vitesse de coupe sur l'effort (F_c)	32
Figure I.30	Effet de l'avance et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface (R_a)	32
Figure I.31	Effet de l'avance et la vitesse de coupe sur la puissance de coupe (P)	33
Figure I.32	L'influence de (f) et (ap) à différentes combinaisons de (V_c) et du rayon du bec de l'outil : 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	34
Figure I.33	Structure de l'ANN utilisée pour l'estimation de la rugosité de surface	34
Figure I.34	Effet de l'avance sur (K_s) lors de l'usinage du composite PA66-GF30 et du polyamide PA66 à $V_c = 70$ m / min et $ap = 150$ mm : (a- d) pour le	35

polymère PA66-GF30 et (e- h) pour le Polyamide PA66

Figure I.35	Effet de l'avance et du rayon du bec de l'outil sur la rugosité de surface du composite PA66-GF30 (a et b) et du polyamide PA66 (c et d)	36
Figure II.1	Tour à charioter et à fileter modèle SN40C	39
Figure II.2	Eprouvettes pour différents essais	39
Figure II.3	Porte outil utilisé	40
Figure II.4	Montage du dynamomètre sur la table de la machine	41
Figure II.5	Capteur d'effort de coupe KISTLER	42
Figure II.6	Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE	42
Figure II.7	Chaîne de mesure des efforts de coupe	43
Figure II.8	Rugosimètre 2D	44
Figure II.9	Plate-forme 3D de métrologie optique modulaire Altisurf 500	44
Figure II.10	Rugosité de surface en 3D mesurée par la plate-forme Altisurf 500	45
Figure II.11	Schéma de la configuration expérimentale	46
Figure II.12	Pyromètre à infrarouge	47
Figure III.1	Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface	59
Figure III.2	Effet des paramètres de coupe sur l'effort de coupe	61
Figure III.3	Effet des paramètres de coupe sur l'effort spécifique (K_s)	63
Figure III.4	Influence des paramètres de coupe sur la puissance de coupe	65
Figure III.5	Effet de l'angle de direction de l'outil de coupe sur l'effort de coupe	66
Figure III.6	Effet de la profondeur de passe sur la rugosité de surface	68
Figure III.7	Effet de l'avance sur la rugosité de surface	70
Figure III.8	Effet de la profondeur de passe sur l'effort de coupe en usinage à sec et lubrifié	71
Figure III.9	Effet de l'avance sur la rugosité de surface pour un usinage à sec et lubrifié	73
Figure III.10	Effet de la profondeur de passe sur l'effort de coupe	75
Figure III.11	Effet de l'avance par tour sur la rugosité de surface	77
Figure III.12	Evolution de la température dans la zone de coupe en fonction de la vitesse de coupe	78
Figure III.13	Evolution de la température dans la zone de coupe en fonction de la profondeur de passe	78
Figure III.14	Evolution de la température dans la zone de coupe en fonction de l'avance	79
Figure IV.1	Contribution des termes significatifs du modèle de la rugosité de surface (R_a)	87
Figure IV.2	Topographié d'une surface usinée avec deux différentes avances	88
Figure IV.3	Graphes de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la rugosité (R_a)	89
Figure IV.4	Graphiques des effets principaux pour la rugosité (R_a)	90
Figure IV.5	Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité de surface (R_a)	91

Figure IV.6	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Ra)	92
Figure IV.7	Contribution des termes significatifs du modèle de l'effort de coupe (Fz)	93
Figure IV.8	Graphe de PARETO des effets des paramètres de l'effort de coupe (Fz)	94
Figure IV.9	Graphiques des effets principaux pour l'effort de coupe (Fz)	94
Figure IV.10	Surface de réponse estimée pour l'effort de coupe (Fz) selon Vc, f et ap	95
Figure IV.11	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Fz)	96
Figure IV.12	Répartition des contributions des termes significatifs du modèle du de la puissance de coupe (Pc)	97
Figure IV.13	Graphe de PARETO des effets des paramètres de la puissance de coupe (Pc)	98
Figure IV.14	Graphiques des effets principaux pour la puissance de coupe (Pc)	98
Figure IV.15	Surface de réponse estimée pour la puissance de coupe (Pc) selon Vc, f, ap	99
Figure IV.16	Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (Pc)	100
Figure IV.17	Contribution des termes significatifs du modèle de (MRR)	101
Figure IV.18	Graphe de PARETO des effets des paramètres du (MRR)	101
Figure IV.19	Graphiques des effets principaux pour le débit du coupeau enlevé (MRR)	102
Figure IV.20	Surface de réponse estimée pour le (MRR) en fonction de Vc, f, ap	103
Figure IV.21	Vérification des résultats obtenus pour (Ra) et (Fz)	104
Figure IV.22	Graphique de l'optimisation de la rugosité de surface (optimisation de la qualité)	107
Figure IV.23	Graphique de l'optimisation du débit de coupeau enlevé (optimisation de la productivité).	108
Figure IV.24	Graphique de contour de désirabilité	110
Figure IV.25	Graphique de l'optimisation combinée de (Ra), (Fz), (Pc) et (MRR)	111
Figure IV.26	Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses ainsi que les désirabilités combinés=0,917	111
Figure V.1	a) Un neurone biologique ; b) Analogie entre neurone biologique et neurone formel	114
Figure V.2	Schéma d'un neurone formel	116
Figure V.3	Types de fonctions de transfert	117
Figure V.4	Structure et comportement du perceptron	117
Figure V.5	Principe d'un perceptron simple	118
Figure V.6	Perceptron multi-couches : 02 entrées+02 couches cachées (10 neurones) et 01 sortie	118
Figure V.7	Système d'apprentissage du réseau de neurone	119
Figure V.8	Architecture neurale choisie pour la rugosité (Ra)	123
Figure V.9	Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra)	125
Figure V.10	Architecture neurale choisie pour l'effort (Fz)	125
Figure V.11	Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour l'effort de coupe (Fz)	127

Figure V.12	Comparaison entre les valeurs expérimentales, prédites par RSM et ANN : a) Rugosité de surface (Ra), b) Effort tangentiel de coupe (Fz)	129
Figure VI.1	Tracé d'interaction (3D) pour (Ra)	138
Figure VI.2	Tracé d'interaction (3D) pour (MRR)	139
Figure VI.3	Graphique des effets principaux pour (Ra)	140
Figure VI.4	Graphique des effets principaux pour (MRR)	140
Figure VI.5	Qualité Relationnelle Grise (GRG)	144
Figure VI.6	Le graphique de fonction pour l'optimisation de (Ra) et (MRR)	146
Figure VI.7	Graphique de contour de désirabilité pour (Ra) et (MRR)	147

Index des tableaux

Tableau I.1	Paramètres pour le tournage de plastiques	22
Tableau I.2	Propriétés physiques moyennes du POM renforcé ou non	26
Tableau I.3	Comparaison des propriétés importantes	30
Tableau II.1	Propriétés techniques du POM C	40
Tableau II.2	Réalisation d'essais d'après la méthode uni-factorielle	48
Tableau II.3	Conditions de coupe pour les essais uni-factorielle	49
Tableau II.4	Matrice de planification pour un plan factoriel complet (L27)	53
Tableau II.5	Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L16)	54
Tableau IV.1	Valeurs expérimentales de Ra , Fz , Pc et MRR en fonction de Vc, f et ap	86
Tableau IV.2	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra)	87
Tableau IV.3	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort de coupe (Fz)	92
Tableau IV.4	Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe (Pc)	97
Tableau IV.5	Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de coupe enlevé (MRR)	101
Tableau IV.6	Résultats des expériences de confirmation	104
Tableau IV.7	Conditions d'optimisations	106
Tableau IV.8	Solutions pour l'optimisation de la qualité de surface (Ra)	107
Tableau IV.9	Solutions pour l'optimisation du débit de coupe enlevé (MRR)	108
Tableau IV.10	Solutions pour l'optimisation combinée	109
Tableau V.1	Résultats expérimentaux des paramètres de performance	122
Tableau V.2	Conditions de la modélisation de la rugosité de surface (Ra) par les ANN	124
Tableau V.3	Conditions de la modélisation de l'effort de coupe (Fz) par les ANN	126
Tableau V.4	Coefficients de corrélation pour RSM et ANN	127
Tableau VI.1	Matrice d'expériences L9 (4 facteurs à 3 niveaux)	133
Tableau VI.2	Table orthogonale de Taguchi L16	134
Tableau VI.3	Table orthogonale de Taguchi L18 ($2^1 \times 3^7$)	134
Tableau VI.4	Résultats expérimentaux et S/N pour (Ra) et (MRR)	135
Tableau VI.5	Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra)	136
Tableau VI.6	Analyse de la variance (ANOVA) pour (MRR)	137
Tableau VI.7	Résultats expérimentale normalisé ($x_i(k)$)	141
Tableau VI.8	Coefficients du GR ($\eta_i(k)$)	142
Tableau VI.9	Niveau relationnel gris et son ordre (Grey relational grade (GRG))	143
Tableau VI.10	Réponses pour la catégorie relationnelle grise (Grey Grade)	144
Tableau VI.11	Conditions d'optimisation pour (Ra) et (MRR)	145
Tableau VI.12	Optimisation par RSM de (Ra) et (MRR)	146

Nomenclature

ap	Profondeur de passe (mm)
f	Avance (tr/min)
Vc	Vitesse de coupe (m/min)
Tg	Température de transition vitreuse (°C)
Fx	Effort axiale de coupe (N)
Fy	Effort radiale de coupe (N)
Fz	Effort tangentielle de coupe (N)
ANOVA	Analyse de variance
ANN	Réseaux de neurones artificiels
GRA	Analyse relationnelle grise
K_s	Effort spécifique de coupe
RSM	méthodologie de surface de réponse
Ra	Rugosité moyenne arithmétique (μm)
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité (μm)
Rt	Rugosité totale (μm)
R²	Coefficient de détermination
Cont%	Pourcentage de contribution (%)
χ_r	angle de direction principale (degré)
Pc	Puissance de coupe (W)
K_s	Effort spécifique de coupe (N/mm ²)
MRR	débit du coupeau enlevé (m ³ /min)

Table des matières

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

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1	Introduction.....	5
I.2	Généralité sur la coupe des métaux	5
I.2.1	Définition de l'usinabilité.....	6
I.2.2	Critères d'évaluation de l'usinabilité.....	7
I.3	Les paramètres de coupe	7
I.3.1	Vitesse de coupe (V_c).....	8
I.3.2	Vitesse d'avance (V_f).....	9
I.3.3	Profondeur de passe (ap).....	10
I.4	Efforts de coupe	10
I.5	Principaux critères de rugosité	11
I.6	Méthodes de modélisation et d'optimisation	12
I.6.1	Méthodologie de surface de réponse (RSM).....	13
I.6.2	Méthode de Taguchi	14
I.6.3	Algorithmes Génétiques.....	15
I.6.4	Les réseaux de neurones artificiels (ANN).....	16
I.7	Les matériaux polymères	17
I.7.1	Définition des polymères.....	17
I.7.2	Classifications des polymères.....	17
I.7.2.1	Point de vue thermomécanique	17
I.7.2.2	Point de vue de la structure physique.....	19
I.7.2.3	Point de vue de l'origine.....	20
I.7.2.4	Point de vue de l'importance économique	21
I.7.3	Comportement des polymères vis à vis de l'usinage.....	22
I.7.4	Comportement mécanique des polymères.....	23
I.8	Le Polyoxyméthylène (POMC).....	24
I.8.1	Propriétés.....	25
I.8.2	Caractéristiques.....	25
I.8.3	Comportement au contact d'agents chimiques.....	27
I.9	Travaux de recherches concernant l'usinage des polymères	27
I.10	Conclusion.....	36

Chapitre II : Procédures expérimentales

II.1	Introduction.....	38
II.2	Matériels utilisés.....	38
II.2.1	Machine-outil.....	38
II.2.2	Matériau à usiné.....	39
II.2.3	Plaquette et porte outils utilisés	40
II.2.4	Instruments de mesure utilisés.....	41
II.2.4.1	Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	41
II.2.4.2	Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	43
a.	Rugosimètre 2D.....	43

	b. Rugosimètre 3D.....	44
	II.2.4.3 Mesure de la température de coupe.....	47
	II.2.4.4 Autres équipements.....	47
II.3	Conditions de coupe.....	48
	II.3.1 Méthode uni-factorielle.....	48
	II.3.2 Méthode multifactorielle	49
II.4	Plans d'expériences adoptés	49
	II.4.1 Définition	49
	II.4.2 Terminologie.....	50
	II.4.3 Différents types de facteurs.....	50
	II.4.4 Méthodologie des plans d'expériences.....	51
	II.4.5 Démarche et plan d'expérience adopté.....	51
	II.4.5.1 Plan factoriel complet L27	52
	II.4.5.2 Plan de Taguchi L16.....	54
II.5	Conclusion.....	55

Chapitre III : Etude de l'usinabilité du Polyoxyméthylène POMC

III.1	Introduction.....	57
III.2	Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface.....	57
	a. Effet de la vitesse de coupe	57
	b. Effet de la profondeur de passe.....	57
	c. Effet de l'avance.....	58
III.3	Effet des conditions de coupe sur les efforts de coupe.....	59
	a. Effet de la vitesse de coupe	59
	b. Effet de la profondeur de passe.....	60
	c. Effet de l'avance.....	60
III.4	Effet des conditions de coupe sur l'effort spécifique de coupe (pression de coupe) (K_s).....	61
	a. Effet de la vitesse de coupe	62
	b. Effet de la profondeur de passe.....	62
	c. Effet de l'avance.....	62
III.5	Effet des conditions de coupe sur la puissance de coupe (P_c).....	63
III.6	Influence de la géométrie de l'outil.....	65
	III.6.1 Influence de l'angle de direction principale sur les efforts de coupe.....	65
	III.6.2 Influence de l'angle de direction principale sur la rugosité de surface	67
	a. Effet de la profondeur de passe.....	67
	b. Effet de l'avance.....	68
III.7	Effet de la lubrification sur l'usinabilité du Polyoxyméthylène (POMC).....	70
	III.7.1 Usinage en utilisant un outil de coupe avec $\chi_r = 45^\circ$	70
	a. Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe.....	70
	b. Effet de l'avance (f) sur la rugosité de surface.....	72
	III.7.2. Usinage en utilisant un outil de coupe avec $\chi_r = 75^\circ$	73
	a. Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe.....	73
	b. Effet de l'avance sur la rugosité de surface.....	75
III.8	Effet des conditions de coupe sur la température de coupe	77
	a. Effet de la vitesse de coupe	77
	b. Effet de la profondeur de passe.....	78
	c. Effet de l'avance.....	79

III.9 Conclusion.....	79
-----------------------	----

Chapitre IV : Modélisation et optimisation des paramètres technologiques lors de l'usinage du POMC

IV.1 Introduction.....	82
IV.2 Modélisation des différents phénomènes de processus de coupe	82
IV.2.1 Analyse de variance (ANOVA).....	82
IV.2.2 Méthodologie des surfaces de réponses.....	83
IV.3 Résultats et discussions.....	85
IV.3.1 Analyse des résultats de la rugosité de surface (Ra) en fonction de Vc, f et ap	86
IV.3.1.1 Analyse de la variance (ANOVA).....	87
IV.3.1.2 Analyse de régression de (Ra) en fonction de Vc, f et ap	90
IV.3.1.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	91
IV.4 Analyse des résultats de l'effort de coupe (Fz) en fonction de Vc, f et ap	92
IV.4.1 Analyse de la variance (ANOVA).....	92
IV.4.2 Analyse de régression de (Fz) en fonction de Vc, f et ap	94
IV.4.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	96
IV.5 Analyse des résultats de la puissance de coupe (Pc) en fonction de Vc, f et ap	96
IV.5.1 Analyse de la variance (ANOVA).....	96
IV.5.2 Analyse de régression de la puissance de coupe (Pc) en fonction de Vc, f et ap	99
IV.5.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées.....	100
IV.6 Analyse des résultats du débit du copeau enlevé (MRR) en fonction de Vc, f et ap	100
IV.6.1 Analyse de la variance (ANOVA).....	100
IV.6.2 Analyse de régression de MRR en fonction de Vc, f et ap	102
IV.7 Confirmation des essais.....	103
IV.8 Optimisation des conditions de coupe.....	104
IV.8.1 Optimisation pour un objectif de la qualité.....	106
IV.8.2 Optimisation pour un objectif de la productivité.....	107
IV.8.3 Optimisation combinée.....	108
IV.9 Conclusion.....	112

Chapitre V : Application des (ANN) pour modéliser (Ra) et (Fz) lors de l'usinage du POMC

V.1 Introduction.....	114
V.2 Les réseaux de Neurone Artificiel.....	114
V.2.1 Définition.....	114
V.2.2 Composantes d'un réseau de neurones artificiel.....	115
V.2.2.1 Neurone formel.....	115
V.2.2.2 Comportement (fonctions de transfert).....	116
V.2.2.3 Perceptron.....	117
V.2.2.4 Apprentissage des Réseaux de Neurones	119
V.2.2.5 Algorithme de Retro propagation.....	120
V.2.2.6 Taux d'apprentissage.....	121
V.3 Modélisation des paramètres de performance par réseaux de neurones artificiels.....	121

V.3.1	Modélisation de la rugosité de surface (Ra) par un réseau de neurones artificiel..	123
V.3.2	Modélisation de l'effort tangentiel de coupe (F_z) par (ANN).....	125
V.4	Comparaison des résultats obtenus par les ANN et la méthodologie de surface des réponses RSM.....	127
V.5	Conclusion.....	129

Chapitre VI : Optimisation des conditions de coupe selon : Taguchi, GRA et DF

VI.1	Introduction.....	131
VI.2	Optimisation mono-objectif.....	131
VI.2.1	Méthode de Taguchi.....	131
VI.2.1.1	La démarche de la méthode de Taguchi.....	131
VI.2.1.2	Apport de la méthode Taguchi.....	132
VI.2.1.3	Les matrices d'expériences fractionnaires Taguchi.....	133
VI.2.1.4	Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé.....	135
a.	Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra).....	136
b.	Analyse de la variance (ANOVA) pour (MRR).....	136
c.	Analyse de régression : (Ra) et (MRR) en fonction de V_c , f et ap	137
d.	Analyse des traces d'interactions (3D).....	138
e.	Optimisation mono-objectif par la méthode de Taguchi.....	139
VI.3	Optimisation multi-objectif avec la méthode d'Analyse Relationnelle Grise (GRA).....	140
VI.3.1	La normalisation.....	141
VI.3.2	Calcul des coefficients du Relationnel Gris.....	142
VI.3.3	Calcul du GRG (Grey relational grade).....	143
VI.4	Optimisation par la fonction de désirabilité (DF).....	145
VI.4.1	Introduction.....	145
VI.4.2	Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité de surface (Ra).....	145
VI.5	Conclusion.....	147
	Conclusion générale et perspectives	148
	Références bibliographiques.....	153

Introduction générale

Aujourd'hui, les matières plastiques sont présentes dans presque tous les secteurs de l'activité humaine. Ils sont devenus, ces dernières années indispensables dans de nombreux domaines de haute technologie.

Les très nombreuses techniques de transformation des matières plastiques brutes permettent d'obtenir toute une gamme de produits finis adaptés à l'usage. On apprécie leur maniabilité, leur esthétique, leur façonnage aisé pour le design, leurs qualités, qui ont font souvent des concurrents de l'acier et des autres métaux notamment grâce à leur légèreté à l'absence de corrosion et à la tenue dans le temps.

Dans le domaine de l'usinage des matériaux métalliques et des alliages, la littérature est largement disponible mais moins de travaux de recherche sont effectués à propos de l'usinage des polymères, notamment l'usinage du Polyoxyméthylène (POM C) qui est presque introuvable. C'est pour cela nous avons choisi de travailler sur le *Polyoxyméthylène* appelé aussi (*Polyacétal*) (POM C). L'avantage particulier du *Polyoxyméthylène* est la combinaison idéale de la résistance mécanique, la rigidité et la ténacité, qui est à attribuer à la structure du produit. Le POM C est plus rigide et plus solide que les autres thermoplastiques, surtout dans le domaine de températures de 50 à 120 °C. Le POM C se distingue par sa grande rigidité, sa grande dureté, une excellente résistance aux chocs également à des températures très basses. Il a une très bonne résistance à la déformation sous la chaleur, une grande résistance à la fatigue, une faible absorption d'humidité, une bonne résistance chimique (exemples : solvants, carburants, etc...), une grande stabilité dimensionnelle, un bon comportement au glissement et un bon ressort élastique.

L'optimisation des conditions d'usinage fait partie des stratégies efficaces pour réduire les coûts de fabrication et la rugosité de surface du produit fini. Pour cela il est nécessaire d'utiliser les plans d'expériences pour étudier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage afin de développer des modèles de prédictions et d'optimiser les processus de coupe. Il est noté que les tâches d'optimisation comportent beaucoup de processus complexes, une petite variation d'un paramètre cause des changements notables des autres.

L'étude réalisée dans le cadre de cette thèse permet d'atteindre les objectifs suivants :

- L'étude de l'influence des paramètres de coupe, soit, la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, l'angle de direction principale des outils de coupe et la lubrification sur les paramètres de performances de l'usinage (la rugosité de surface, les efforts de coupe, la puissance de coupe, l'effort spécifique de coupe, et la température de coupe) lors du tournage du *Polyoxyméthylène (POM C)*, avec une plaquette en carbure métallique.
- La modélisation et l'optimisation des conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe) en utilisant la méthodologie des plans d'expériences et les méthodes d'optimisation.

La présente thèse est structurée en six chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique portée au premier lieu sur la coupe des métaux tels que la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité et les paramètres de coupe. Cette partie est suivie par une étude sur les polymères en générale (définition, classification, etc....) et une attention particulière a été réservée à l'étude du *Polyoxyméthylène (POM C)*.

Une autre partie très importante est réalisée dans ce chapitre, ayant pour but de présenter des travaux de recherche relatifs au tournage des différents types des polymères, l'utilisation des plans d'expérience et les méthodes de modélisation et d'optimisation utilisées.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les équipements nécessaires à la réalisation des essais et la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe. Les dispositifs de mesure et le couple outil-matière sont aussi présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques et statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

Le troisième chapitre est réservé à l'exposition des résultats de l'usinabilité du POMC. Pour atteindre cet objectif, nous avons analysé les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface, les efforts de coupe, l'effort spécifique et la puissance de coupe. L'usinage est réalisé à sec et avec lubrifiant par deux types d'outils de coupe avec deux différents angles de direction (45° et 75°). Les résultats obtenus permettent de définir les performances des matériaux de coupe utilisés et les conditions de coupe adéquates pour optimiser le processus de coupe relatif à ce polymère.

Le quatrième chapitre est dédié à la détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés, en utilisant la méthodologie de surface de réponse RSM. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe telle que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe (V_c , f et ap) et les paramètres technologiques d'usinage étudiés (effort tangentiel de coupe (F_z) et la rugosité de surface arithmétique(R_a)). L'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse ont été réalisés par l'utilisation du logiciel de statistique «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 pour chaque phénomène étudié.

Le cinquième chapitre expose les étapes suivies dans la modélisation de la rugosité de surface arithmétique et de l'effort tangentiel de coupe en utilisant la méthode des réseaux de neurones artificiels (ANN). Les modèles trouvés par cette technique sont comparés par les modèles issus de la méthode RSM.

Dans *le sixième chapitre* considéré comme le dernier chapitre, nous avons exposé les résultats d'une étude d'optimisation afin de déterminer le régime optimal, l'étude est réalisée suivant deux types d'optimisation :

- l'optimisation mono-objective, en utilisant la méthode de Taguchi et l'analyse signal/bruit.
- l'optimisation multi-objective, en utilisant l'analyse relationnelle grise (Grey method) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) en utilisant l'approche de la fonction désirabilité (DF) pour optimiser la productivité et la qualité de surface simultanément.

A la fin de ce chapitre une analyse des deux méthodes d'optimisation est réalisée.

En dernier lieu, nous avons terminé notre thèse par une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques et les perspectives ouvertes par cette étude.

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1. Introduction

Les matériaux plastiques sont de plus en plus employés dans l'industrie en raison de plusieurs avantages tels que le fonctionnement silencieux, le poids léger, la résistance à la corrosion, la facilité de production en série, le faible coefficient de frottement, et la capacité de fonctionner sans lubrification externe [1]. Parmi ces matériaux, les matériaux thermoplastiques qui sont largement utilisés dans la production des engrenages. Leurs applications vont des matériels de bureautique, de l'agroalimentaire, l'automobile, les machines de textiles et autres [2].

Les opérations de tournage des matériaux thermoplastiques techniques ne présentent pas de difficulté particulière. Comme pour toutes les autres opérations d'usinage, il est important de respecter le bon affûtage des outils, vitesses de coupe et d'avance. Dans la majorité des cas avec les thermoplastiques, les copeaux sont longs et doivent être rapidement dégagés pour éviter qu'ils s'enroulent sur les pièces. Avec les thermodurcissables, la matière s'usine plutôt avec des copeaux courts et des poussières, dans ce cas, des installations d'aspiration sont conseillées [3].

Dans ce chapitre nous présentons une synthèse des travaux relatifs à la coupe des métaux. Dans un premier temps nous exposons les notions de base sur la coupe des métaux et des paramètres liés à notre travail. Les travaux de recherche sur l'usinage des polymères et les méthodes d'optimisation dans le processus de coupe sont aussi exposés.

I.2. Généralité sur la coupe des métaux

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

Il est important de délimiter clairement le domaine de la coupe des métaux et celui très voisin de l'étude de l'usinabilité. La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, arrosage, etc...) sur le comportement d'un matériau en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) et de géométries différentes.

Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage.

I.2.1. Définition de l'usinabilité

L'usinabilité est la capacité d'un matériau $M1$ à être usiné par un matériau usinant $M2$. Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif de l'usineur.

La notion d'usinabilité dépend donc d'un critère choisi par l'usineur mais reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût et/ou à la meilleure qualité de la pièce [4]. Selon les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux, l'usinabilité est définie aussi sous différentes formes :

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

L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème, qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre, d'autre part l'aspect mécanique du problème, comprenant les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée.

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

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût.

Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont :

- ✓ La durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps.
- ✓ Les conditions de coupe.
- ✓ Les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe.
- ✓ Le fractionnement du copeau.
- ✓ L'état de surface obtenu de la pièce, dont la rugosité.
- ✓ La productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités facteurs influençant l'usinabilité [6,3].

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

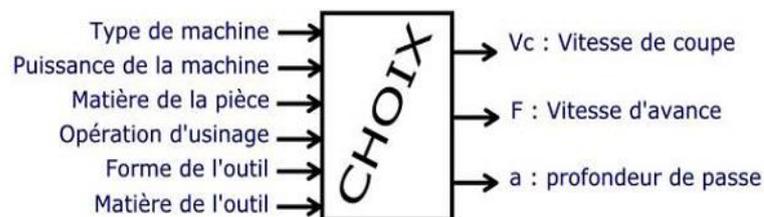


Figure I.1. Choix des paramètres de coupe [7].

I.3. Les paramètres de coupe

Les paramètres de coupe (*figure I.2*) sont, d'une part, des grandeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques) [8, 9,10].

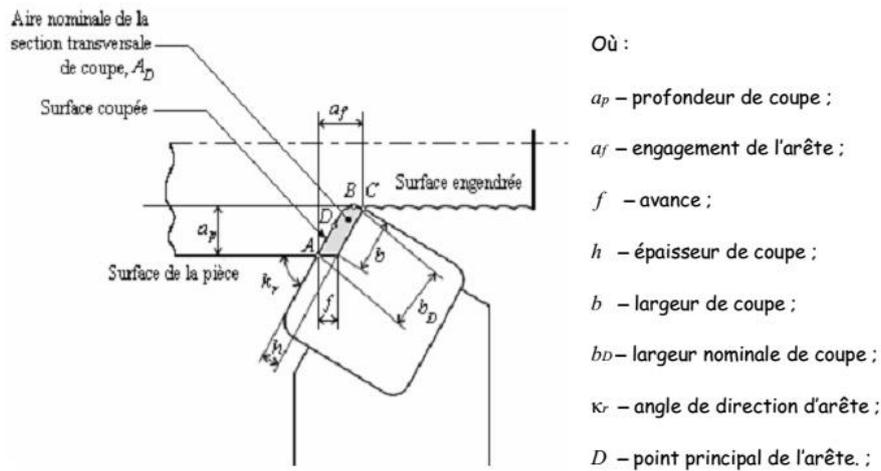


Figure I.2. Dimensions de coupe dans le cas de tournage [9].

La détermination des paramètres de coupe à une grande importance dans la production industrielle, car à titre d'exemple des régimes réduits augmentent considérablement le temps d'exécution de la pièce à usiner, et élèvent le prix de revient, aussi bien des régimes élevés ne sont pas avantageux non plus, parce que l'outil s'use rapidement, ce qui nous oblige à le changer très souvent, donc on aura toujours le même résultat que précédemment (augmentation du prix de revient de la pièce). Pour cela, les paramètres adoptés doivent être optimums pour assurer un prix de revient minimum de la pièce avec une plus grande productivité [9].

I.3.1. Vitesse de coupe (V_c)

La vitesse de coupe est la distance parcourue par une dent en une minute. Elle est exprimée en mètres par minute (m/min), ou en pieds par minute (pi/min). Elle dépend de la matière usinée, du type d'opération, de l'outil de coupe, de l'état de surface souhaitée, etc. En longueur de circonférence de la pièce parcourue. En désignant par :

D : le diamètre du cercle décrit en millimètres (mm) ; N : la vitesse de rotation en tour par minutes (tr/min) et V_c : la vitesse linéaire en mètre par minute (m/min) (**figure I.3**), on aura :

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

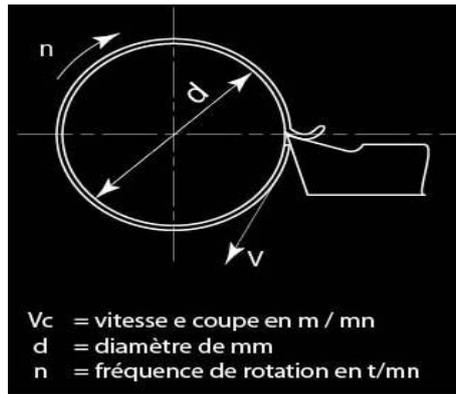


Figure I.3. Vitesse de coupe (V_c) [11].

I.3.2. Vitesse d'avance (f)

La vitesse d'avance (V_f) est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce (**figure I.4**). Elle est exprimée soit en (mm/mn) soit en (mm/tour).

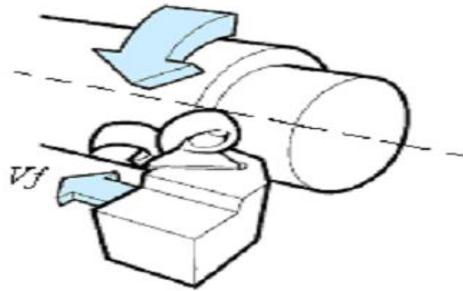


Figure I.4. Vitesse d'avance (V_f) [9].

L'avance notée (f) (**figure I.5**), correspond à la différence du déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage).

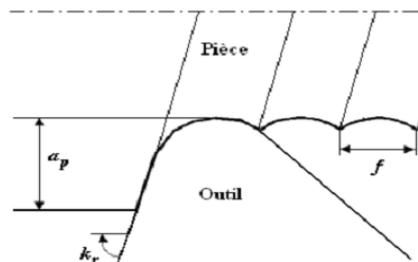


Figure I.5. L'avance (f) dans le cas de tournage [12].

I.3.3. Profondeur de passe (a_p)

La profondeur de passe est la quantité de la matière que va prendre l'outil de coupe lors d'un usinage sur un tour ou bien sur un centre d'usinage. Celle-ci varie selon la vitesse de coupe ainsi que la vitesse d'avance de l'outil. Les différents types de profondeurs sont présentés dans la *figure I.6*.

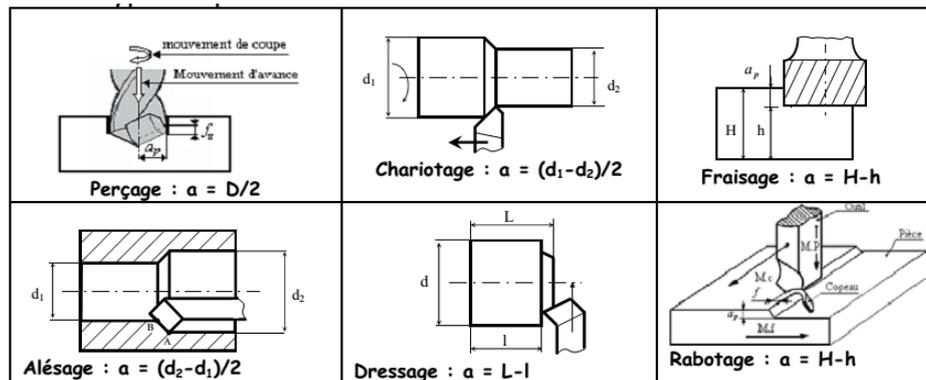


Figure I.6. Profondeur de passe.

I.4. Efforts de coupe

De tous les procédés d'usinage, la coupe est la méthode la plus fréquemment utilisée pour le façonnage des matériaux. C'est là une raison suffisante d'étudier et d'optimiser en permanence ce processus. Les économies même les plus réduites, réalisées par exemple en termes de durée d'usinage, sont d'une importance essentielle dans l'optique de la rentabilité de la production en série. Les mesures de l'effort de coupe contribuent de manière décisive à l'étude de ces processus et à leur évaluation [13].

L'évaluation des efforts de coupe permet de :

- dimensionner les outils et les porte-pièces
- déterminer les appuis du montage, en opposition à ces efforts,
- évaluer la puissance de coupe afin de choisir la machine-outil.

Grâce à la platine Kistler, on peut obtenir les différentes composantes (F_a , F_r et F_z) de l'effort global de coupe (F) (*figure I.7*) :

- **Effort tangentiel de coupe (F_z)** qui est tangent à la pièce usinée et dirigé dans le sens contraire au mouvement de coupe, il reflète une partie majeure de la puissance consommée ;
- **Effort axial (F_a)** qui est tangent à la pièce usinée et dirigé dans le sens contraire à l'avancement de l'outil, il ne constitue qu'une partie de la puissance consommée parce que le déplacement dans le sens d'avance est relativement faible ;
- **Effort de radial (F_r)** qui est perpendiculaire sur le plan de deux autres efforts orientés dans la direction de l'axe de l'outil, il ne participe à aucun déplacement donc il ne consomme aucune puissance.

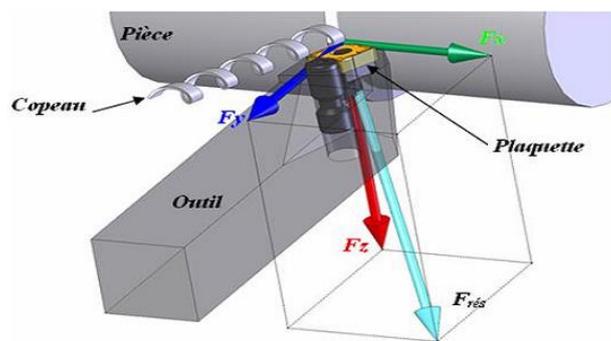


Figure I.7. Composantes de l'effort de coupe [14].

I.5. Principaux critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (figure I.8), soit (OX) la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^l y dx = 0 \quad (I.2)$$

Les principaux critères de la rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne [11].

- Rugosité totale (R_t)** : Profondeur maximale de rugosité, c'est la distance entre les points les plus élevés et les plus bas du diagramme de rugosité en fonction de la longueur totale mesurée.
- Rugosité (R_z)** : Profondeur moyenne de rugosité. C'est la valeur moyenne de rugosité sur cinq longueurs mesurées à la suite.
- Rugosité moyenne arithmétique (R_a)** : Valeur moyenne de rugosité identifie la valeur moyenne arithmétique de toutes les distances des points du diagramme de rugosité, en fonction de la ligne moyenne et d'un intervalle de longueur.

R_a : est calculée sur une longueur d'évaluation

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (\text{I.3})$$

d) **Rugosité maximum (R_{max})** : C'est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité (R_{max}) étant prise sur une saillie et un creux consécutif.

e) **Rugosité (R_p)** : C'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 (L).

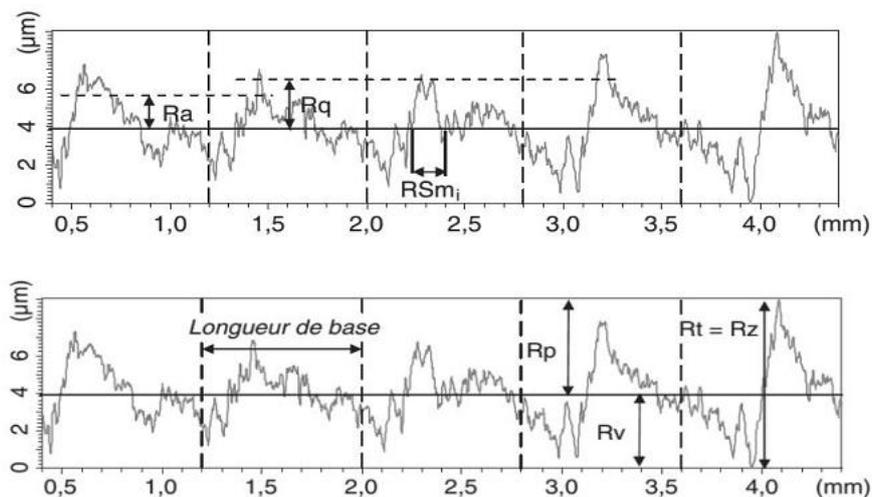


Figure I.8. Principaux critères de rugosité [11].

I.6. Méthodes de modélisation et d'optimisation

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant le choix des conditions de coupe les plus commodes 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.

L'optimisation de processus d'usinage est habituellement difficile, où les aspects suivants sont exigés :

- La connaissance du processus de coupe ;
- Les équations empiriques reliant la vie d'outil, les forces, la puissance, etc., pour développer des contraintes réalistes ;
- Spécifications des possibilités d'usinage ;
- Développement d'un critère efficace d'optimisation ;
- La connaissance des techniques mathématiques et numériques d'optimisation.

En usinage, les tâches d'optimisation sont critiques, parce qu'il comporte beaucoup de processus complexes. Habituellement, la petite variation d'un paramètre cause les changements notables des autres. D'ailleurs, quelques variables, telles que l'effort de coupe ou l'usure d'outil, dépendent fortement des conditions de coupe [15].

I.6.1. Méthodologie de surface de réponse (RSM)

La méthodologie des surfaces de réponses (RSM) est une technique visant à déterminer les variations de la réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative. Cette méthode permet de déterminer une relation d'approximation entre les variables d'entrée et les variables de sortie. En effet, la réponse de sortie dépend de la variation des paramètres d'entrée. Ces derniers peuvent être représentés par des variables aléatoires qu'on note X_i avec $i = 1, \dots, n$. Ces variables aléatoires permettent de représenter les variations spatio-temporelles des paramètres d'entrée par des modèles mathématiques. Ces derniers résument la relation d'approximation entre la réponse de sortie et la variable d'entrée. La représentation géométrique de cette relation d'approximation est appelée surface de réponse [16].

La construction des surfaces de réponses s'effectue suite à l'ajustement du modèle en utilisant des fonctions mathématiques telles les polynômes. La méthode des surfaces de réponses passe par trois étapes : la construction du plan expérimental, la modélisation de la réponse et les représentations graphiques. La modélisation de la réponse est réalisée à l'aide de techniques de régression qui permettent de relier une réponse « y » à un ensemble de facteurs « X_i » selon la relation suivante :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \quad (\text{I.4})$$

On peut avoir une bonne approximation de cette relation par un polynôme de second degré qui permet de décrire les phénomènes étudiés. Ce modèle inclut les effets linéaires, les effets d'interaction et les effets quadratiques des facteurs. Le modèle de surface des réponses du second degré peut s'écrire de la manière suivante :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n (\beta_i X_i) + \sum_{i=1}^n (\beta_{ii} X_i^2) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\beta_{ij} X_i X_j) + \dots \quad (\text{I.5})$$

Où : X_i : variable de prédiction codées appelées facteurs ; β : coefficient de régression.

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des analyses statistiques sont à considérer : le coefficient de détermination (R^2) et le coefficient de détermination ajustée (R^2 adj). Après l'étape de la modélisation, nous représentons les modèles

graphiquement à l'aide des courbes des surfaces de réponse qui permettent d'observer le comportement des réponses en fonction des paramètres afin d'optimiser le système expérimental (paramètres de la réaction).

L'approche de la fonction désirabilité est largement utilisée par les chercheurs pour l'optimisation multi-objective des réponses. L'utilisation considérable de cette approche est due en fait à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques [17].

La désirabilité permet d'évaluer l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés en fonction des réponses calculées par le modèle statistique.

Les significations des paramètres de but sont [18] :

- Dans le cas de la recherche d'un **maximum**, la désirabilité est réécrite comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = 0 \text{ si la réponse} < \text{la valeur basse} \\ 0 \leq d_i \leq 1 \text{ si la réponse varie entre la valeur basse et la valeur haute} \\ d_i = 1 \text{ si la réponse} > \text{la valeur élevée} \end{array} \right. \quad (\text{I.6})$$

- Dans le cas de la recherche d'un **minimum**, la désirabilité est réécrite comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = 1 \text{ si la réponse} < \text{la valeur basse} \\ 1 \geq d_i \geq 0 \text{ si la réponse varie entre la valeur basse et la valeur haute} \\ d_i = 0 \text{ si la réponse} > \text{la valeur élevée} \end{array} \right. \quad (\text{I.7})$$

La fonction objective simultanée est une moyenne géométrique de toutes les réponses transformées :

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/n} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{I.8})$$

I.6.2. Méthode de Taguchi

La méthodologie de Taguchi constitue une véritable révolution dans le développement de la méthode des plans d'expériences. Son application dans plusieurs domaines d'ingénierie en est une illustration [19,20 et 21]. Le système intégré de l'ingénierie de la qualité de Taguchi repose sur l'idée de robustesse comme moyen de neutraliser les effets des facteurs incontrôlables, appelés facteurs de bruit [22].

Dans son approche, Taguchi a introduit deux outils majeurs du plan robuste à savoir la métrique fonctionnelle Signal-Bruit(S/B ou S/N ; Signal/Noise, en anglais) et la propriété d'orthogonalité d'une matrice afin d'optimiser conjointement le résultat moyen et la dispersion du résultat autour de la moyenne [23, 24].

On cherche donc dans la méthode de Taguchi à minimiser l'influence des facteurs de bruit. *La figure I.9* montre les étapes d'optimisation par la méthode de Taguchi.

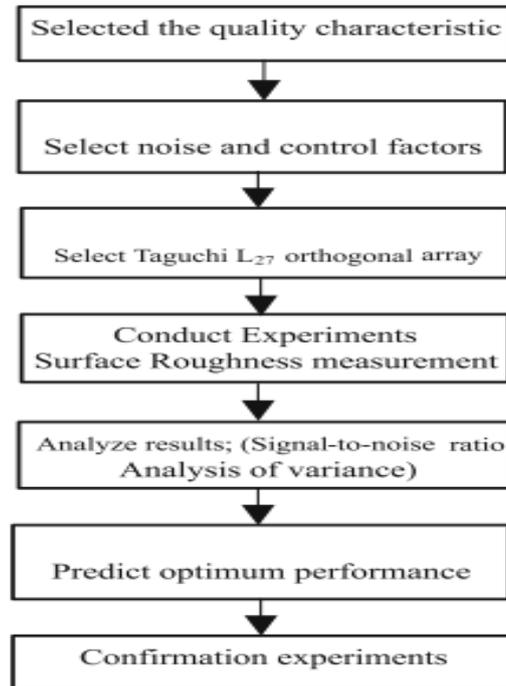


Figure I.9. Etapes d'optimisation par la méthode de Taguchi [25].

I.6.3. Algorithmes Génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils ont été initialement développés par John Holland (1975).

Les algorithmes génétiques ont été trouvés très puissants en découvrant le minimum global (*figure.I.10*) [26].

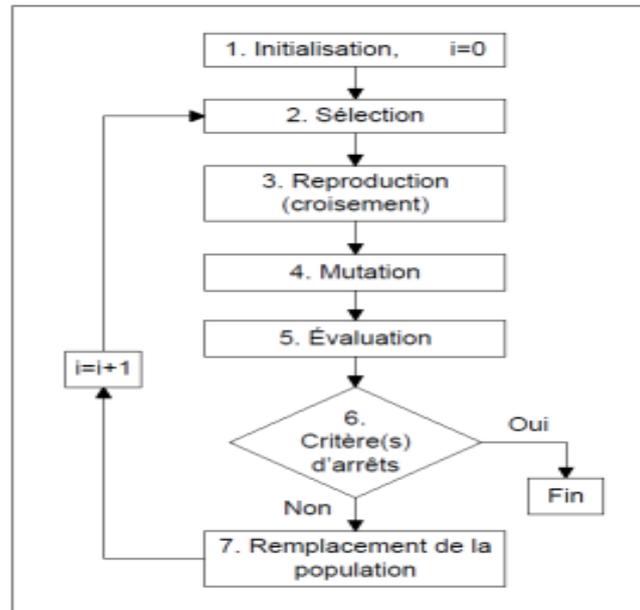


Figure I.10. Schéma algorithmique : Schématisation globale d'un A.G [26].

I.6.4. Les réseaux de neurones artificiels (ANN)

Les modèles de réseaux de neurones font l'objet de travaux récents en raison de leur capacité à modéliser les processus hautement non linéaires.

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est un réseau.

La figure.I.11 représente un neurone simple avec le vecteur des entrées \mathbf{p} , le vecteur des poids \mathbf{W} , le biais associé au neurone \mathbf{b} , la fonction de transfert f et enfin la sortie \mathbf{a} .

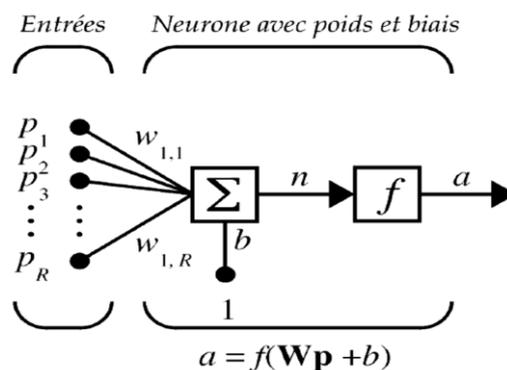


Figure I.11. Schéma d'un neurone unique [27].

I.7. Les matériaux polymères

1.7.1 Définition des polymères

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

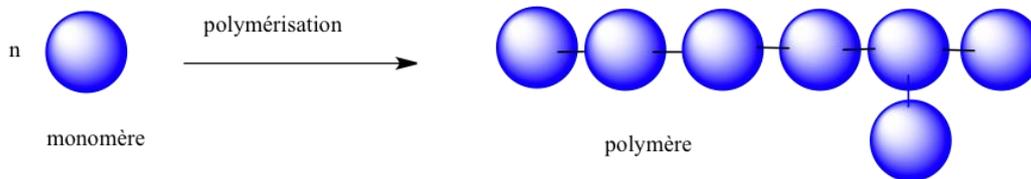


Figure I.12. Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.

1.7.2. Classifications des polymères

Les polymères peuvent être classés selon divers critères, qui ne s'excluent pas les uns les autres (*figure I.13*).

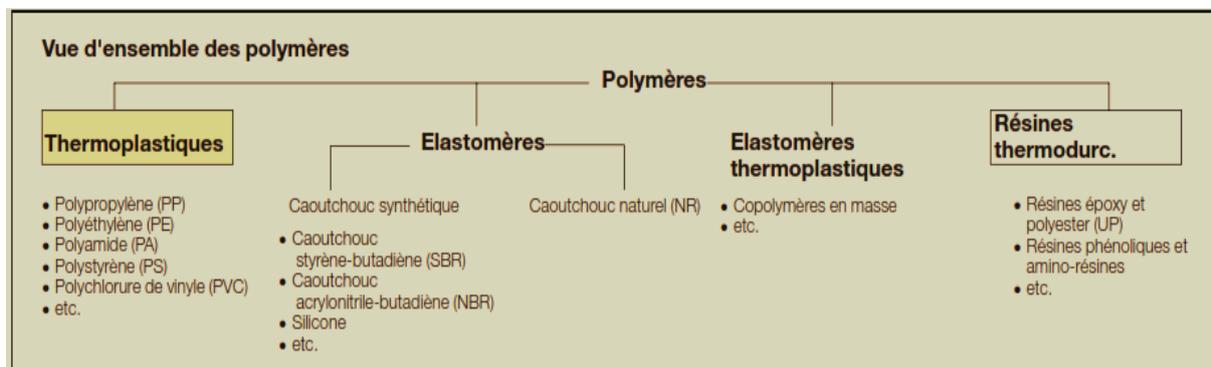


Figure I.13. Classification des plastiques [28].

1.7.2.1. Point de vue thermomécanique

a) Polymères thermoplastiques

Les thermoplastiques fondent lorsqu'on les chauffe, tout comme la glace ou le beurre. C'est le cas du polyéthylène, du polypropylène, des polyamides, de certains polyesters. En revanche, l'avantage est que dans l'état fondu, on peut les mouler dans la forme que l'on veut. C'est un procédé industriel employé pour fabriquer des objets à la pièce, en discontinu. Ce procédé est bien connu également pour les métaux, mais les températures de fusion des polymères sont bien plus basses, de l'ordre de 80°C à 300°C [1].

Le comportement global du matériau dépend alors de la mobilité des chaînes les unes par rapport aux autres et de la rotation autour des liaisons (C – C). L'élévation de la température facilite le déplacement des chaînes les unes par rapport aux autres, le comportement d'abord vitreux, devient caoutchoutique entre la température de transition vitreuse (T_g) et la température de fusion (T_f). La réversibilité de comportement permet la mise en forme de ces matières à l'état fondu ou caoutchoutique [29].

Ils représentent 80% des matières plastiques consommées en Europe en 2000 soient plus de 35 millions de tonnes ! Avant transformation, ils sont sous forme des granulés ou de poudres dans un état chimique stable et définitif car il n'y a pas de modification chimique lors de la mise en forme. Les granulés sont chauffés puis moulés par injection et le matériau broyé est réutilisable [2].

Parmi les principaux thermoplastiques, on peut citer le PE, le PP, le PS, le PVC, les polyamides, le PET [30]. *La figure I.14* présente les principales familles des thermoplastiques :

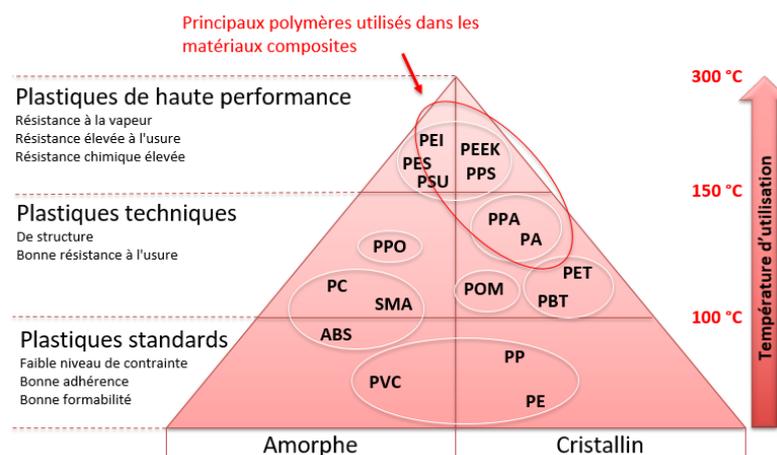


Figure I.14. Principales familles de thermoplastiques [31].

b) Polymères thermodurcissables

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

Les thermodurcissables ne sont pas recyclables et leur mise en forme est plus complexe. Par contre ils peuvent servir de matériaux structuraux. Ils sont issus de monomères ayant une fonctionnalité moyenne supérieure à 2. La fonctionnalité d'un monomère est son nombre de sites réactifs au cours d'une réaction de polymérisation [32].

c) Élastomères

Les élastomères sont des composés macromoléculaires dont les propriétés sont étroitement liées à leur nature chimique et au caractère aléatoire de la distribution des chaînes moléculaires. Ils se distinguent par les faibles valeurs des forces d'attraction entre les chaînes et des modules d'élasticité à température ambiante et surtout par leur capacité élevée de déformation. Le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques appartiennent à cette famille qui constitue apparemment une classe distincte [33, 34 et 35].

Parmi les avantages des élastomères, il faut signaler une excellente mise en œuvre, de bonnes propriétés mécaniques, un très faible échauffement interne une très bonne tenue au froid. Mais pour autant, pour avoir un élastomère vraiment élastique, c'est-à-dire qui retrouve intégralement sa forme originale après déformation, il faut empêcher les chaînes de glisser les unes par rapport aux autres. Cette opération appelée réticulation consiste à créer des liaisons chimiques entre chaînes de sorte que l'enchevêtrement de chaînes séparées devienne un réseau tridimensionnel [36].

1.7.2.2. Point de vue de la structure physique

a) Polymère amorphe

Les zones dites amorphes correspondent à une structure comparable à celle des liquides caractérisée par l'absence d'ordre à grande distance. Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation, et ceci en raison de la structure et de la disposition aléatoire des chaînes individuelles (*Figure I.15*) [37].

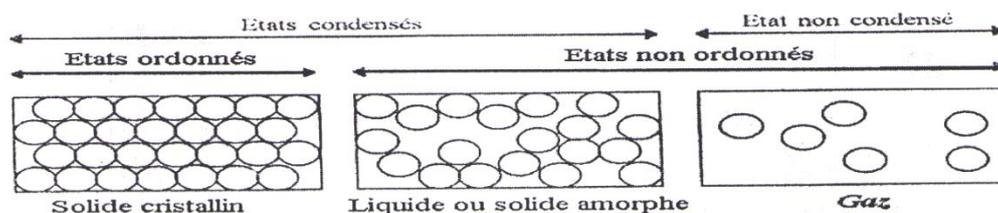


Figure I.15. Illustration des différents états de la matière [37].

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

b) Polymères Semi –Cristallins

Les polymères semi-cristallins sont utilisés à une température qui se situe entre la température de transition vitreuse de leur phase amorphe et la température de fusion de leur phase cristalline. Ceci permet de profiter de la souplesse de la phase amorphe et de la rigidité de la phase cristalline. Leur microstructure est souvent complexe et, en conséquence, la description de leurs propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement bonnes. La structure d'un polymère semi-cristallin est présentée dans *la figure I.16*.

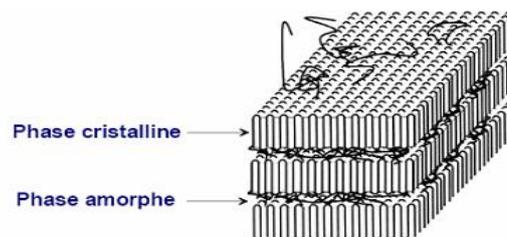


Figure I.16. Structure d'un polymère semi-cristallin [38].

1.7.2.3. Point de vue de l'origine

On peut classer les polymères en trois groupes :

- a) **Les polymères naturels** : A côté des polymères synthétiques, la nature offre une vaste gamme de polymères aussi bien dans le règne animal que végétal. Outre le caoutchouc naturel, nous avons les polysaccharides qui sont des composés de la classe des holosides et qu'on retrouve chez tous les êtres vivants. Ils peuvent être linéaires (cellulose) ou ramifiés (gomme arabique). De par leur structure macromoléculaire, nous classons aussi comme polymères naturels, les protéines fibreuses de la soie, l'insuline, l'hémoglobine, les kératines (cheveux, poils), la laine. Certains de ces polymères comme l'insuline sont déjà obtenus par synthèse.
- b) **Les polymères artificiels** : sont obtenus par modification chimique des polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés : les asters celluloseux

(nitrocellulose, acétate de cellulose, etc ...) ont toujours connu une certaine importance économique.

- c) **Les polymères synthétiques** : produits dans des réactions de polymérisation en chaîne ou de polycondensation.

1.7.2.4. Point de vue de l'importance économique

Pour les polymères comme pour tout produit industriel, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix. Ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux :

- a) **Les polymères de grande diffusion** : dont la production annuelle s'évalue en millions de tonnes ; sont devenus d'un emploi quotidien. Le polyéthylène, le poly (chlorure de vinyle) et quelques autres sont à classes dans cette catégorie, ils présentent une importance économique considérable.
- b) **Les polymères à hautes performances** : dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés.
- c) **Les polymères techniques** : ils sont destinés à la haute technologie. En pratique, il n'existe pas de frontière précise entre plastiques de grande diffusion et plastiques techniques : certains copolymères d'éthylène et de propylène sont à classer dans la seconde catégorie ; les ABS courants sont classés dans la première, bien que leurs applications techniques soient nombreuses. Le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes, exemples : polyamides, PET.

L'usinage des matériaux polymères est devenu de plus en plus important dans le domaine de la mécanique de précision. Les pièces en matière plastique n'ont pas de l'exactitude ou la précision requise pour les applications de l'optique et de l'électronique [39]. Les polymères se mettent en œuvre le plus souvent par moulage ; cependant, des usinages sont assez souvent pratiqués pour différentes raisons comme :

- le perçage pour assemblage ultérieur par boulonnage ou rivetage.
- le détournage de pièces moulées.
- la fabrication de petites séries.
- l'obtention de cotes extrêmement précises [40].

I. 7.3. Comportement des polymères vis à vis de l'usinage

Selon AGORA [41], la qualité du tranchant et le bon dégagement du copeau sont plus importants que la nature du matériau de l'outil. Le meilleur fini de surface est obtenu avec une pointe d'outil arrondie.

Lors du tournage de pièces de précision, il faut éviter soigneusement toute surchauffe de la pièce tournée, faute de quoi on s'expose à réaliser une passe excessive due à la dilatation thermique de l'ébauche. Les mesures des pièces doivent toujours être effectuées à température ambiante, car le coefficient de dilatation dans le cas des plastiques est parfois jusqu'à 10 fois supérieur à celui de l'acier. Dans ces cas, on peut également travailler avec refroidissement par fluide, quoique, par ailleurs certains plastiques se travaillent aussi bien sans refroidissement [42]. La *figure I.17* définit les différents angles d'un outil de tour.

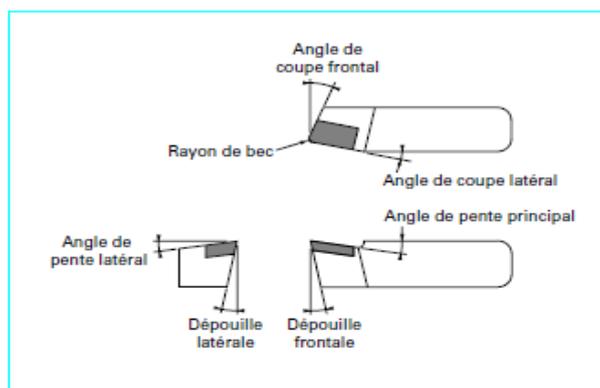


Figure I.17. Géométrie type d'un outil de tournage [42].

Le *tableau I. 1* indique les différents paramètres de tournage de quelques types des plastiques :

Tableau I.1. Paramètres pour le tournage de plastiques

Nature du polymère	Dépouille (degré)	Pente d'affûtage (degré)	Avance (mm)	Vitesse de coupe (m/min)
Polystyrène et dérivés	5 à 10	5 à 20	0,1 à 1,5	150 à 500
Polyéthylène, polypropylène	5 à 15	0 à 15	0,05 à 0,5	200 à 500
PVC	10 à 15	10	0,2 à 0,5	200 à 500
Polycarbonates	0 à 15	0 à 25	0,05 à 0,5	100 à 500
Polyoxyméthylène (acétal)	5 à 20	0 à 15	0,05 à 0,5	200 à 1 000
PET – PBT	0 à 15	0 à 15	0,05 à 0,4	90 à 500
Polyamides	0 à 15	0 à 50	0,05 à 0,5	50 à 1 000
PTFE	5 à 15	5 à 20	0,05 à 0,3	100 à 1 000

Les lubrifiants ne sont normalement pas nécessaires, mais ils peuvent être utilisés en cas de fort dégagement de chaleur et pour l'évacuation des copeaux (par exemple : lors du perçage et du taraudage). Les lubrifiants courants ou des émulsions de perçage peuvent être utilisés. Pour les plastiques tendant à la formation de fissures de contrainte, par exemple le PC, il convient plutôt d'utiliser de l'eau ou de l'air comprimé pour le refroidissement [42]. Le refroidissement est souvent inutile. Il suffit, le cas échéant, de souffler de l'air comprimé sur le point de coupe. Les aciers rapides usuels satisfont à la plupart des exigences. L'emploi de plaquettes rapportées en métal dur fritté n'offre des avantages que dans des cas particuliers, notamment pour des quantités importantes, des tolérances serrées, ou des plastiques contenant des charges minérales ou des fibres de verre.

I.7.4. Comportement mécanique des polymères

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures, telles que la température, la durée, l'intensité et le type de chargement, les radiations UV et les agents chimiques. Leur module d'élasticité est en général inférieur de deux ordres de grandeur environ à celui des métaux. Les caractéristiques de résistance peuvent différer d'un ordre de grandeur seulement. Le concepteur de pièces en matière plastique est donc souvent obligé de prendre également en compte les problèmes de déformation dans le calcul de leur résistance [38].

- **La cristallinité (ou taux de cristallinité)** correspond au pourcentage en poids de phase cristalline dans le matériau. Les cristaux ont une résistance chimique beaucoup plus élevée que la phase amorphe du même matériau. Les matériaux semi cristallins sont ainsi généralement beaucoup plus résistants aux solvants organiques que les matériaux amorphes. Cela provient des interactions fortes entre les molécules dans les cristallites, que les solvants ne peuvent dissoudre [35].
- **La température de fusion d'un polymère (T_f)** est la température à laquelle a lieu son passage de l'état caoutchouteux à l'état liquide, visqueux en pratique. Il n'y a fusion que pour les polymères semi-cristallins, seule la partie cristalline est concernée.
- **La température de transition vitreuse (T_g)** correspond à la température à laquelle le polymère passe de l'état vitreux à l'état caoutchoutique.
- **Le taux de réticulation** correspond à la densité de liaisons pontales entre les chaînes. Il est évident que la présence des liaisons covalentes entre les chaînes (polymères

thermodurcissables) donne lieu à des propriétés différentes de celles des polymères purement linéaires (matériaux thermoplastiques) dont les seules liaisons intermoléculaires sont des liaisons faibles (Van der Waals, ponts hydrogène etc.). Par exemple, les thermoplastiques peuvent être fondus puis re-solidifiés alors que les thermodurcissables se décomposent à haute température mais ne fondent pas [43].

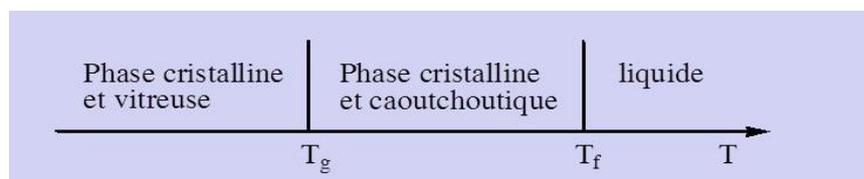


Figure I.18. Températures T_g et T_f [44].

I.8. Le Polyoxyméthylène (POMC)

Le Polyoxyméthylène, POM ou Polyacétal est un polymère industriel bien connu depuis une cinquantaine d'années. Il est obtenu à partir du formaldéhyde, se présente sous deux formes : homopolymère et copolymères [45].

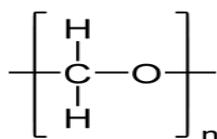


Figure I.19. Formule chimique du Polyoxyméthylène (POM) [46].

Le Polyoxyméthylène de sigle POM selon la norme ISO 1043, est un polymère de la famille des polyacétals. Il existe soit sous forme homopolymère (POM H), soit sous forme copolymère (POMC). Les deux formes diffèrent peu. Le POM est un matériau semi-cristallin, et sa couleur naturelle est blanche mais il est souvent coloré. La forme homopolymère présente des caractéristiques mécaniques légèrement meilleures. La forme copolymère est la seule qui convienne pour une utilisation continue en contact avec l'eau chaude.

D'après M. Bestared [47], on le trouve généralement dans des applications relativement exigeantes sur le plan mécanique, comme par exemple des engrenages, des organes de pompes, des raccords pour systèmes pneumatiques, des boîtiers de fixation de ski, etc. Il offre une résistance plus élevée à l'hydrolyse, une meilleure résistance aux bases et alcalins, voire une plus haute température de service admissible en continu. Cette dernière est de 100°C, avec de

brèves pointes de température pouvant aller jusqu'à 140°C. La plage des températures acceptables pour l'utilisation mécanique de ce matériau s'étale jusqu'à 105°C.

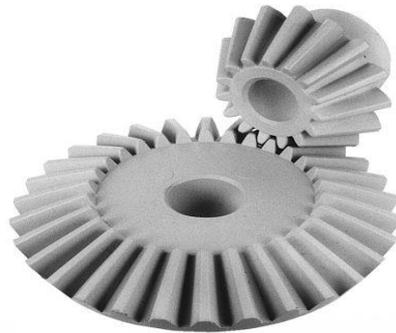


Figure I.20. Engrenage conique en POM C [48].

I.8.1. Propriétés

Les Polyoxyméthylènes sont des polymères très cristallins à intervalle de fusion assez étroit. Les homopolymères sont un peu plus cristallins et plus denses que les copolymères. Les grades renforcés choc par des élastomères (polyuréthanes par exemple) sont encore moins denses.

Les caractéristiques des Polyoxyméthylènes sont les suivantes : résistance à la traction et au fluage, bonne tenue à basse température, rigidité, stabilité dimensionnelle, résistance à la fatigue, résistance à l'humidité, aux lubrifiants, aux solvants neutres. Les tenues au fluage et à la fatigue sont bonnes.

La résistance des Polyacétals est très bonne entre pH 4 et 9. L'eau chaude est acceptée sous pression en service continu à 60 °C, à 100 °C et dans la vapeur. La tenue aux carburants, même contenant du méthanol, et aux fluides hydrauliques est très bonne.

I.8.2. Caractéristiques

La symétrie élevée du motif et la flexibilité de la chaîne conduisent à des taux de cristallinité élevés pouvant atteindre les 80 %. Il en découle une rigidité élevée bien que sa T_g soit aux alentours de -50 °C. Le POM a d'excellentes propriétés mécaniques. Plus

généralement grâce à sa structure et une haute cristallinité, le POM offre de très bonnes caractéristiques physiques :

- Résistance élevée à la traction et aux chocs.
- Excellente résistance à la fatigue.
- Très bonne résistance aux agents chimiques.
- Bonnes caractéristiques d'isolation électrique.
- Bonne résistance au fluage.
- Faible coefficient de frottement et très bonne résistance à l'abrasion.
- Large plage de températures d'utilisation.

Cependant, un POM ne doit pas être utilisé dans des interventions médicales nécessitant une implantation définitive dans le corps humain.

Quelques propriétés physiques du POM sont indiquées dans *le tableau I.2.*

Tableau I.2. Propriétés physiques moyennes du POM renforcé ou non [47]

Nom (unité)	POM	POM 25 % fv ⁵	POM 30 % bv ⁶
Résistance à la rupture par traction (MPa)	70	120	37
Résistance à la rupture par flexion (MPa)	110	165	-
Résistance à la rupture par compression (MPa)	110	140	-
Module d'élasticité par traction (MPa)	3 100	10 500	3 700
Module d'élasticité par flexion (MPa)	2 900	9 000	3 200
Coefficient de Poisson	0,35	?	?
Allongement à la rupture par flexion (%)	25	4	6
Résistance à l'usure (u/km)	0,75	-	-
Température de résistance à la chaleur en continu (°C)	-40 à 115	-40 à 135	-
Température d'utilisation maximale de courte durée (°C)	135	150	-
Température de fléchissement sous charge (HDT), charge de 1,85 MPa, ISO 75 DIN 53461 (°C)	115	160	112
Température de fléchissement sous charge, charge de 0,45 MPa, ISO 75 DIN 53461 (°C)	-	164	-
Coefficient de dilatation thermique (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	80	35	90
Module de fluage (MPa)	1 400	4 500	-
Retrait au moulage L/T (%)	1,4/1,3	1,2/0,4	-
Absorption d'eau à 23 °C à 50 % HR en 24 heures (%) ⁷	0,25	0,5	0,15
Absorption d'eau CWS (saturation) (%)	0,8	0,8	0,8
Prix approximatif de la matière (\$/kg)	1,08	-	-

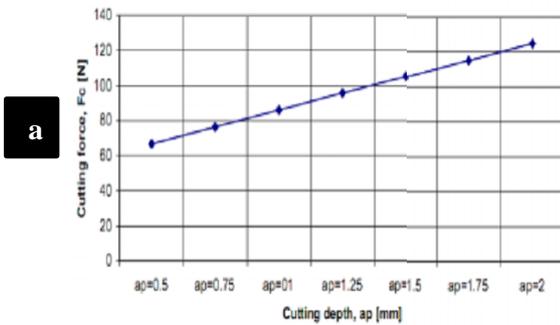
I.8.3. Comportement au contact d'agents chimiques

À une température élevée, le POM est stable à l'eau, aux solutions aqueuses de sels et à la plupart des solvants organiques usuels (alcools, esters, hydrocarbures aliphatiques et aromatiques), ainsi qu'aux carburants, aux huiles et aux graisses, aux liquides de freins et aux liquides réfrigérants. On ne connaît que peu de solvants susceptibles de dissoudre le POM à température élevée. En revanche, le POM n'est pas stable aux oxydants, aux acides organiques et inorganiques. Par contre, les bases ne l'attaquent pas, même à haute température. S'il est exposé de manière prolongée à la lumière solaire, le POM se fragilise mais il existe des stabilisants anti-UV qui permettent de doubler sa durée de vie aux UV.

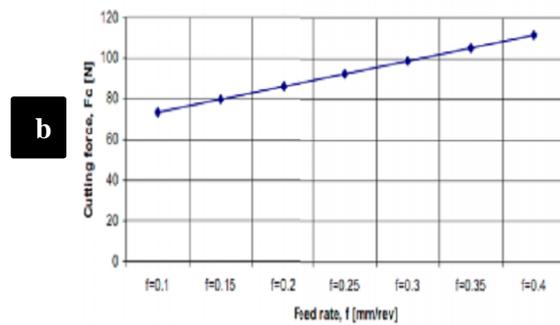
I. 9. Travaux de recherches concernant l'usinage des polymères

Cette partie récapitule la recherche dans la littérature existante reliée à l'usinage des polymères. L'objectif est de faire une étude à partir de ces articles publiés et de comprendre les travaux accomplis concernant l'usinage des polymères jusqu'à nos jours. Dans cette recherche on a trouvé que beaucoup d'auteurs ont étudié l'influence de la matière à usiner, les paramètres de coupe, la géométrie des outils, l'influence des types de substrats de l'outil sur l'usinabilité de ces polymères et aussi l'usinabilité des polymères renforcés. Plusieurs articles ont été publiés dans ces domaines, parmi eux on cite :

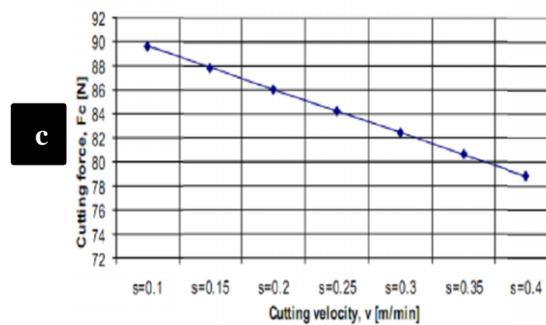
M. Marin [49] a présenté une étude sur l'influence des paramètres et régime de coupe sur l'effort de coupe principale produit lors d'usinage de plastique semi extrudé PA66 (ERTA) avec un outil de coupe en carbures cémentés non-revêtue sans brise-copeaux K15 (code CNMG 12 08 02). Il a utilisé la méthode d'analyse de variance ANOVA pour indiquer l'influence des facteurs de coupe sur l'effort de coupe principale. Il a observé que la plus grande influence sur l'effort de coupe principal entre les paramètres de coupe est successivement la profondeur de passe (ap), l'avance par tour (f) et la vitesse de coupe (V_c). La vitesse de coupe a une influence négative sur l'effort de coupe. En augmentant la vitesse de coupe, les valeurs de l'effort de coupe diminuent (*Figure I.21*).



Effort de coupe (F_c) pour
($f=0.2$ mm/tr, $V_c=117,75$ m/min).



Effort de coupe (F_c) pour
($a_p=1$ mm, $V_c=117,75$ m/min).



Effort de coupe (F_c) pour ($a_p=1$ mm, $f=0,2$ mm/tr).

Figure I.21. Influence de paramètre de coupe sur la l'effort de coupe.

Davim et Mata [49] ont évalué l'influence du renforcement des fibres de verre lors de tournage des polymères PA6 et PA66 (GF30) avec un outil de coupe en carbure cémenté (K15). Les auteurs ont trouvé que la présence de fibres de verre dans le polymère PA66 conduit à des valeurs plus élevées des efforts de coupe par rapport au polymère PA6.

Keresztes et autres [50] ont proposé une étude comparative entre les efforts de coupe pour différents polymères tels que PA6 (magnésium), PA6 (Na), POMC (Polyoxyméthylène) et le HD1000 (UHMWPE). Ils ont constaté que des efforts de coupe plus élevés sont enregistrés avec le PA6 (Mg) et les plus faibles avec le polymère HD1000. Les efforts de coupe enregistrés avec le POM C sont presque la moitié de celles enregistrées en PA6 (Mg) qui est un matériau dur et plus résistant à la coupe que les trois autres polymères.

Kaddeche et autres [51] Ont étudié la rugosité de surface, l'effort de coupe de et l'élévation de température lors de l'usinage de deux types de polymères, HDPE 80 et HDPE 100. Ils ont conclu que des surfaces améliorées sont obtenues lors de l'usinage du HDPE 80 et que la rugosité de surface est affectée par l'avance.

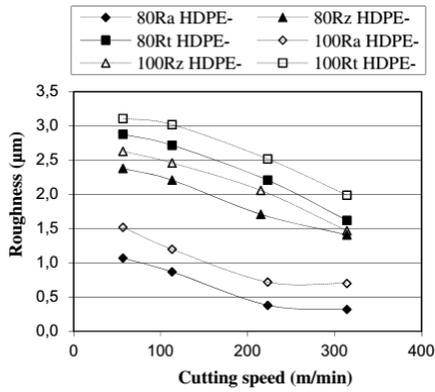


Figure 1.22. Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface.

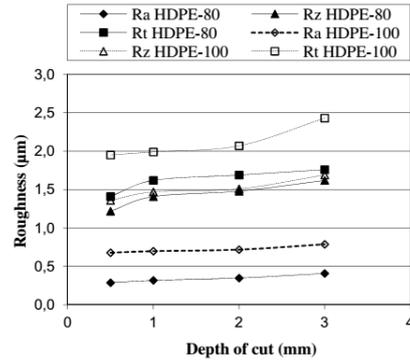


Figure 1.23. Effet de la profondeur de passe sur la rugosité de surface.

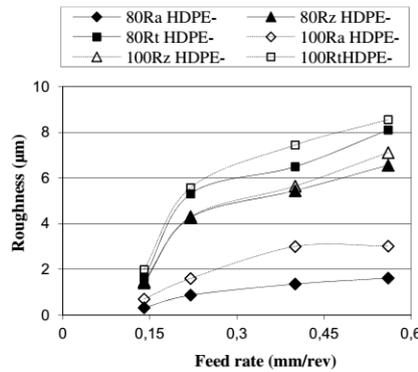


Figure 1.24. Effet de l'avance sur la rugosité de surface.

En ce qui concerne les efforts de coupe, l'augmentation des vitesses de coupe conduit à des composantes des efforts de coupe (F_r , F_a et F_v) inférieures et F_v est la composante dominante.

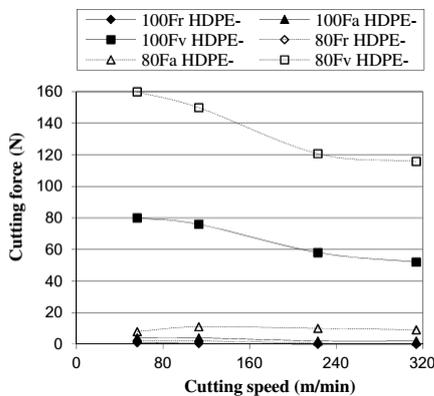


Figure 1.25. Effet de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe.

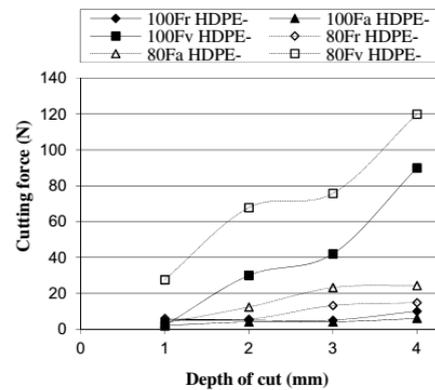


Figure 1.26. Effet de la profondeur de passe sur l'effort de coupe.

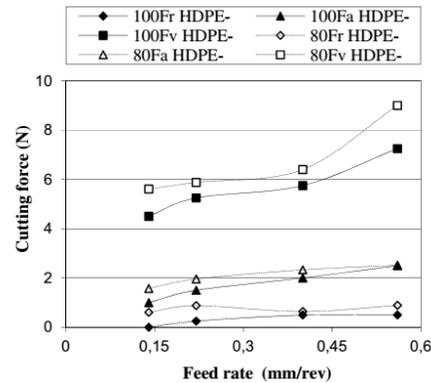


Figure I.27. Effet de l'avance sur l'effort de coupe.

Ils ont constaté aussi que la température générée dans la zone de coupe est plus élevée lors de la coupe du HDPE 80 que HDPE 100 et la profondeur de passe est le facteur le plus influant sur la température dans la zone de coupe.

Jagtap et autres [52] proposent une revue sur l'usinage des polymères tels que : ABS, POM, PA, PC, LDPE, HDPE, PMMA, PP, PS, PVC, EP et PF en tournage, fraisage et perçage. Les auteurs ont indiqué que le comportement concernant l'usinage de divers polymères n'est pas le même. À cet effet, les auteurs suggèrent d'étudier séparément les effets des paramètres de coupe pour différents polymères. Ils ont déclaré que les propriétés mécaniques telles que la ténacité, la rigidité, la résistance à l'abrasion et la résistance à la chaleur de certains polymères sont similaires aux métaux. (**Tableau I.3**).

Tableau I.3. Comparaison des propriétés importantes

S.N.	Property	Metals	Plastics
1	Density, g/cm ³	2 to 22 (average 8)	1 to 2
2	Melting points	Low to high	Low
3	Hardness	Medium	Low
4	Machinability	Good	Good
5	Tensile strength, MPa	Up to 2500	Up to 140
6	Compressive strength, MPa	Up to 2500	Up to 350
7	Young's modulus, GPa	15 to 400	0.001 to 10
8	Thermal expansion	Medium to high	Very high
9	Thermal conductivity	Medium to high	Very low
10	Electrical characteristics	Conductors	Insulators
11	Chemical resistance	Low to medium	Good
12	Stiffness	High	Low
13	Malleability	High	High

Panda et autres [53] ont étudié l'influence des paramètres d'usinage (V_c , f et ap) sur la rugosité de surface lors du tournage du nylon 6/6. En utilisant l'analyse de variance (ANOVA),

ils ont constaté que la rugosité de surface diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe et augmente avec l'augmentation de l'avance par tour (f). Les points optimaux pour les paramètres de processus pour une rugosité de surface optimale sont : $V_c = 1400$ m / min, $f = 0,1$ tr/min et $ap = 0,3$ mm.

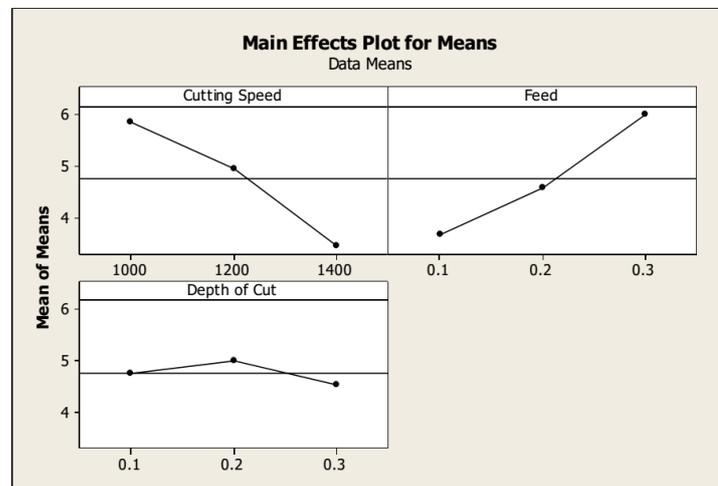


Figure I.28. Diagramme des effets principaux pour la rugosité de surface.

Oktem et autres [54] ont adopté la méthodologie des ANN pour la modélisation et l'optimisation des paramètres de coupe pour une rugosité de surface minimale lors du fraisage du POM C. De la même manière, Gaitond et autres [55] ont fait une analyse des effets des paramètres de coupe, vitesse de coupe (V_c) et l'avance par tour (f) sur des aspects d'usinabilité, tels que l'effort de coupe (F_c), la rugosité de la surface (Ra), l'effort de coupe spécifique (K_s) et la puissance de coupe (P) pendant le micro-usinage du polyamide renforcé de 30% de fibres (PA66 GF30) avec un outil de coupe en diamant poly-cristallines (PCD). La méthodologie de surface de réponse (RSM) a été employée. Lors de la mesure de la rugosité de surface, les auteurs ont répété la mesure à six reprises et la moyenne arithmétique (Ra) a été adoptée.

Les résultats des expériences sur le micro-usinage du polyamide renforcé trouvés par les auteurs montrent que :

1. L'analyse de la variance (ANOVA) indique que les modèles quadratiques sont proportionnels à l'intervalle de confiance de 99%.
2. L'effort de coupe augmente avec l'augmentation de l'avance par tour pour n'importe quelle valeur de la vitesse de coupe. De plus, l'effort de coupe diminue avec l'augmentation de (V_c). L'effort de coupe est sensible à des valeurs élevées d'avance par

rapport à des petites valeurs de ce paramètre, et cela pour toutes les valeurs de vitesse de coupe.

3. La rugosité de la surface diminue avec des valeurs basses de l'avance et des valeurs plus élevées de la vitesse de coupe (*figure. I.29*).

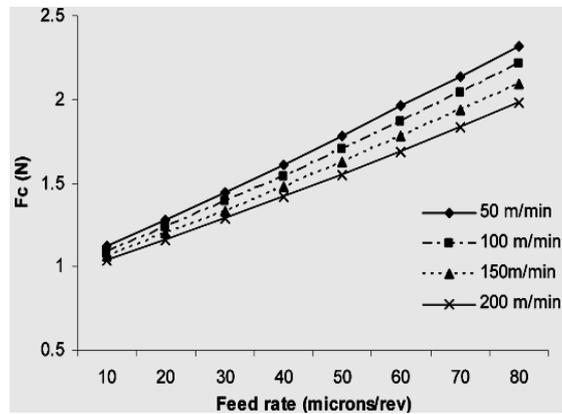


Figure I.29. Effet de l'avance et la vitesse de coupe sur l'effort (F_c).

4. L'effort de coupe spécifique est minimal pour une avance de 60 $\mu\text{m}/\text{tr}$ et une vitesse de coupe de 200 m/min (*figure. I.30*).
5. L'augmentation de la puissance de coupe avec l'avance par tour pour toutes les valeurs données des vitesses de coupe. Les valeurs plus basses de la vitesse de coupe et de l'avance par tour sont nécessaires pour réduire au minimum la puissance de coupe (*figure. I.31*).

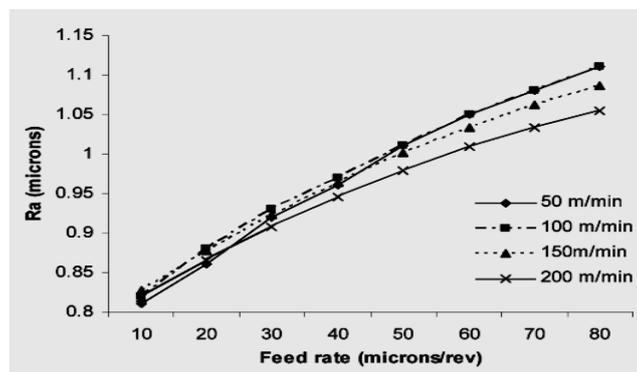


Figure I.30. Effet de l'avance et la vitesse de coupe sur la rugosité de surface (R_a).

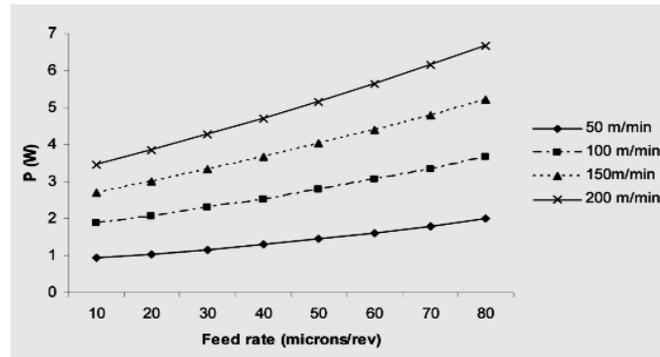


Figure 1.31. Effet de l'avance et la vitesse de coupe sur la puissance de coupe (P).

D'autre part, Lazarevic et autres [56] ont appliqué la méthode de Taguchi pour minimiser la rugosité de surface lors du tournage du Polyamide PA6. Ils ont déterminé l'influence des quatre paramètres de coupe telle que la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le rayon du bec de l'outil et leurs interactions sur la rugosité de surface (Ra) en utilisant le plan de Taguchi L_{27} , basé sur l'analyse des moyennes (ANOM) et l'analyse de la variance (ANOVA).

Les auteurs ont montré que l'avance (f), est le paramètre le plus significatif suivi par l'insertion l'interaction (vérifiée) du rayon du bec (r) et de la profondeur de passe (ap). Les auteurs ont également mentionné que la vitesse de coupe (Vc) n'a pas d'effet significatif sur l'évolution de la rugosité de surface. Ces résultats concernant l'effet des paramètres de coupe sur l'évolution de la rugosité de surface ont été confirmés par Madic et autres [57] lors de l'usinage du polyamide. En utilisant la méthodologie des ANN ils ont développé un modèle de rugosité de surface en termes de paramètres de coupe principales telle que l'avance, la vitesse de coupe, la profondeur de passe et le rayon du bec de l'outil. À partir de l'analyse de modèle réalisée en générant des graphiques de réponse 3D, ils ont arrivés aux conclusions suivantes :

- L'avance est le facteur dominant affectant la rugosité de la surface, suivie du rayon du bec de l'outil et de la profondeur de passe, la vitesse de coupe n'a pas d'effet important.
- La rugosité de surface minimale résulte de la combinaison d'une faible avance, d'une faible profondeur de passe, d'une faible vitesse de coupe et d'un rayon du bec d'outil élevé.
- La méthode des ANN peut être efficacement utilisée pour la modélisation mathématique, alors que l'IHSA peut être utilisé pour trouver les paramètres de coupe optimale.

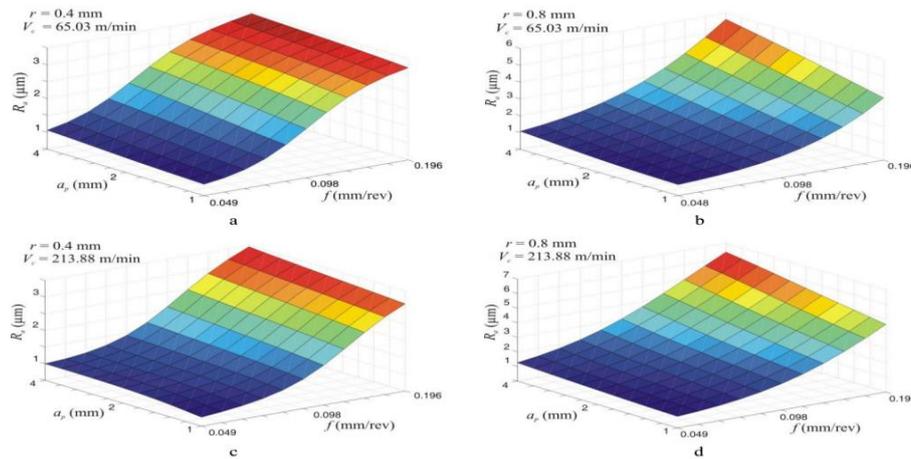


Figure I.32. L'influence de (f) et (ap) à différentes combinaisons de (V_c) et du rayon du bec de l'outil : a) $V_c = 65.03 \text{ m/min}$, $r = 0.4 \text{ mm}$; b) $V_c = 65.03 \text{ m/min}$, $r = 0.8 \text{ mm}$; c) $V_c = 213.88 \text{ m/min}$, $r = 0.4 \text{ mm}$; d) $V_c = 213.88 \text{ m/min}$, $r = 0.8 \text{ mm}$.

S. Yilmaz et autres [58] ont proposé une étude qui traite la prédiction de la rugosité de surface au moyen d'une méthode d'approche par réseau neuronal lors de l'usinage d'une matière plastique d'ingénierie (polyamide coulé extrudé PA6G). Le réseau comporte 2 entrées, la sortie du réseau est la rugosité de surface (R_a).

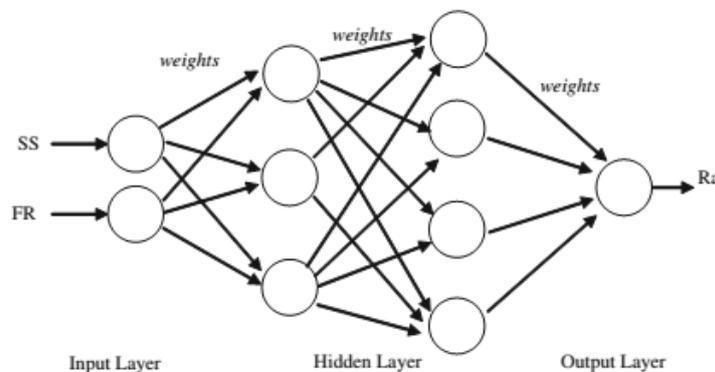


Figure I.33. Structure de l'ANN utilisée pour l'estimation de la rugosité de surface.

En raison de rugosité de surface du modèle créé, la valeur optimale de (R_a) est atteinte à $0,8371 \mu\text{m}$ à 400 tr/min et 251 cm/min .

L. R. Silva et autres [59] ont proposé une étude sur l'effet de la géométrie d'outil de coupe sur l'usinabilité du polyamide avec et sans renforcement de fibres de verre à 30%, pendant le tournage de précision en comparant les performances des outils en carbure non revêtus avec la géométrie de coupe standard et des outils avec préparation de l'arête modifiée. Les résultats indiquent que les composantes de l'effort de coupe ont été réduites avec le rayon du bec de

l'outil. Pour un rayon de bec $r_\varepsilon = 0,4$ mm, l'effort radial a présenté des valeurs plus élevées suivi par l'effort de coupe et en dernier lieu par l'effort axial. Cependant, lorsque le rayon de bec a été réduit, l'effort de coupe a dépassé la composante radiale, en particulier lors du tournage du polyamide renforcé. La réduction des efforts de coupe s'explique par la zone de contact réduite. D'autre part, ils ont trouvé que l'effort de coupe spécifique a diminué lorsque l'avance a été élevée et a présenté des valeurs comparables aux alliages métalliques, néanmoins, le polyamide PA66 a présenté une augmentation de (K_s) de trois fois par rapport au composite PA66-GF30.

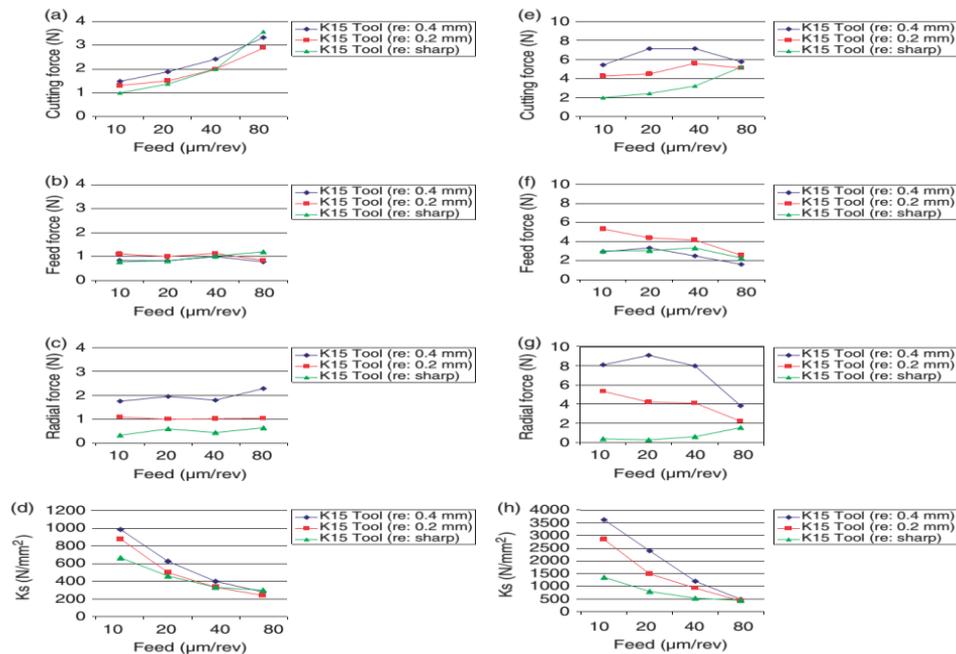


Figure I.34. Effet de l'avance sur (K_s) lors de l'usinage du composite PA66-GF30 et du polyamide PA66 à $V_c = 70$ m / min et $a_p = 150$ mm : (a- d) pour le polymère PA66-GF30 et (e- h) pour le Polyamide PA66.

En général, la rugosité de surface augmente avec une avance élevée pour les deux matériaux ; cependant, une finition de surface plus médiocre a été promue par l'outil avec le rayon du bec pointu dû aux avances plus profondes laissées sur la surface de travail.

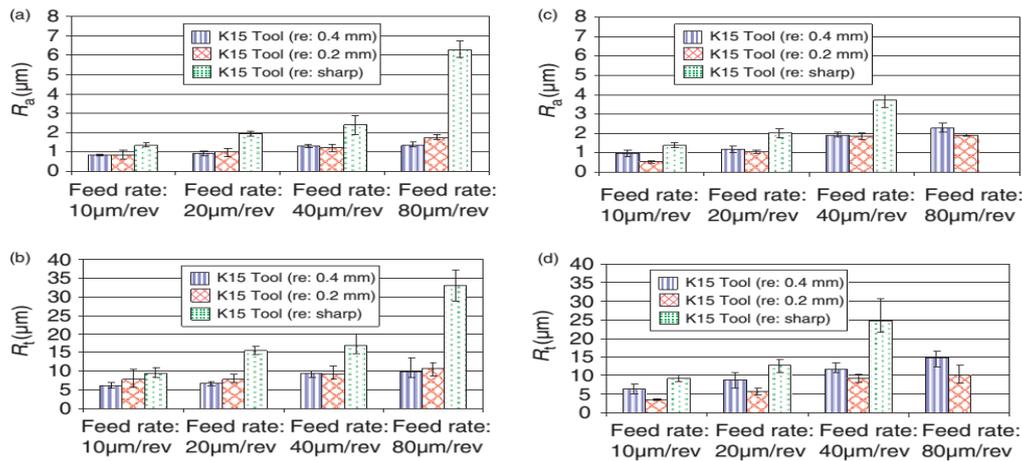


Figure I.35. Effet de l'avance et du rayon du bec de l'outil sur la rugosité de surface du composite PA66-GF30 (a et b) et du polyamide PA66 (c et d).

I.10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases nécessaires à la compréhension de cette étude. Ce chapitre est divisé en trois parties, la première expose un rappel des bases scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux tel que : la définition de l'usinabilité des matériaux, l'évolution de l'usinabilité, les paramètres de coupe (la vitesse de coupe, la profondeur de passe, la vitesse d'avance,... etc). La seconde partie présente les méthodes d'optimisation les plus utilisées dans les publications les plus récentes dans ce domaine, en plus de quelques méthodes classiques. La troisième partie traite l'état de l'art sur l'usinabilité des polymères ainsi que les méthodes d'optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage des polymères.

Le prochain chapitre (**chapitre II**) présente l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'ensemble du matériel utilisé pour une approche expérimentale méthodique, qui a servi à l'étude de l'évolution des différents paramètres technologiques d'usinage, tels que la rugosité de surface (Ra), les efforts de coupe (F_x , F_y et F_z), le débit du copeau enlevé (MRR), la puissance de coupe (P_c), l'effort spécifique de coupe (K_s) et la température de coupe (T°). Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification des expériences et les conditions de réalisation des essais.

Les essais d'usinage sur le polymère POM C, nécessaires à la réalisation de notre thèse ont été effectués au Laboratoire de Mécanique et de Structure (LMS) du département de Génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945- Guelma.

II.2. Matériels utilisés

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences ainsi que les équipements de mesure des différents paramètres technologiques. Un banc d'essais comportant un tour à charioter, une plateforme Kistler pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre (2D), une station AltiSurf pour déterminer la rugosité en (3D) de la pièce usinée et un pyromètre pour la mesure de la température dans la zone de coupe.

II.2.1. Machine-outil

Les essais sont réalisés sur une tour parallèle de marque TOS TRENCIN modèle SN40C (*figure II.1*), ayant les caractéristiques suivantes :

- Puissance du moteur électrique : 6,6 kW.
- Nombre de tours par minute : 45 à 2000 tr/min.
- Avance en millimètres par tour : 0,08 à 6,4 mm/tr.



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

II.2.2. Matériau à usiné

Le matériau utilisé dans cette étude est un polymère thermoplastique appelé Polyoxyméthylène (POM C). Il est insensible aux fissures et à une faible absorption d'humidité, une dureté élevée, une rigidité élevée, une bonne résistance aux chocs et une résistance élevée à la fatigue [47]. Toutes ses caractéristiques ajoutées à son faible coût donnent une performance impressionnante de cette classe de polymère. Ce matériau est recommandé pour la production des pièces mécaniques (pignon, rotors, roues, paliers, éléments de glissement et ressorts, cages de roulements, carters de pompes,... etc.).

Les éprouvettes utilisées pour les essais de rugosité de surface et des efforts de coupe sont coupées sur des barres plaines en Polyoxyméthylène (POM C) qui possèdent un diamètre $d = 85$ mm et une longueur $l = 400$ mm avec plusieurs paliers de 20 mm de longueurs séparées par des gorges de 5 mm (*figure II.2*).



Figure II.2. Eprouvettes pour différents essais.

Les propriétés techniques du POM C sont présentées dans le (*tableau II.1*) :

Tableau II.1. Propriétés techniques du POM C [47].

Générales	Valeurs	Unités
<i>Densité</i>	1,41	g/cm ³
<i>Absorption d'humidité</i>	0,2	%
Mécaniques	Valeurs	Unités
<i>Résistance à la traction</i>	67	MPa
<i>Allongement à la rupture</i>	30	%
<i>Module d'élasticité à la traction</i>	2800	MPa
<i>Résistance aux chocs</i>	6	KJ/m ³
<i>Dureté à la bille</i>	150	MPa
<i>Dureté shore D</i>	81	Echelle D
Thermiques	Valeurs	Unités
<i>Température de fusion</i>	165	C°
<i>Conductibilité thermique</i>	0,31	W/(m*k)
<i>Capacité thermique spécifique</i>	1,5	KJ/(Kg*k)
<i>Température d'utilisation à long terme</i>	50 – 100	C°
<i>Température d'utilisation à court terme</i>	140	C°

II.2.3. Plaquette et porte outils utilisés

Pour la réalisation des essais, toutes les opérations de tournage ont été effectuées par une plaquette en carbure métallique SCMN 12 04 08 (K10). Deux types de portes outils ont été utilisés, l'un avec l'angle de direction principale de 45° et l'autre avec 75° (*figure II.3*).



Figure II.3. Portes outils utilisés.

II.2.4. Instruments de mesure utilisés

Pour réaliser les différentes mesures des paramètres de sortie, nous avons utilisé les instruments de mesure suivants :

- Un dynamomètre KISTLER 9257B pour la mesure des efforts de coupe.
- Un rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface.
- Un rugosimètre 3D pour voir la topographie de la surface.
- Un pyromètre à infrarouge modèle CAUTION 9U0401 pour la mesure de la température de coupe.

II.2.4.1. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (KISTLER 9257 B) qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe, il comporte plusieurs éléments auxquels on cite : la plate -forme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel DYNOWARE et enfin une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil a le mouvement de translation. Ce dernier est monté sur la plate-forme, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (*figure.II.4*). La plate-forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (*figure II.5*).

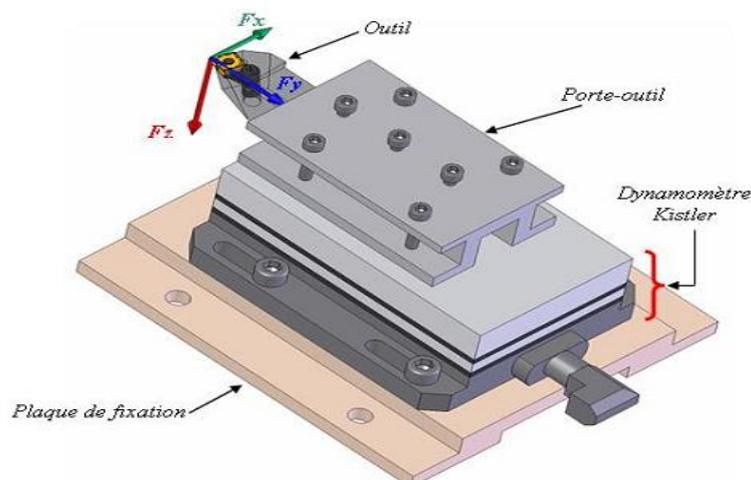


Figure II.4. Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

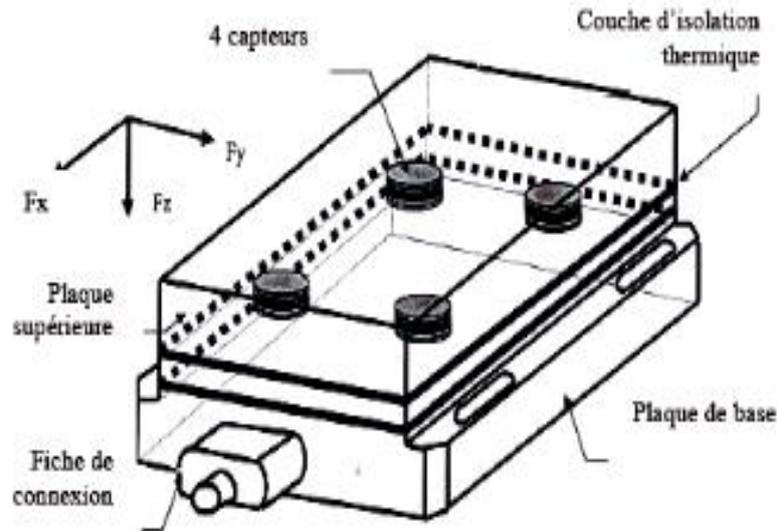


Figure II.5. Capteur d'effort de coupe KISTLER [13].

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

La (**figure II.6**) présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composants de l'effort de coupe (effort axiale, effort radiale et effort tangentielle).

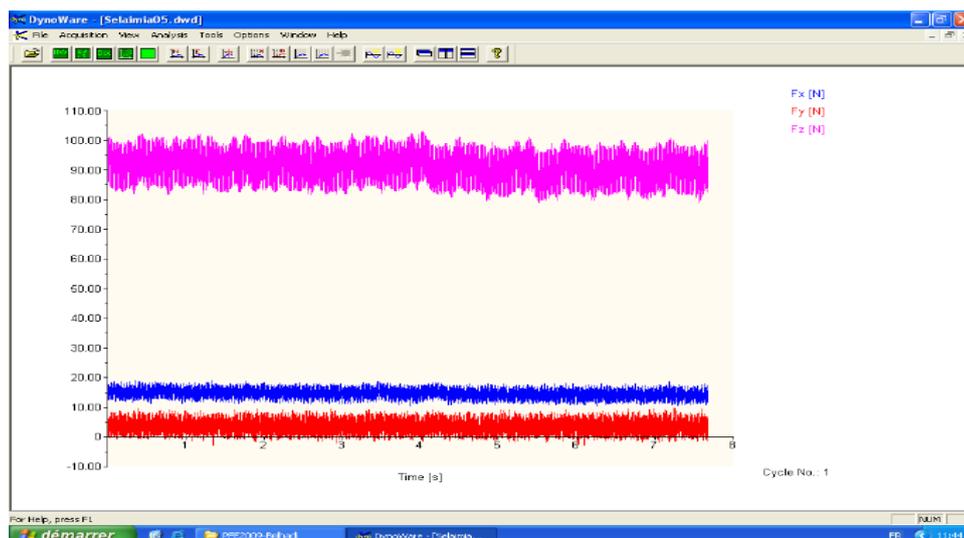


Figure II.6. Exemple d'acquisition du logiciel DYNOWARE.

La (*figure II.7*) illustre l'enchaînement des équipements et la méthode utilisée pour la mesure des efforts de coupe :

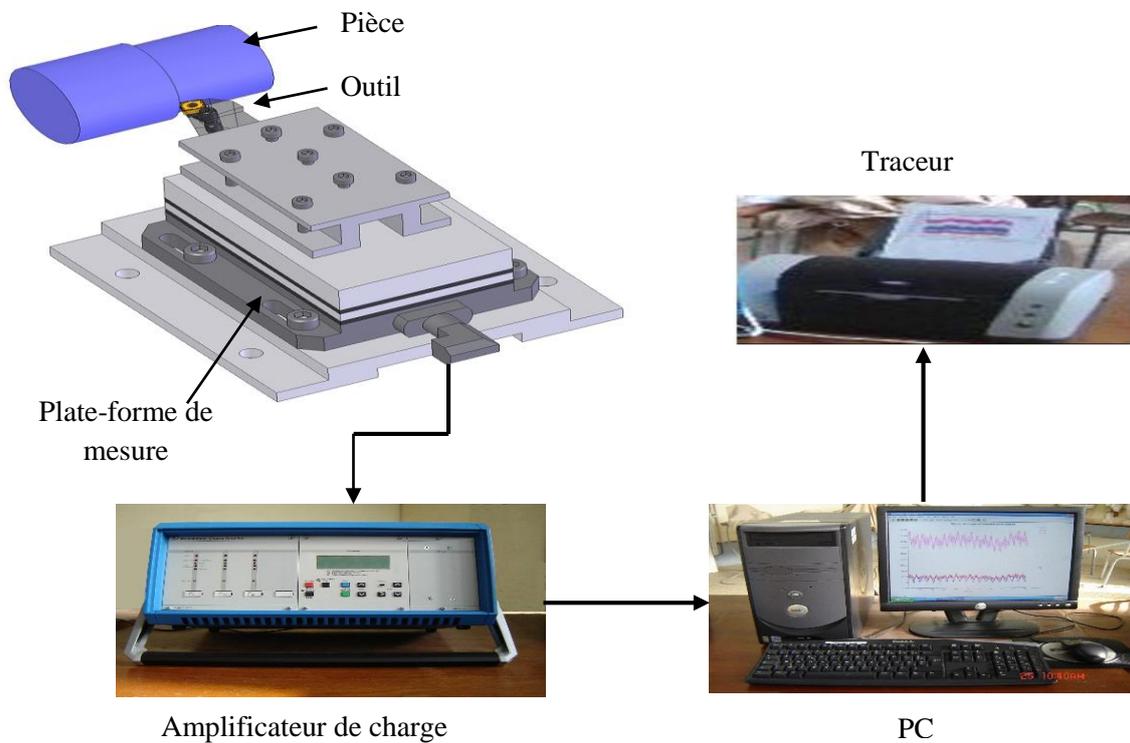


Figure II.7. Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II.2.4.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

a) Rugosimètre 2D

Les différents critères de la rugosité de surface (R_a , R_t et R_z) ont été obtenus instantanément après chaque passage de l'outil (essai) au moyen d'un appareil de rugosité Mitutoyo Surftest SJ-201 muni d'une pointe en diamant de $5\ \mu\text{m}$ et se déplaçant linéairement (axialement) sur la surface usinée. Pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été effectuée directement sur la pièce en position de travail sans démonter celle-ci du tour. Les mesures ont été répétées trois fois sur trois lignes de cylindre axial séparées à 120° . La norme pour la mesure de la rugosité de surface est ISO 4287. Le rugosimètre 2D utilisé est présenté dans la (*figure II.8*).



Figure II.8. Rugosimètre 2D.

b) Rugosimètre 3D

Pour caractériser correctement la rugosité de surface de la pièce à travailler, plusieurs mesures basées sur la plate-forme 3D de métrologie optique modulaire Altisurf 500 ont été réalisées. Cet appareil permet d'étudier finement la topographie de la surface des pièces usinées (*figure II.9*).

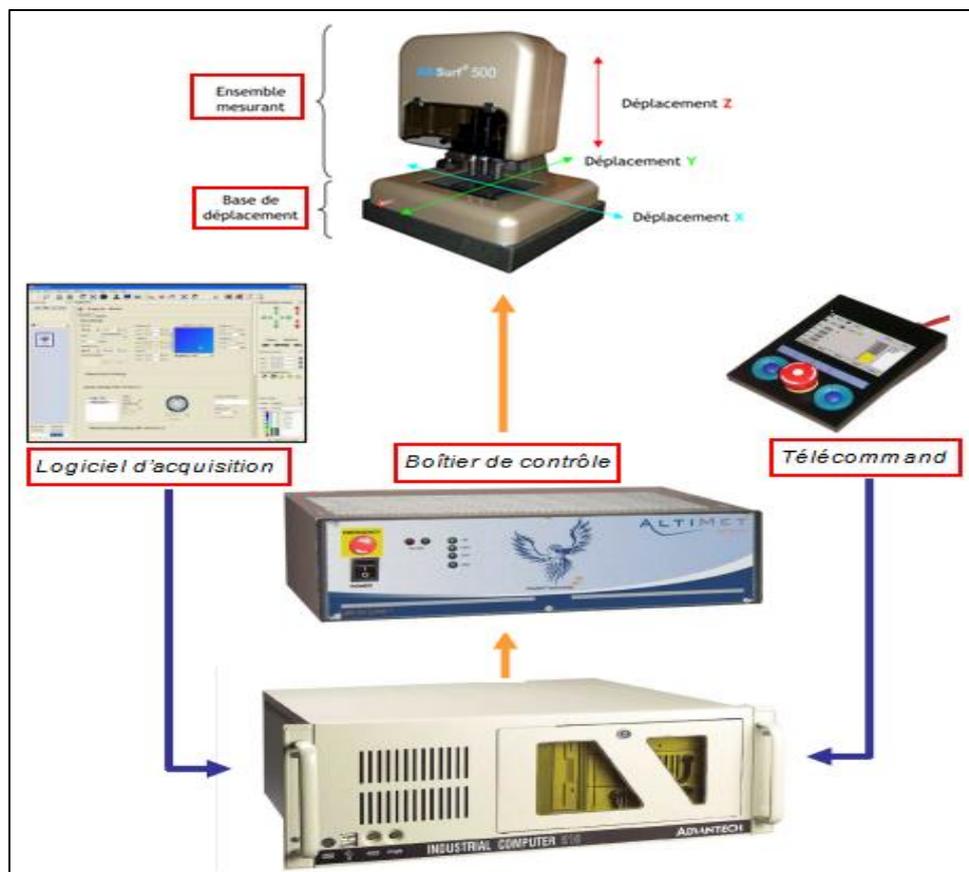


Figure II.9. Plate-forme 3D de métrologie optique modulaire Altisurf 500.

L'appareil *AltiSurf*®500 standard est composé :

- ✓ d'une base en granite ;
- ✓ d'un ensemble inférieur ou base de déplacement : plusieurs tables de déplacements motorisés de haute précision permettant le mouvement de l'échantillon selon les axes X et Y, éventuellement selon un ou plusieurs axes rotatifs. Une plateforme rectangulaire permet de poser l'échantillon à mesurer ;
- ✓ de différents accessoires : quatre poignées de transport amovibles. Fixées sur le marbre, elles facilitent le déplacement de la platine. Un jeu de quatre amortisseurs antivibratoires. Un jeu de cale-étalon (plan de verre, cale de rugosité, cale de step).

Un exemple d'acquisition avec le rugosimètre en 3D est présenté dans la (**figure II.10**).

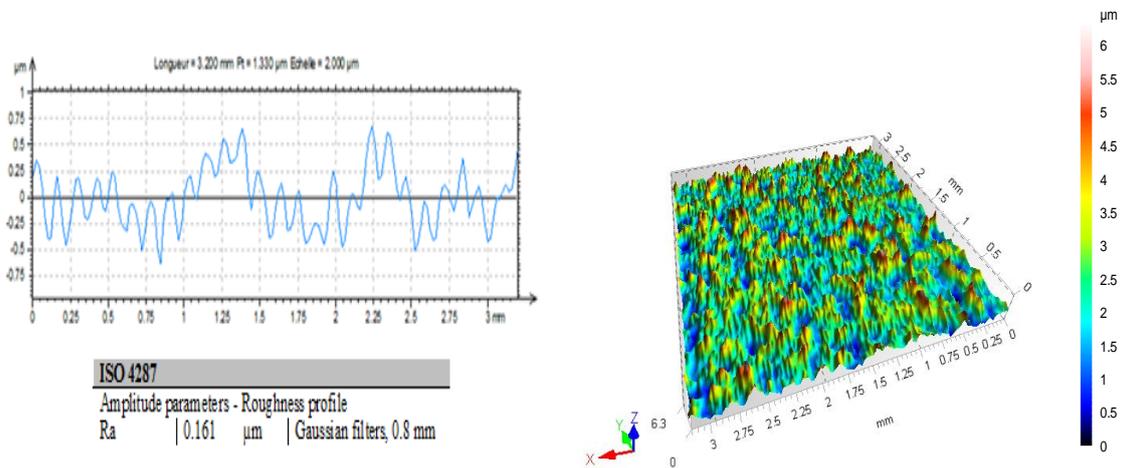


Figure II.10. Rugosité de surface en 3D mesurée par la plate-forme Altisurf 500.

La figure II.11 illustre la configuration expérimentale et les instruments utilisés pour la mesure des composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) et de la rugosité de surface en 2D et en 3D.

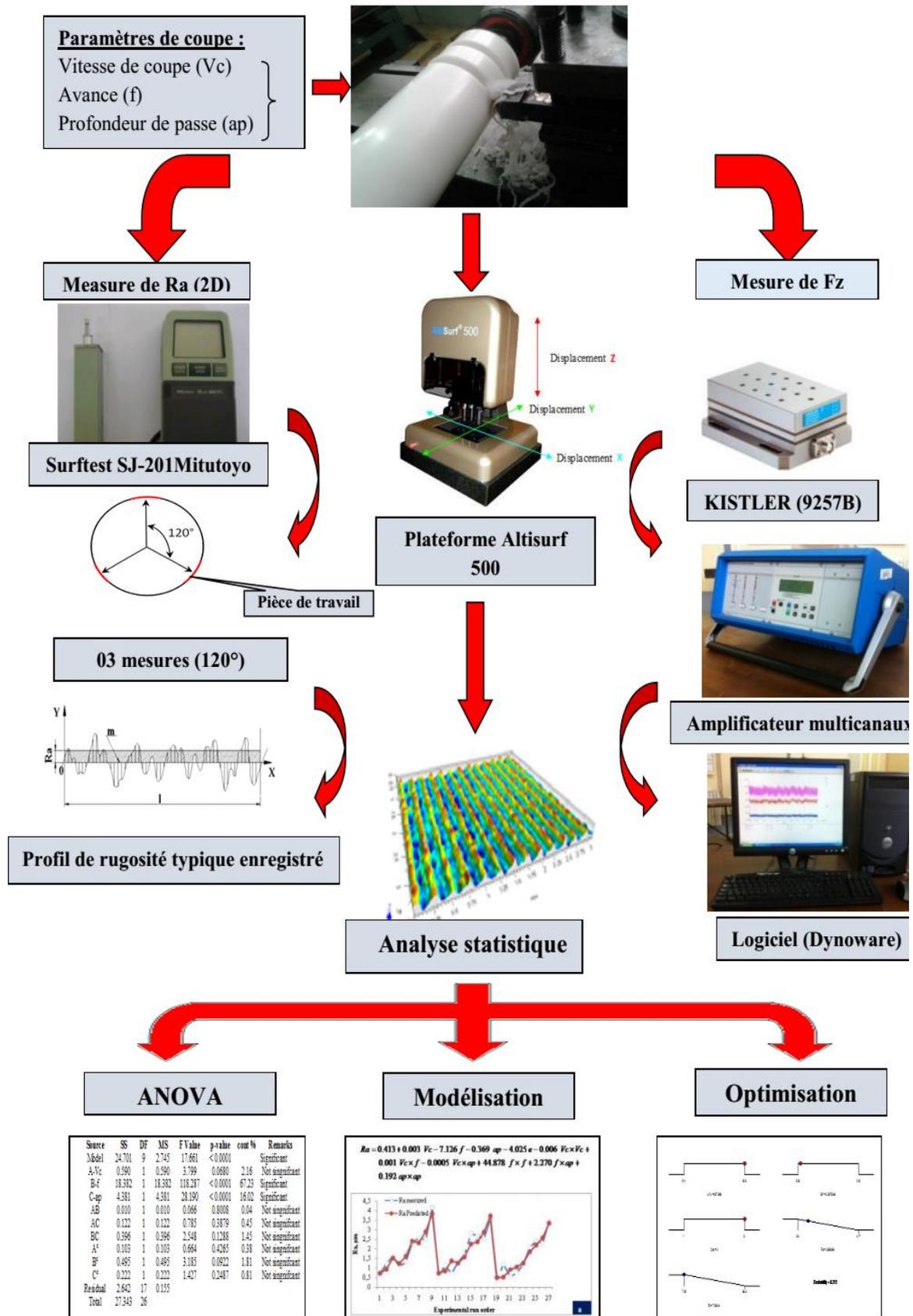


Figure II.11. Schéma de la configuration expérimentale.

II.2.4.3. Mesure de la température de coupe

Pour mesurer la température dans la zone de coupe, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge modèle CAUTION 9U0401 (*figure II.12*). Le pyromètre mesure les températures de surface à distance. Il concentre l'énergie infrarouge rayonnant de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (maximale, moyenne et minimale) qui seront affichées sur l'écran digital en degrés Celsius ou Fahrenheit. Une sortie analogique/digitale permet le transfert des données enregistrées. Le pyromètre à infrarouge CAUTION 9U0401 présente les caractéristiques suivantes :

- Gamme de mesure : -40 °C à 550 °C (-40 °F à 1022 °F).
- Gamme spectrale : 8 à 14 microns.
- Précision : $\pm 1\%$ ou $\pm 1\text{ °C}$ (2 °F).
- Temps de réponse (95 %) : 500 ms.
- Visée : Laser mono point.



Figure II.12. Pyromètre à infrarouge.

II.2.4.4. Autres équipements

- un chronomètre pour enregistrer le temps d'usinage ;
- un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce ;
- un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés.

II. 3. Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe (V_c, f, ap), le temps d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil ($\alpha, \gamma, \lambda, \chi$), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...) et la lubrification.

Considérant $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ comme paramètres d'entrée et $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ comme paramètres de sortie. L'influence d'un ou de plusieurs facteurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) sur un paramètre Y , peut être obtenue en utilisant les deux méthodes suivantes:

- Méthode uni-factorielle
- Méthode multifactorielles

II.3.1. Méthode uni-factorielle

Le but de l'utilisation de cette méthode est d'évaluer l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y . L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiné $X [X_i \in \{X_{min}, X_{max}\}]$, tout en maintenant tous les autres facteurs constants.

Pour chaque $X = X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i , ($i = 1 \div N$). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation $Y = f(X)$. Dans ce cas, on varie seulement le facteur X , tout en maintenant les autres facteurs constants.

Tableau II.2. Réalisation d'essais d'après la méthode uni-factorielle

N°	Facteur variable	Paramètre de sortie						
	X	Y_1	Y_2	-	Y_j	-	Y_n	Y_{moy}
1	X_1	Y_{11}	Y_{21}	-	Y_{j1}	-	Y_{n1}	Y_{moy1}
2	X_2	Y_{12}	Y_{22}	-	Y_{j2}	-	Y_{n2}	Y_{moy2}
3	X_3	Y_{13}	Y_{23}	-	Y_{j3}	-	Y_{n3}	Y_{moy3}
i	X_i	Y_{1i}	Y_{2i}	-	Y_{ji}	-	Y_{ni}	Y_{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X_N	Y_{1N}	Y_{2N}	-	Y_{jN}	-	Y_{nN}	Y_{moyN}

Dans notre cas les conditions de coupe utilisées pour les différents essais d'usinage du Polyoxyméthylène POMC par une plaquette de coupe en carbure métallique, sont indiquées dans le **tableau II.3**.

Tableau II.3. Conditions de coupe pour les essais uni-factorielle

Paramètres constants	Valeurs fixes	Paramètres variables	Valeurs variables
V_c (m/min)	310	f (mm/tr)	0,08 ; 0,12 ; 0,16 ; 0,24
ap (mm)	1		
V_c (m/min)	310	ap (mm)	0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2
f (mm/tr)	0,12		
ap (mm)	1	V_c (m/min)	220 ; 310 ; 440 ; 500
f (mm/tr)	0,12		

II.3.2. Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y_i est une relation qui a la forme :

$$Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (\text{II.1})$$

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c, f, ap) sur les diverses fonctions d'optimisation (rugosité, effort de coupe, puissance de coupe et le taux d'enlèvement de la matière). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante :

$$N = q^k \quad (\text{II.2})$$

Où : N : nombre d'essais, q : nombre de niveaux de variations des facteurs de base, k : nombre de facteurs de base.

II.4. Plans d'expériences adoptés

L'approche expérimentale est adoptée en vue d'étudier les effets des différents facteurs et de leur interaction sur les réponses en les changeant d'une façon commandée.

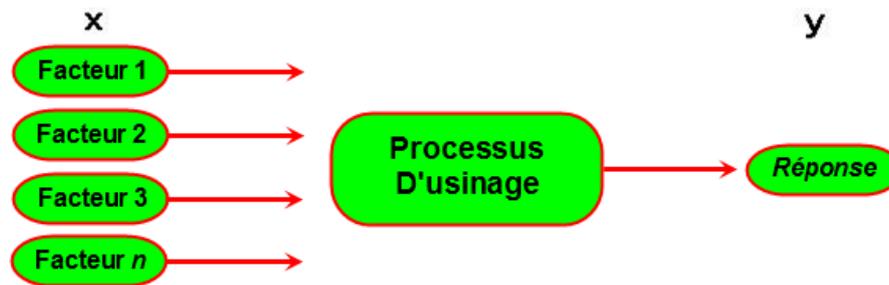
II.4.1. Définition

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit effectuer. Il a pour but de minimiser le nombre d'essais pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié en fonction de ses diverses caractéristiques.

II.4.2. Terminologie

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de *réponse*. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées *facteurs*. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes *facteur* et *réponse* sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

Le diagramme ci-dessous résume de manière plus simple cette définition :



II.4.3. Différents types de facteurs

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens.

Chaque facteur peut être :

- **Continu** : la pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.
- **Facteurs discrets** : au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.
- **Facteurs ordonnables** : il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

- **Facteurs booléens** : les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

II.4.4. Méthodologie des plans d'expériences

Pour l'élaboration d'un plan d'expériences, on passe généralement par les trois étapes suivantes :

- ✓ **La recherche des facteurs influents** : Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié : parmi tous les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse, lesquels ont une influence significative ? Que vaut cette influence ? et y a-t-il des interactions entre ces facteurs ? Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences sont quantifiées, on passe au second stade :
- ✓ **La modélisation** : Dans cette phase, on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe... et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de n lignes et k colonnes, où n est le nombre d'expériences et k est le nombre des effets.
- ✓ **L'optimisation** : Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié.

II.4.5. Démarche et plan d'expérience adopté

Les éléments du régime de coupe (V_c, f, ap) sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la rugosité de surface, la puissance de coupe et l'effort spécifique de coupe représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences. Nous nous servons des plans d'expériences pour quantifier les influences des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel

Design-Expert (version 10), c'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse des expériences. Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

- établissement du but et des objectifs des essais ;
- sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses) ;
- choix du type de plan d'expérience ;
- conduite des essais ;
- détermination des facteurs influents ;
- modélisation rapide des réponses ;
- recherche des paramètres optimaux ;
- validation des résultats.

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 cas, deux plans d'expériences ont été adoptés : le Plan Factoriel Complet (L27) et Taguchi (L16).

II.4.5.1. Plan factoriel complet L27

Un plan factoriel complet est un plan pour lequel toutes les combinaisons possibles aux limites du domaine d'étude auront été réalisées : c'est le nombre maximal d'essais pour un plan d'expériences factoriel [60].

L'objectif de ce plan est d'analyser l'influence de différentes combinaisons de niveaux de fonction de mélange dans les paramètres de coupe (ap , Vc et f). Ces niveaux sont présentés dans le *tableau. II.4.*

Tableau. II.4. Matrice de planification pour un plan factoriel complet (L27).

N° d'essais	Paramètres d'usinage		
	V_c , m/min	f , mm/tr	a_p , mm
1	314	0,08	1
2	314	0,08	2
3	314	0,08	3
4	314	0,16	1
5	314	0,16	2
6	314	0,16	3
7	314	0,24	1
8	314	0,24	2
9	314	0,24	3
10	440	0,08	1
11	440	0,08	2
12	440	0,08	3
13	440	0,16	1
14	440	0,16	2
15	440	0,16	3
16	440	0,24	1
17	440	0,24	2
18	440	0,24	3
19	628	0,08	1
20	628	0,08	2
21	628	0,08	3
22	628	0,16	1
23	628	0,16	2
24	628	0,16	3
25	628	0,24	1
26	628	0,24	2
27	628	0,24	3

II.4.5.2. Plan de Taguchi L16

Nous avons trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur à quatre niveaux de variation. Nous avons alors : $N=4^3=64$, mais nous allons travailler dans cette étude seulement avec un plan de 16 essais qui représente un plan de Taguchi (L16), car il minimise les essais.

Les essais ont été numérotés de 1 à 16. 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.5*.

Tableau II.5. Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L16).

N° d'essais	Paramètres d'usinage		
	V_c , m/min	f , mm/tr	ap , mm
1	0,5	0,08	220
2	0,5	0,12	310
3	0,5	0,16	440
4	0,5	0,2	500
5	1	0,08	310
6	1	0,12	220
7	1	0,16	500
8	1	0,2	440
9	1,5	0,08	440
10	1,5	0,12	500
11	1,5	0,16	220
12	1,5	0,2	310
13	2	0,08	500
14	2	0,12	440
15	2	0,16	310
16	2	0,2	220

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos travaux. Les caractéristiques des matériaux de coupe, les instruments de mesure utilisés, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées. Dans le chapitre III qui suit, nous présenterons une étude sur l'usinabilité du Polyoxyméthylène, usiné par une plaquette de coupe en carbure métallique SCMN 12 04 08 (K10) en termes de rugosité de surface, des efforts de coupe, la puissance de coupe, la productivité (débit du copeau enlevé) et la température de coupe.

Chapitre III

Etude de l'usinabilité du Polyoxyméthylène POM C

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats des essais paramétriques. L'intérêt de ces essais est d'étudier et comprendre l'usinabilité du Polyoxyméthylène (POMC) et de définir le domaine de fonctionnement adéquat du couple outil-matière. Les essais sont donc réalisés afin de déterminer le comportement des paramètres technologiques qui sont : les composantes de la rugosité de surface, les efforts de coupe, la puissance de coupe et la pression spécifique et cela en fonction de la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de passe (ap) et l'avance de l'outil (f). Nous présentons aussi les résultats de l'influence de la lubrification et l'angle de direction principale de l'outil (χ_r) sur les paramètres technologiques d'usinage du POMC.

En dernier lieu, nous présentons les résultats de l'influence des conditions de coupe sur la température dans la zone de coupe. En conséquence, les résultats obtenus nous permettent de définir les limites de bon fonctionnement du couple outil-matière.

III.2. Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface

La *figure III.1* illustre l'évolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap).

a. Effet de la vitesse de coupe

La *figure III.1(a)* expose les résultats de l'évolution des différents critères de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage du polymère POM C. Les essais ont été réalisés avec une avance et une profondeur de passe constantes ($f=0.12$ mm/tr et $ap=1$ mm). L'usinage est stable, il y a une légère diminution des différents critères de rugosité lorsque la vitesse de coupe augmente de 160 à 440 (m/min). Ce qui prouve que dans cet intervalle, la vitesse de coupe n'a pas d'influence significative sur la rugosité de surface. Dans la pratique, l'augmentation de la vitesse de coupe de 160 à 440 (m/min) diminue les différents critères de rugosité (R_a , R_q , R_z et R_t) respectivement de 11,11 % ; 14,74% ; 10 % et 17,36%. Notons aussi que pour une vitesse de 440 (m/min), les valeurs minimales des différents critères de la rugosité de surface sont : $R_a= 1,04$ (μm), $R_z=1,33$ (μm), $R_q=7,3$ (μm) et $R_t=8,09$ (μm). Des résultats comparables sur l'effet de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface ont été trouvés par [53] et [55] lors de l'usinage des polymères.

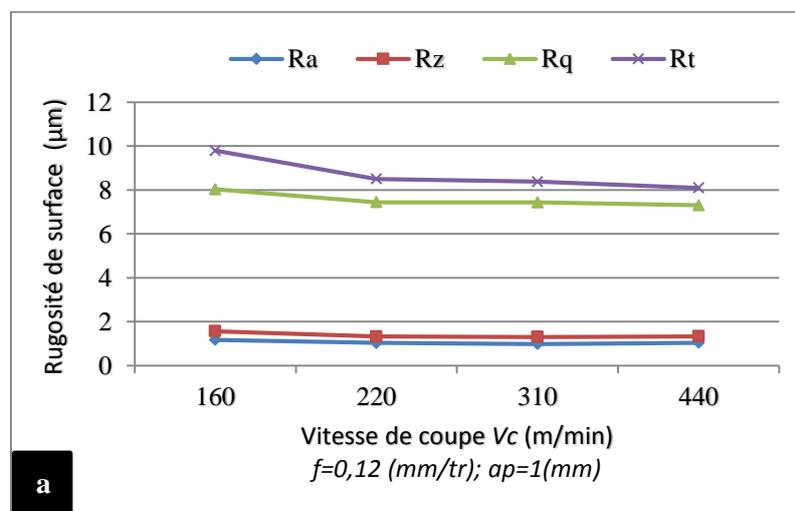
b. Effet de la profondeur de passe

La *figure III.1 (b)* illustre l'effet de la profondeur de passe sur la rugosité de surface. On peut facilement constater que la profondeur de passe (ap) ne joue pas un rôle déterminant sur

la qualité des surfaces usinées. Avec son augmentation on observe un léger accroissement des valeurs des critères de rugosité de surface. Sur le plan pratique, on peut dire que l'augmentation de la profondeur de passe de 0,5 à 3 (mm) fait augmenter les différents critères de rugosité Ra , Rz , Rq et Rt de (23,91% ; 15,58% ; 21,74% et 8,53%) respectivement. Cette constatation nous permet de dire que si on veut augmenter le débit de coupe enlevé et gardé la même rugosité on n'a qu'à augmenter la profondeur de passe car son influence est faible sur la rugosité de surface.

a. Effet de l'avance

La figure III.1(c) montre l'évolution des critères de rugosité de surface en fonction de l'avance par tour (f), les essais ont été réalisés avec une profondeur de passe et une vitesse de coupe $V_c=310$ (m/min). Il est à noter que l'état de la surface se détériore avec l'augmentation de l'avance et cette dégradation est significative au-delà de $f = 0,2$ (mm/tr). On peut expliquer cette dégradation de l'état de surface avec l'augmentation de l'avance par la formation des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons sont d'autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée. En pratique, les conséquences de l'influence de l'avance sur la rugosité de surface sont comme suit : l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,28 (mm/tr) induit une augmentation des critères de rugosité (Ra , Rz , Rq et Rt) de (341,30 ; 157,51 ; 320,35 et 147,63%) respectivement. On peut dire que l'effet de l'avance (f) est le plus important sur l'état de la surface usinée du polymère POM C. Des résultats comparables ont été trouvés par I. Asiltürk et H. Akkus [61] et S. Neseli et autres [62].



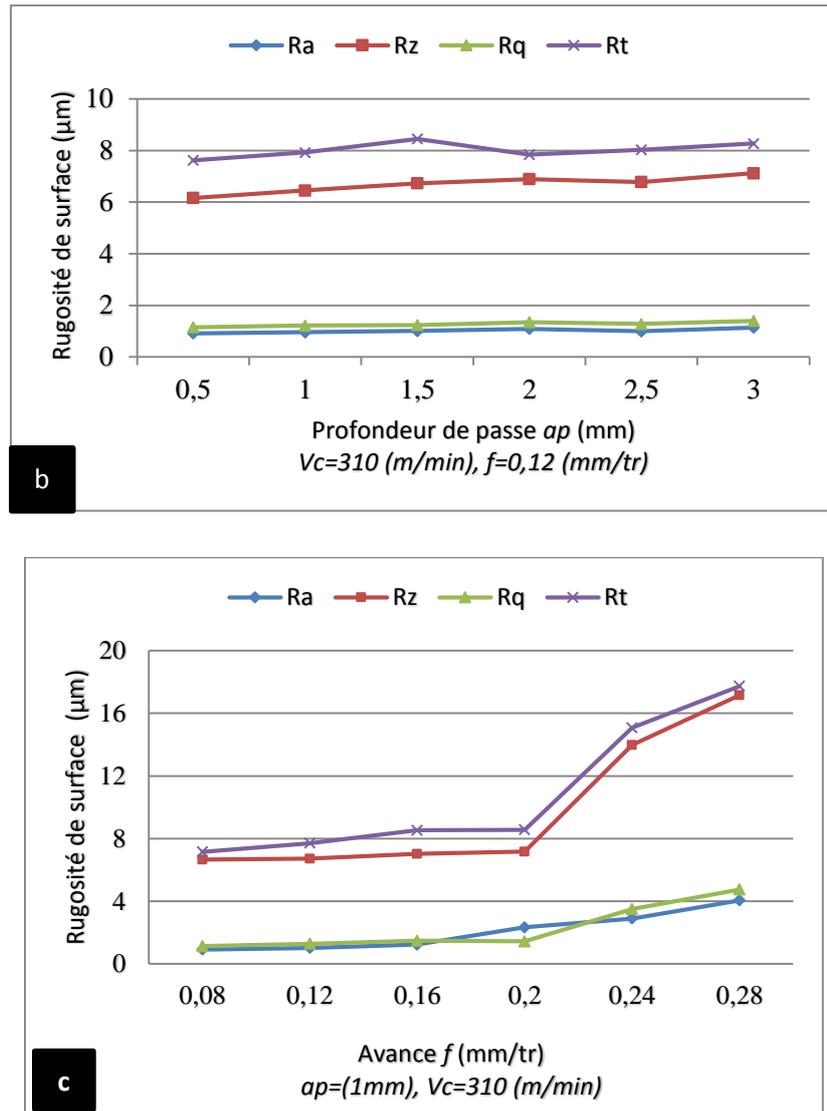


Figure III.1. Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface.

III.3. Effet des conditions de coupe sur les efforts de coupe

a. Effet de la vitesse de coupe

Les résultats obtenus sur *la figure (III.2.a)* illustrent l'évolution des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) en fonction de la vitesse de coupe, pour une profondeur de passe $a_p=1$ (mm) et une avance $f=0,12$ (mm/tr). L'analyse des résultats montre une diminution des trois composantes en fonction de l'augmentation de la vitesse de coupe. Lorsque V_c augmente de 160 à 440 (m/min), les trois composantes (F_x , F_y et F_z) diminuent respectivement de 40,73% ; 53,97% et 23,75%. Ceci est dû à l'augmentation de la température dans la zone de coupe lorsque la vitesse de coupe augmente, ce qui rend le matériau plus plastique et facile à usiner [63]. Des résultats similaires

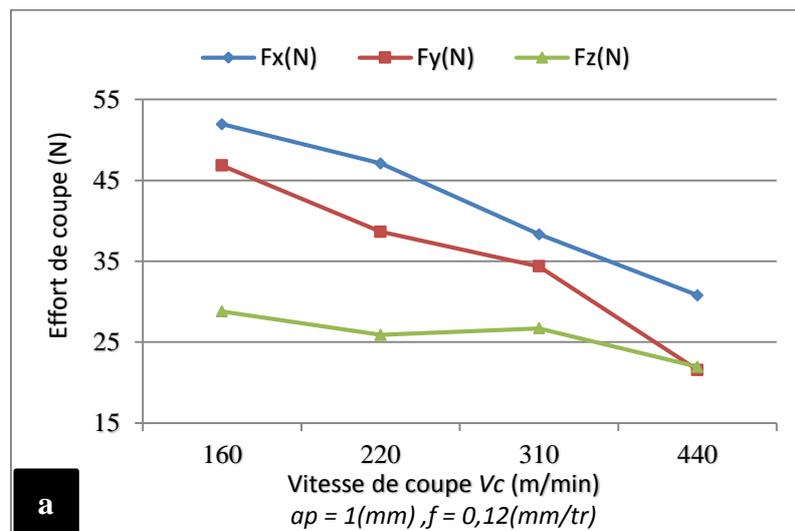
ont été trouvés par M. Kaddeche et autres [51] lors de l'usinage du polyéthylène à haute densité (HDPE).

b. Effet de la profondeur de passe

La figure (III.2.b) illustre l'évolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de passe (ap) lors de l'usinage du POM C. On note que lorsque la profondeur de passe (ap) augmente de 0,5 à 3 (mm), les trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) augmentent aussi de 523,66% ; 368,61% et 250,77% respectivement. Ceci est expliqué par l'épaisseur de copeaux enlevée qui devient très importante, ce qui provoque une augmentation du volume de matériau déformé et nécessite des efforts de coupe importantes [63, 64]. On remarque aussi que la valeur maximale de l'effort (F_x) n'a pas dépassé 100 (N) pour une profondeur de passe $ap=3$ (mm). D'autre part, la composante axiale (F_x) est la plus influencée par l'augmentation de la profondeur de passe (ap).

c. Effet de l'avance

La figure (III.2.c) présente l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) en fonction de l'avance par tour à $V_c=310$ (m/min) et $ap=1$ (mm). On remarque que les efforts de coupe sont influencés par l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la section du copeau, induisant ainsi à l'augmentation de l'effort nécessaire à son arrachement. Pratiquement une augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 (mm/tr) fait augmenter la composante tangentielle de l'effort de coupe (F_z) de 460,97%, les deux autres composant (F_x) et (F_y) de (11,43% et 41,66%) successivement.



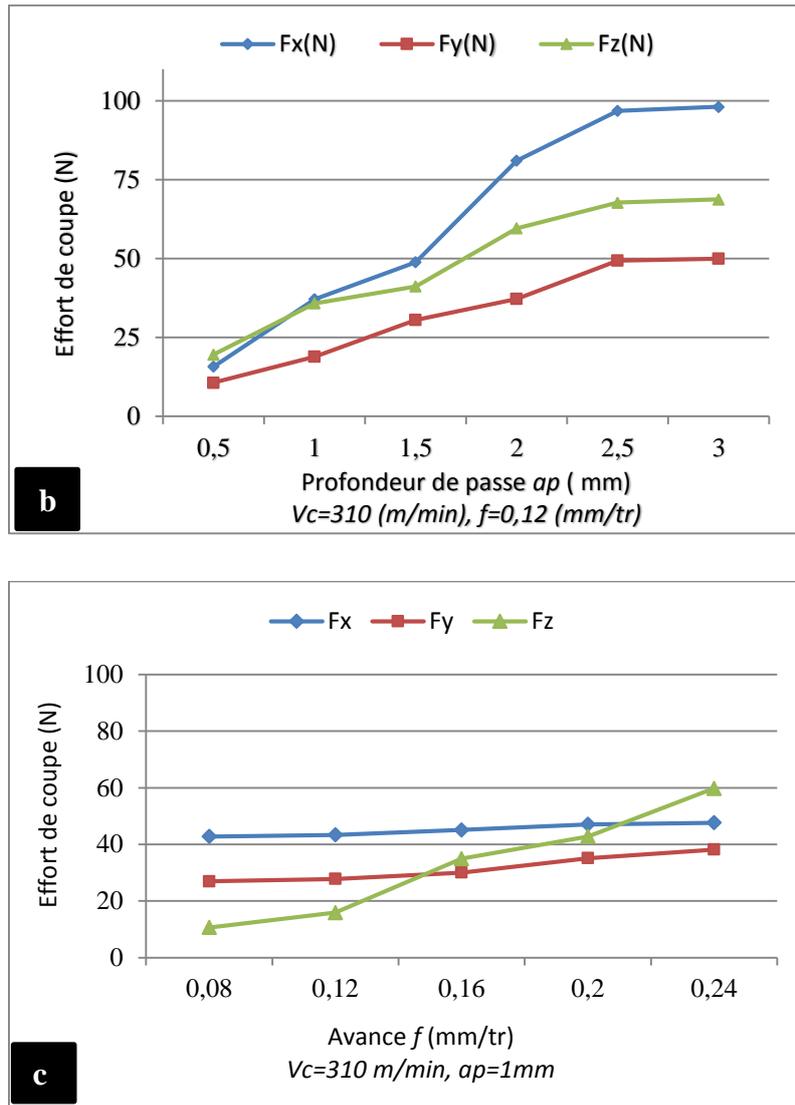


Figure III.2. Effet des paramètres de coupe sur l'effort de coupe.

III.4. Effet des conditions de coupe sur l'effort spécifique de coupe (pression de coupe) (K_s)

L'effort spécifique de coupe, aussi appelée la pression de coupe, est une grandeur définie comme étant l'effort de coupe par unité de surface :

$$K_s = \frac{F_z}{S} \quad \text{et} \quad S = a_p \times f \Rightarrow K_s = \frac{F_z}{a_p \times f} \tag{III.1}$$

Ou : K_s : la pression de coupe (MPa), F_z : Effort de coupe tangentiel (N), f : avance par tour (mm/tr) et a_p : profondeur de passe (mm).

Le calcul de cette pression est d'un intérêt majeur pour la détermination du domaine de bon fonctionnement du couple outil-matière.

a. Effet de la vitesse de coupe

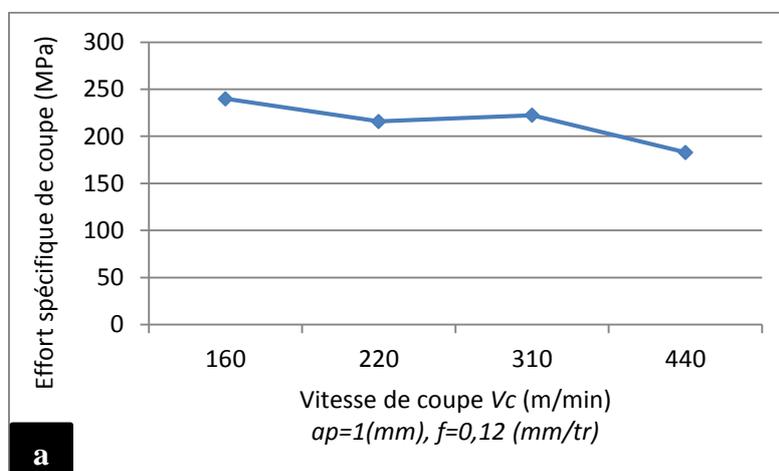
La figure (III.3.a) présente l'effet de la vitesse de coupe sur l'effort spécifique de coupe. On peut remarquer que l'effort spécifique de coupe diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe, cela peut être expliqué par les hautes températures générées pendant l'opération de l'usinage et qui entraînent un ramollissement de la matière à l'interface pièce - outil-copeau et par conséquent une diminution de l'effort spécifique de coupe. Sur le plan pratique une élévation de la vitesse de coupe de 160 à 440 (m/min) conduit à une diminution de l'effort spécifique de (23,75%), ce qui est bien pour l'arête de coupe de l'outil.

b. Effet de l'avance

La figure (III.3.b) montre l'évolution de l'effort spécifique de coupe en fonction de l'avance. On peut noter que l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 (mm/tr) induit une diminution de l'effort spécifique de coupe de 66,67%. Donc plus l'avance (f) augmente plus l'effort spécifique de coupe (K_s) diminue ce qui est bon pour l'arête de l'outil de coupe. Mais, en même temps l'élévation de l'avance (f) conduit aussi à l'élévation de la rugosité de surface. Par conséquent il faut trouver un compromis entre la diminution de l'effort spécifique de coupe et l'augmentation de la rugosité de surface lors du tournage du POM C.

c. Effet de la profondeur de passe

La figure (III.3.c) illustre l'évolution de l'effort spécifique de coupe en fonction de la profondeur de passe. D'après cette figure il est clair que l'augmentation de la profondeur de passe conduit à une diminution de l'effort spécifique de coupe de 83,33%, lorsque la profondeur de passe (ap) passe de 0,5 à 3 (mm). Cela est profitable à l'arête tranchante de l'outil de coupe, et le risque de rupture de l'arête de coupe se minimise.



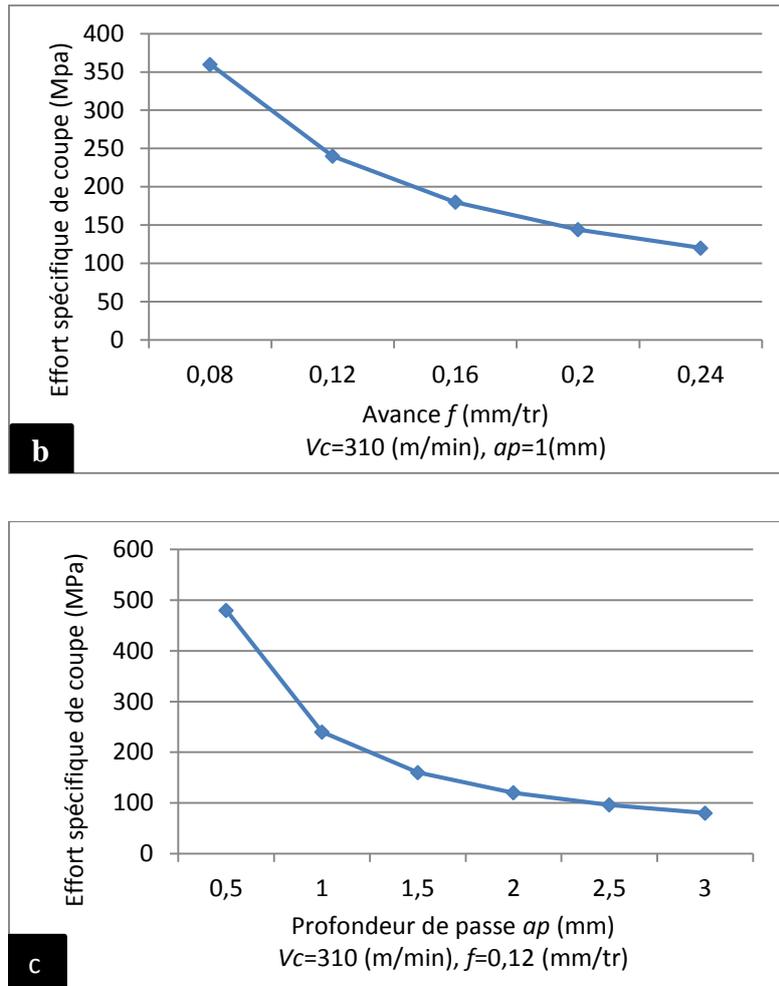


Figure III.3. Effet des paramètres de coupe sur l'effort spécifique (K_s)

a) effet de (V_c), b) effet de (f) et c) effet de (a_p).

III.5. Effet des conditions de coupe sur la puissance de coupe (P_c)

L'étude et l'évaluation des efforts de coupe générées en usinage permettent principalement de dimensionner les outils et les éléments de la machine-outil (porte-pièce, etc) et aussi pour évaluer la puissance de coupe et permettre le choix rationnel de la machine. La puissance de coupe est définie par la relation suivante :

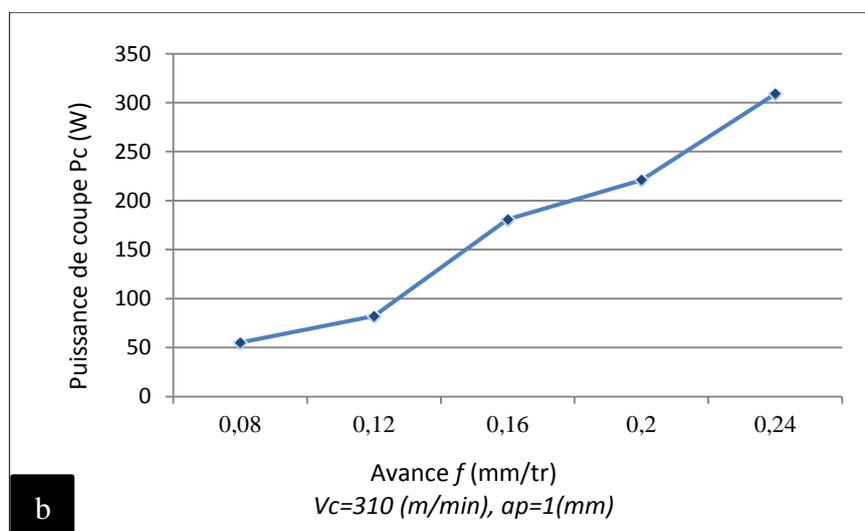
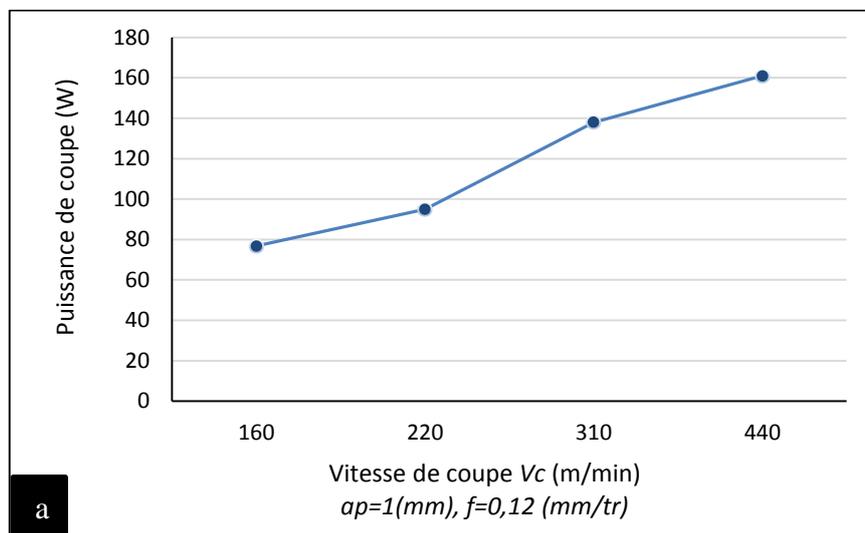
$$P_c = F_z \times V_c \Rightarrow P_c = \frac{K_s \times a_p \times f \times V_c}{60} \quad (W) \quad (\text{III.2})$$

Tel que : V_c : la vitesse de coupe (m/min), a_p : la profondeur de passe (mm), f : l'avance (mm/tr) et K_s : effort spécifique de coupe (N/mm²).

La figure III.4. (a, b et c) présente l'effet des paramètres de coupe sur la puissance de coupe. D'après ces figures on peut remarquer qu'une augmentation des différents paramètres

de coupe (V_c , f et ap) conduit à une augmentation de la puissance de coupe (P_c). Une augmentation de la vitesse de coupe de 160 à 440 (m/min) fait augmenter la puissance de coupe jusqu'au 109,64% (**figure III.4.a**). D'autre part l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 (mm/tr) (**figure III.4.b**), fait augmenter la puissance de coupe jusqu'au 460,95%, cela est dû à l'augmentation de la section du copeau, ce qui implique une résistance à la rupture et des forces plus importantes pour l'opération d'enlèvement de copeaux et cela a pour conséquence une augmentation de la puissance de coupe.

La (figure III.3.c) indique qu'une croissance de la profondeur de passe de 0,5 à 3 (mm) conduit à une augmentation de puissance de 500 %, on remarque que la courbe de la puissance en fonction de la profondeur de passe (ap) est linéaire ce qui implique que la profondeur de passe influe d'une manière significative sur la puissance de coupe (P_c).



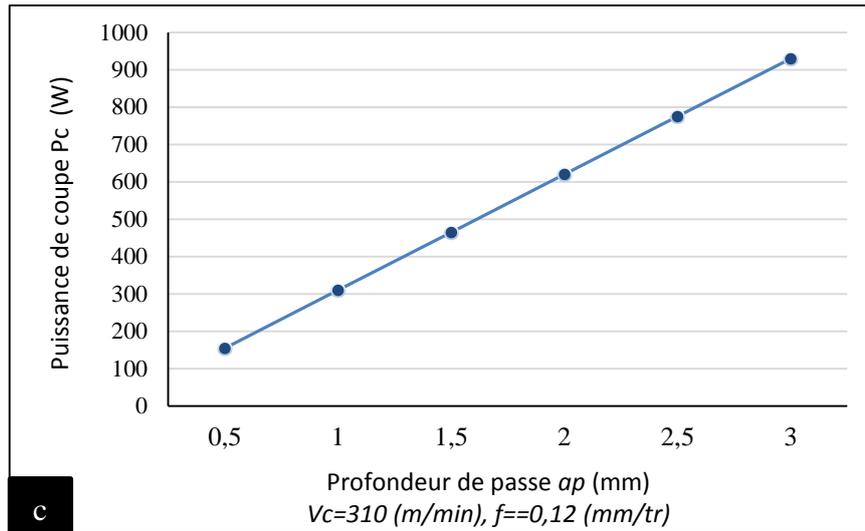


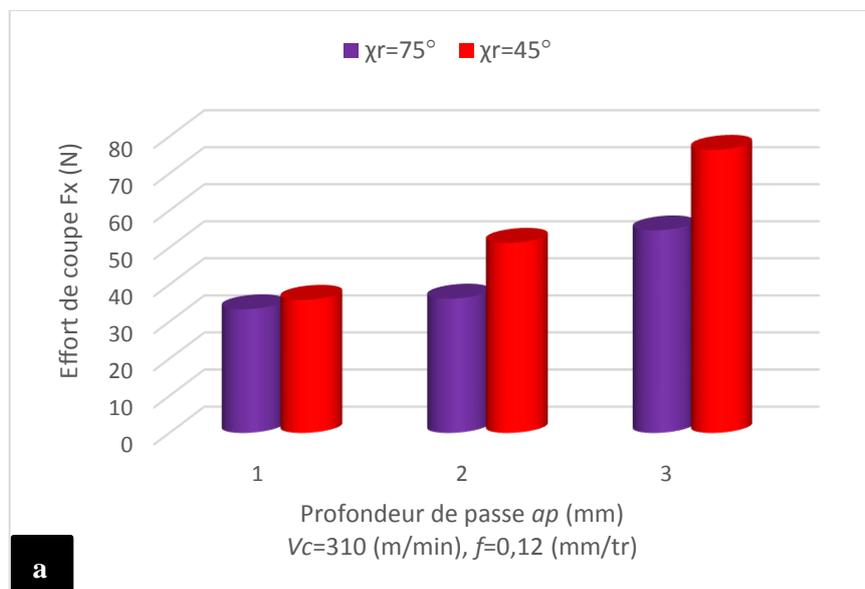
Figure III.4. Influence des paramètres de coupe sur la puissance de coupe
a) effet de (V_c), b) effet de (f) et c) effet de (ap).

III.6. Influence de la géométrie de l'outil

III.6.1. Influence de l'angle de direction principale sur les efforts de coupe

Afin d'étudier l'effet de l'angle de direction de l'outil sur les efforts de coupe lors de tournage du POMC, nous avons réalisé une série d'expériences avec deux types d'outils, l'un avec un angle de direction principale $\chi_r=45^\circ$ et l'autre outil avec $\chi_r=75^\circ$.

La figure III.5 (a, b et c) indique la variation des composantes des trois composantes de l'effort de coupe F_x , F_y et F_z en fonction de la profondeur de passe en utilisant les deux outils avec les différents angles de direction ($\chi_r=45^\circ$, $\chi_r=75^\circ$) à $V_c=310$ (m/min) et $f=0,12$ (mm/tr).



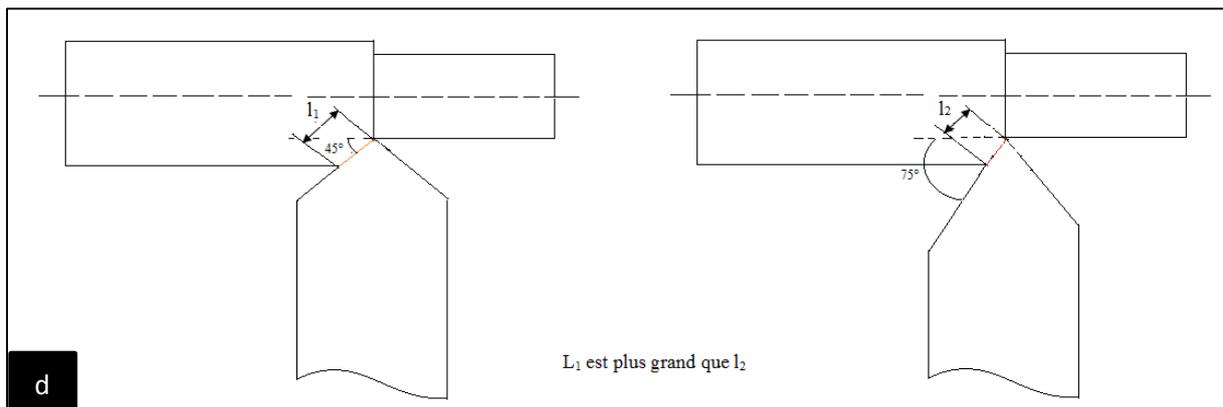
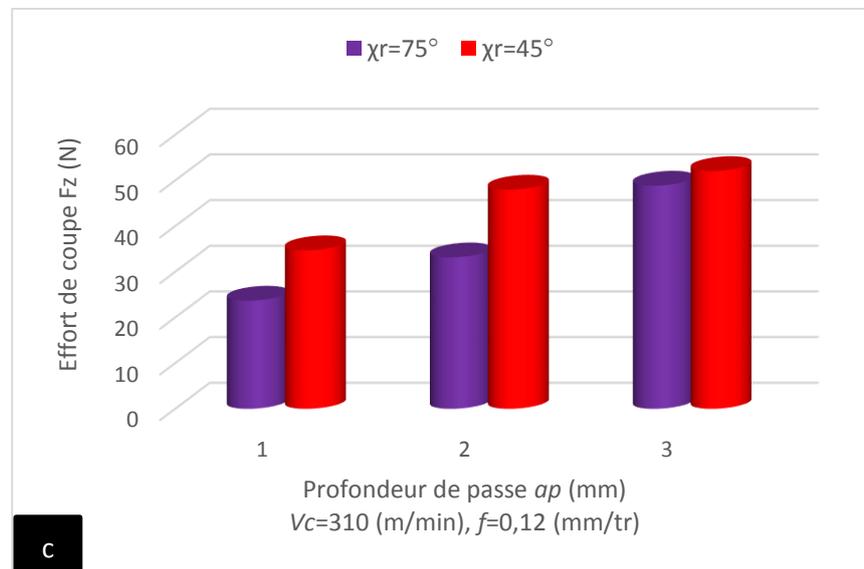
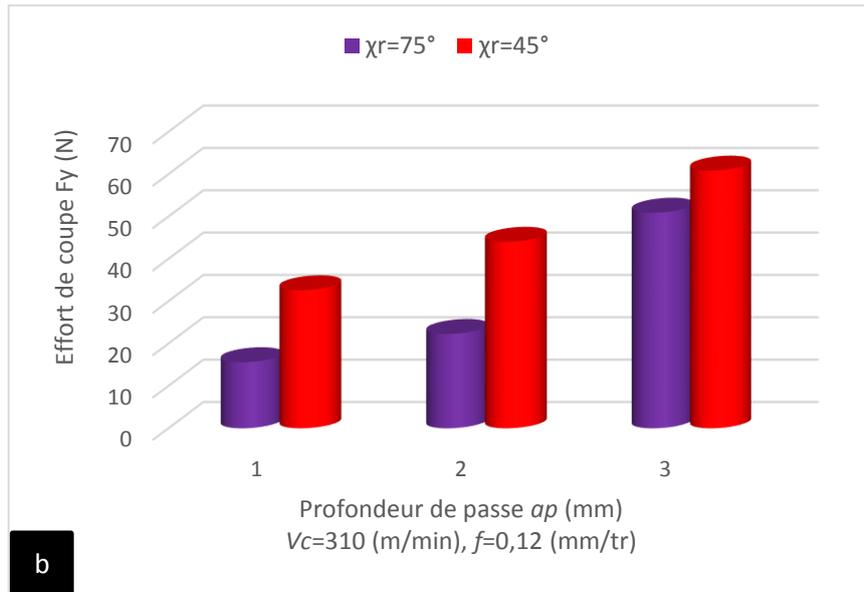


Figure III.5. Effet de l'angle de direction de l'outil de coupe sur l'effort de coupe

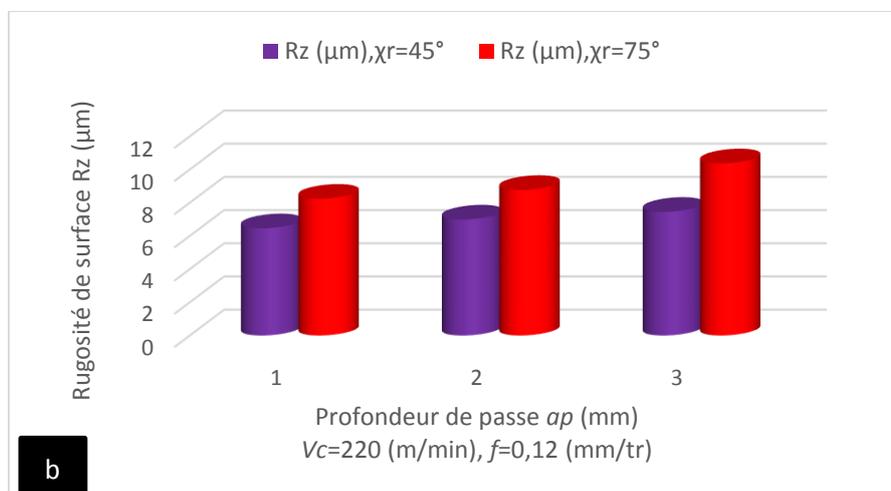
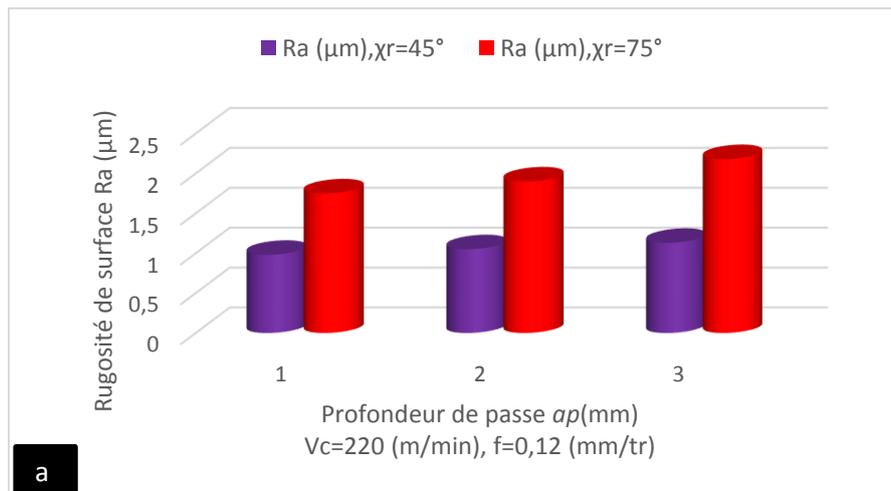
a) effet de (V_c), b) effet de (f) et c) effet de (ap) d) effet de (χ_r) sur l .

L'analyse des résultats nous permet de conclure qu'avec l'augmentation de l'angle de direction principale, les composantes des efforts de coupe se trouvent alors diminuées. Cela est dû à la surface de contact de l'outil de coupe avec la pièce à usiner. Avec la diminution de l'angle de direction à 45° , la longueur de l'arête en contact avec la pièce augmente, ce qui a pour effet d'augmenter les efforts de coupe (*figure III.5.d*).

III.6.2. Influence de l'angle de direction principale sur la rugosité de surface

a. Effet de la profondeur de passe

La *figure III.6. (a, b, c et d)* exprime l'influence de la profondeur de passe sur les différents critères de la rugosité de surface tels que Ra , Rz , Rq et Rt en utilisant deux outils avec les deux différents angles de direction ($\chi_r = 45^\circ$, $\chi_r = 75^\circ$). On peut constater clairement que la rugosité de surface est plus petite en utilisant un outil de coupe avec l'angle de direction ($\chi_r=45^\circ$) que celui avec ($\chi_r=75^\circ$), cela peut être expliqué par l'augmentation de la longueur de la surface de contact entre l'outil de coupe et la pièce à usinée.



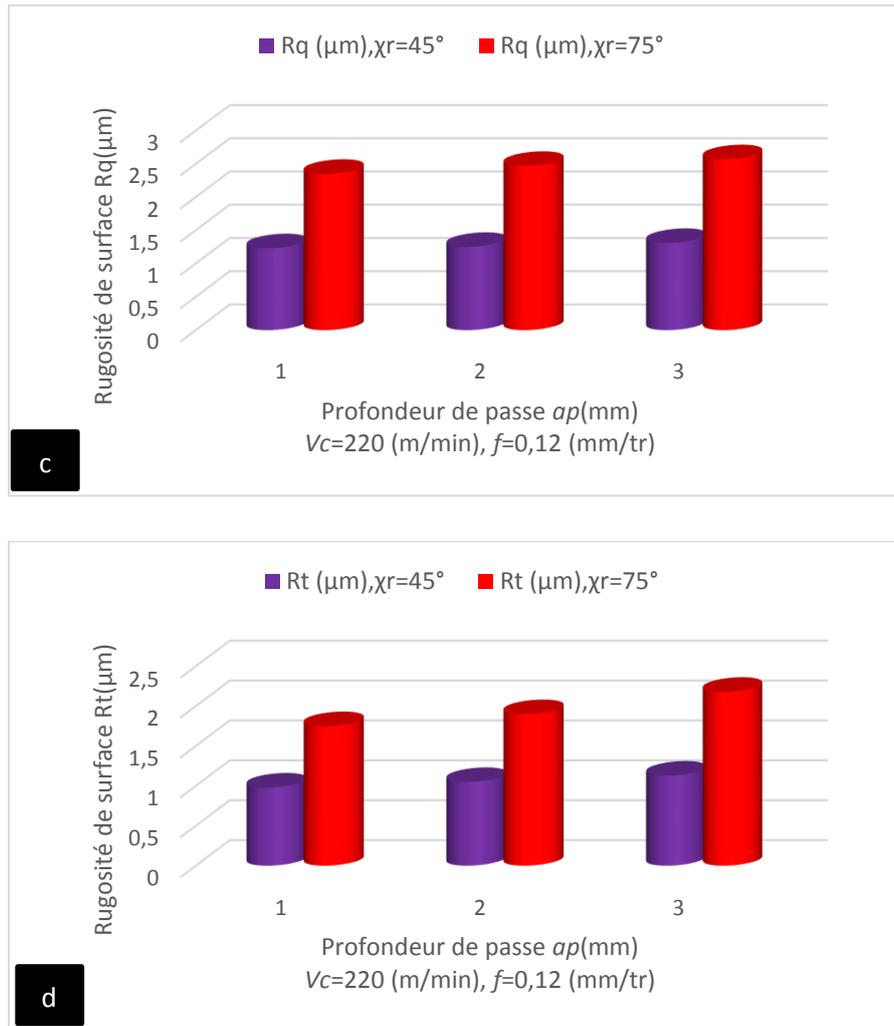
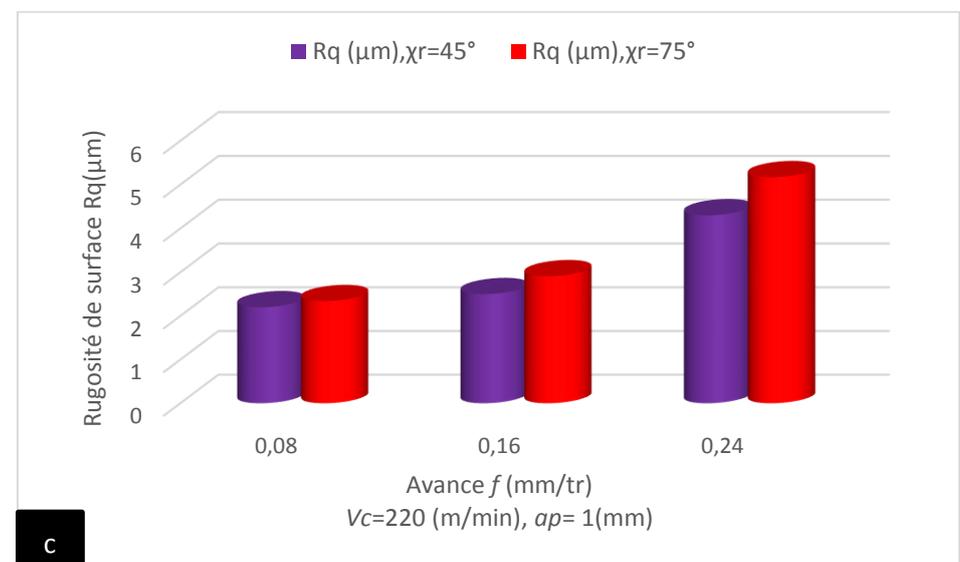
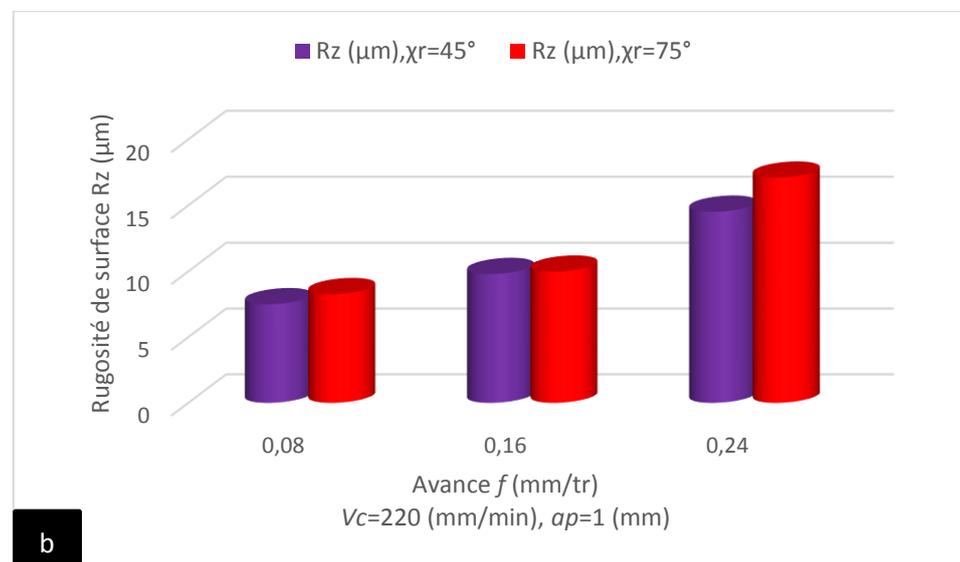
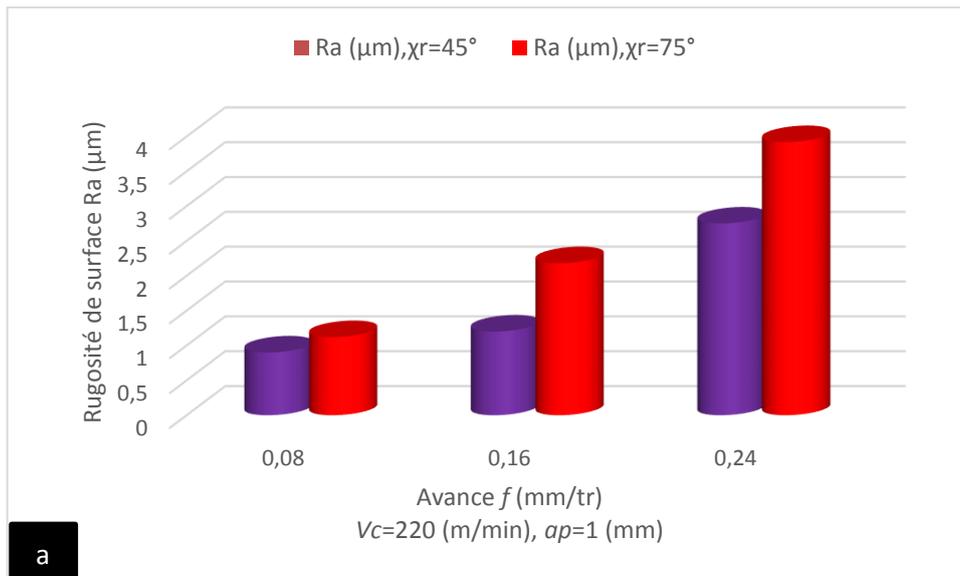
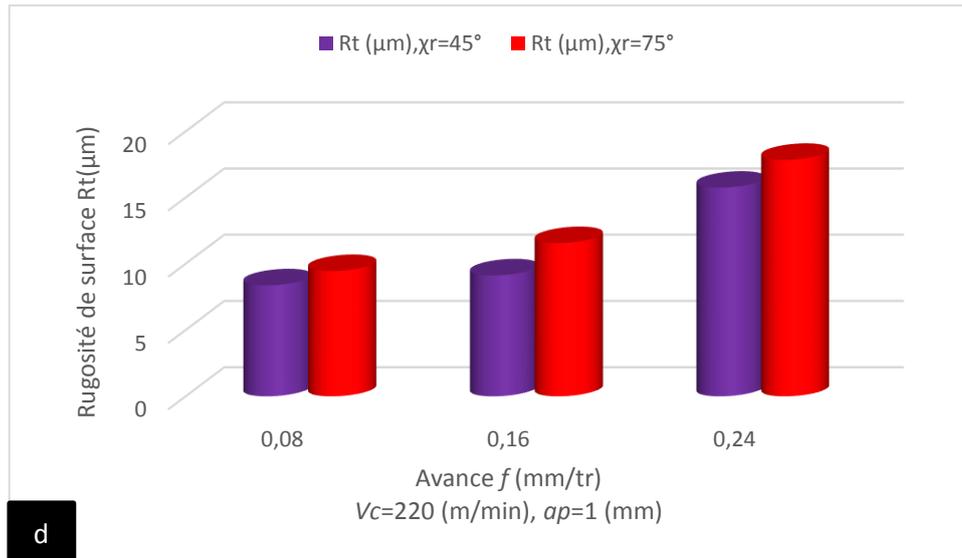


Figure III.6. Effet de la profondeur de passe sur la rugosité de surface **a)** effet sur (R_a) ; **b)** effet sur (R_z) ; **c)** effet sur (R_q) et **d)** effet sur (R_t).

b. Effet de l'avance

Les résultats représentés dans *les figures III.7 (a, b, et d)* montrent d'une part que les critères de la rugosité de surface (R_a , R_z , R_q et R_t) obtenue par les deux différents types des outils de coupe ($\chi_r=45^\circ$, $\chi_r=75^\circ$) sont influencés par l'augmentation de l'avance ce qui confirme les résultats obtenus et représentés dans la *(figure III.1.c)*. D'autre part, on peut remarquer aussi que les rugosités de surfaces obtenues avec un angle de direction de 45° sont meilleures que les rugosités de surface obtenues avec l'outil qui a l'angle de direction de 75° .





III.7. Effet de l'avance sur la rugosité de surface

a) effet sur (Ra) ; b) effet sur (Rz) ; c) effet sur (Rq) et d) effet sur (Rt).

III.7. Effet de la lubrification sur l'usinabilité du Polyoxyméthylène (POMC)

Généralement lors de l'usinage, la formation de copeaux est toujours accompagnée d'un dégagement de chaleur dû au frottement du copeau glissant sur la face de coupe et au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil. Ce dégagement de chaleur provoque une augmentation de la température de la pièce et de l'outil. C'est pour cela que la lubrification permet de changer le coefficient de frottement entre deux pièces afin de faciliter le glissement entre elles ainsi que d'éviter ou de minimiser l'usure et les échauffements [65].

III.7.1. Usinage en utilisant un outil de coupe avec $\chi_r = 45^\circ$

a. Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe

La figure III.8. (a, b et c) illustre l'effet de la profondeur de passe sur les trois composantes de l'effort de coupe pour un travail sec et l'autre lubrifié. L'analyse des résultats montre que l'usinage avec lubrification génère une diminution des trois composants de l'effort de coupe et cela est dû à la diminution des frottements entre l'outil et la pièce. Lorsqu'on passe de l'usinage à sec à l'usinage lubrifié et pour les valeurs de la profondeur de passe (ap) de 1, 2 et 3 (mm), l'effort (F_x) chute de (35,33 ; 14,93 et 18,76)% successivement et l'effort (F_y) chute de (37,20 ; 35,01 et 35,93)%, et l'effort (F_z) chute de (2,26 ; 2,02 et 11,00)%.

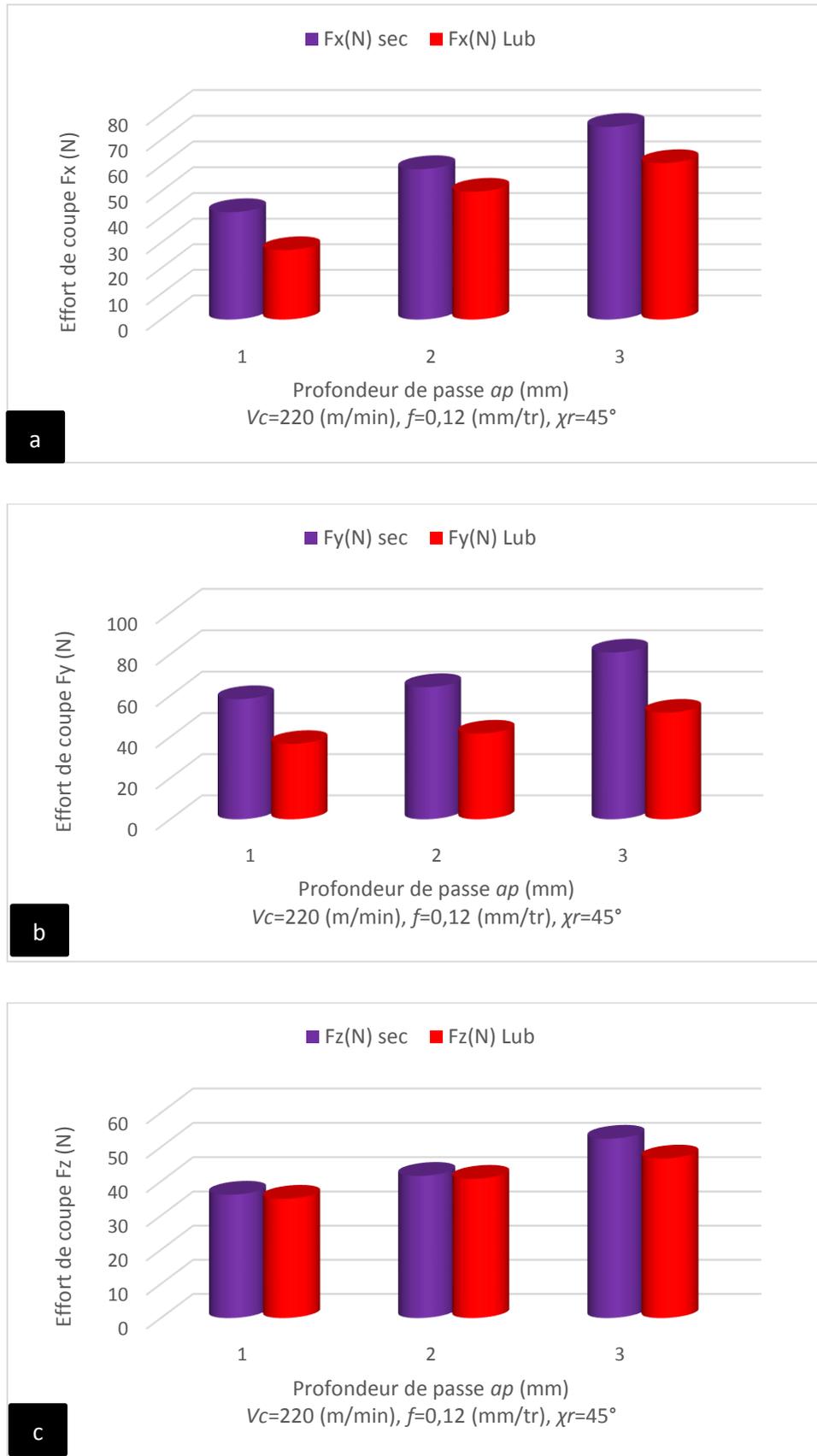
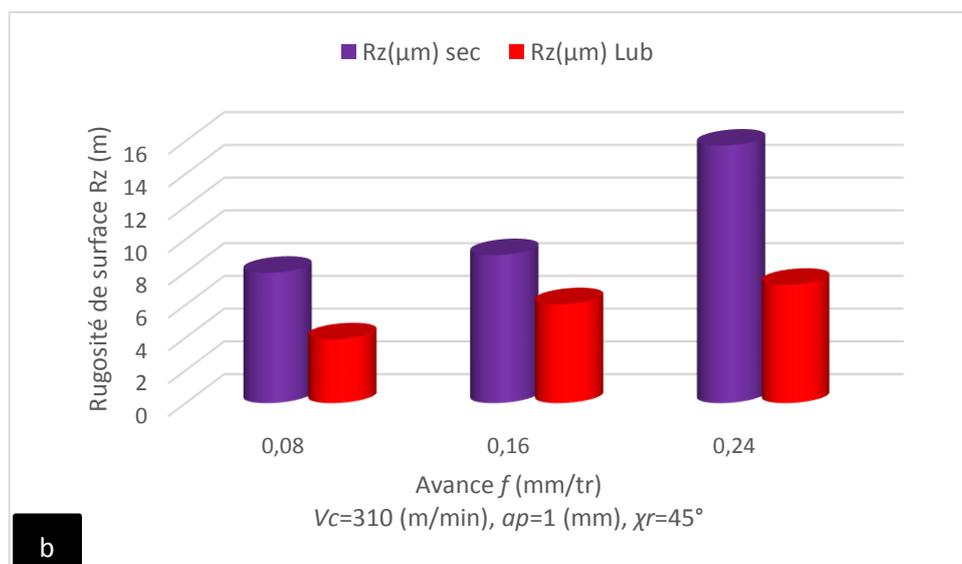
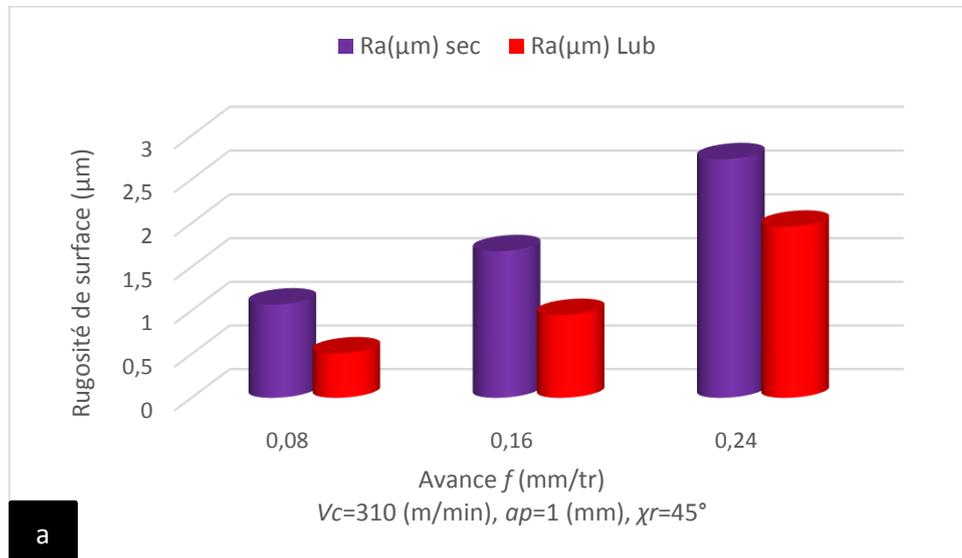


Figure III.8. Effet de la profondeur de passe sur l'effort de coupe en usinage à sec et lubrifié
a) effet sur (F_x) ; **b)** effet sur (F_y) et **c)** effet sur (F_z).

b. Effet de l'avance (f) sur la rugosité de surface

La figure III.9 (a, b, c et d) illustre l'effet de l'avance par tour sur la rugosité de surface pour les deux cas d'usinage du POM C, à sec et lubrifié. On remarque l'utilisation du liquide lubrifiant facilite l'écoulement du copeau et fait diminuer les frottements ce qui implique un état de surface meilleur que celui à sec. Sur le plan pratique, l'utilisation du lubrifiant fait diminuer les différents critères de la rugosité de surface de la manière suivante : Ra chute de (52,34 ; 43,45 et 28,21)%, Rz réduit de (51,01 ; 33,19 et 54,04)%, Rq chute de (43,90 ; 59,66 et 63,08)% et Rt de (48,14 ; 28,83 et 47,32)% pour $f = (0,08 ; 0,16$ et $0,24$ mm/tr) respectivement. Donc on peut conclure que la lubrification permet d'améliorer l'écoulement des copeaux et diminuer les risques d'arrachement, ce qui améliore la qualité de la surface usinée.



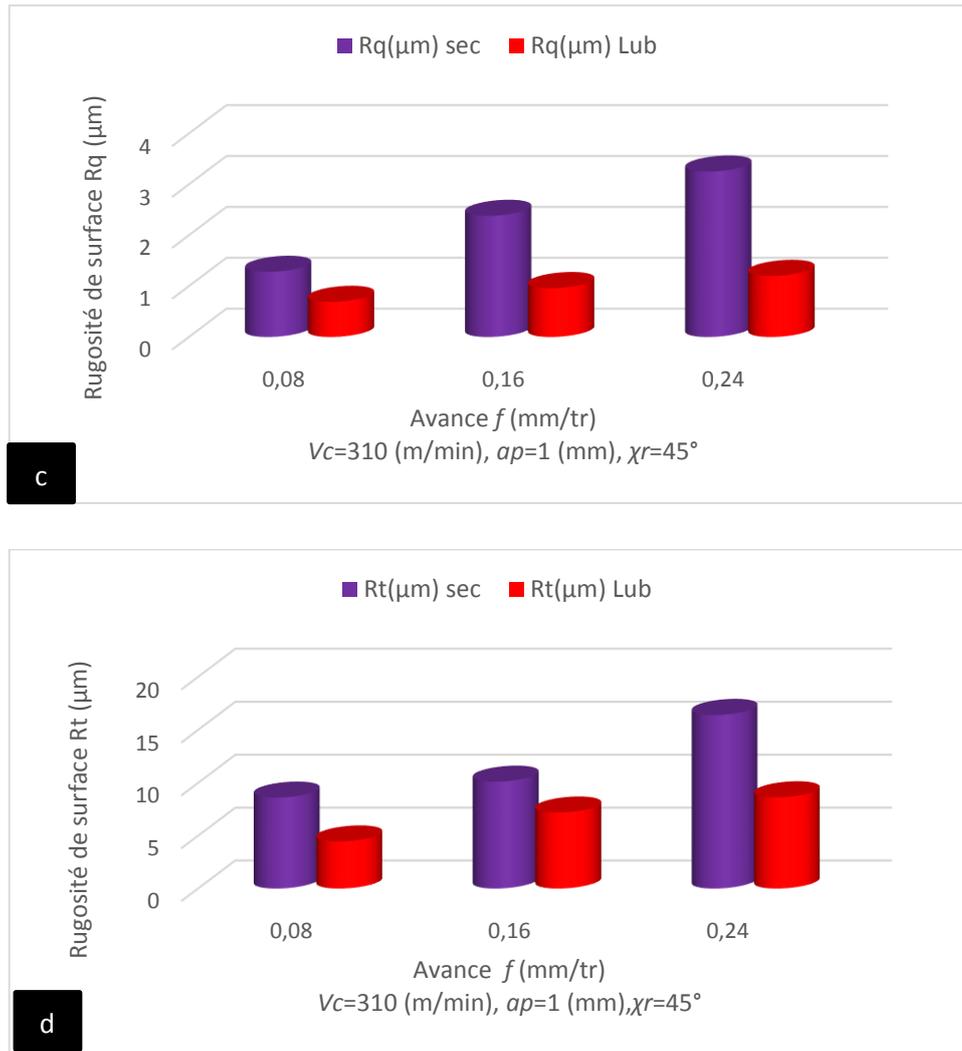


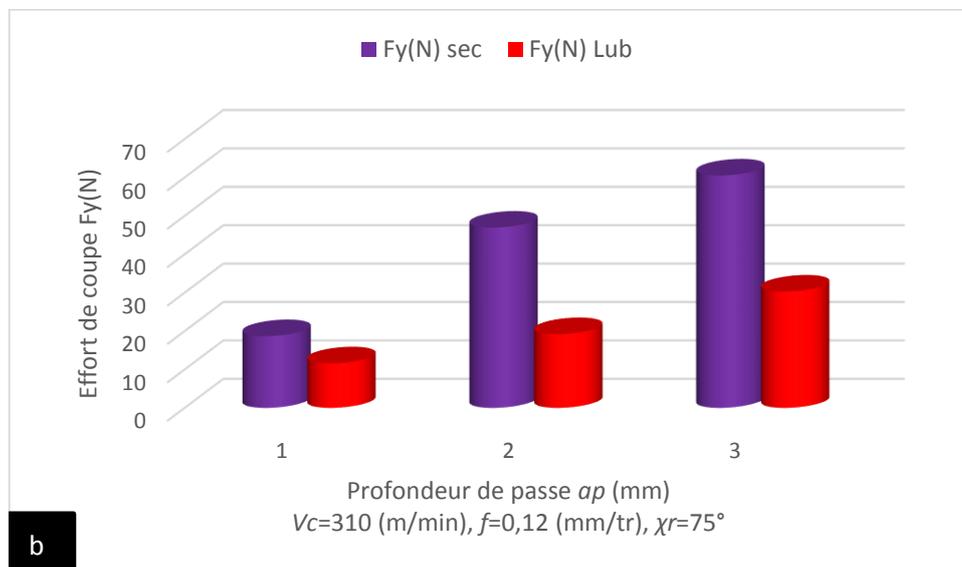
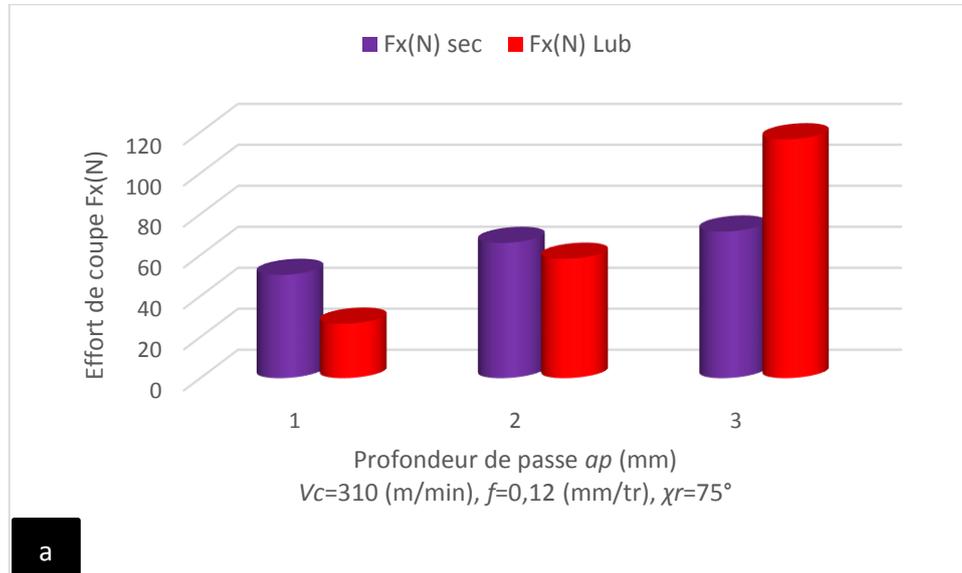
Figure III.9. Effet de l'avance sur la rugosité de surface pour un usinage à sec et lubrifié
a) effet sur (R_a) ; **b)** effet sur (R_z) ; **c)** effet sur (R_q) et **d)** effet sur (R_t).

III.7.2. Usinage en utilisant un outil de coupe avec $\chi_r = 75^\circ$

a. Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe

De la même manière nous avons répété les essais en utilisant cette fois-ci un outil de coupe avec l'angle de direction $\chi_r = 75^\circ$. La figure III. 10 (a, b et c) montre les résultats obtenus des essais réalisés sur le polymère POMC. On peut remarquer clairement que la lubrification fait diminuer les efforts de coupes et c'est la même tendance trouvée en utilisant un outil de coupe avec l'angle de $\chi_r = 45^\circ$. Pratiquement l'effort de coupe (F_x) diminue de (47,24 et 11,67)% pour les profondeurs de passe $a_p = 1$ et 2 (mm) respectivement et subit une augmentation de 62,92% pour la profondeur de passe $a_p = 3$ (mm). (F_y) chute de (37,97 ; 59,06 et 49,93)% et l'effort de coupe tangentiel (F_z) diminue de (35,98 ; 31,97 et 21,65)% pour des profondeurs de passe $a_p = (1, 2 \text{ et } 3)$ (mm) respectivement.

On peut expliquer cette chute par la diminution du frottement entre l'outil de coupe et la pièce à usiner, ce qui implique des efforts plus bas pour réaliser l'opération de l'enlèvement de la matière.



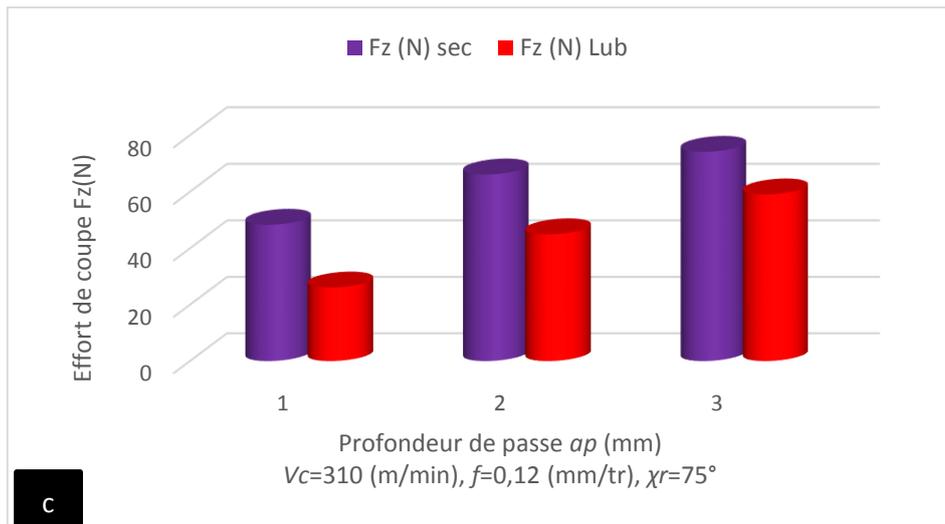
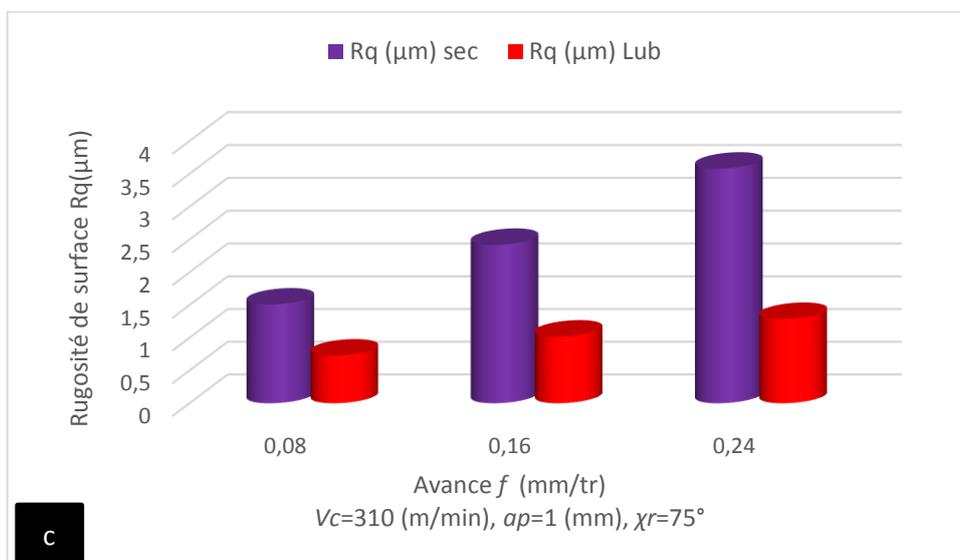
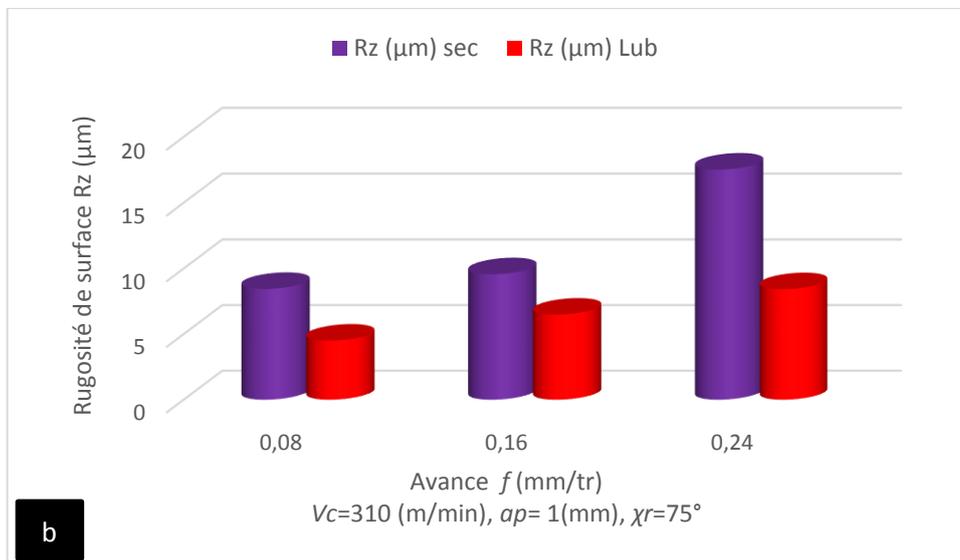
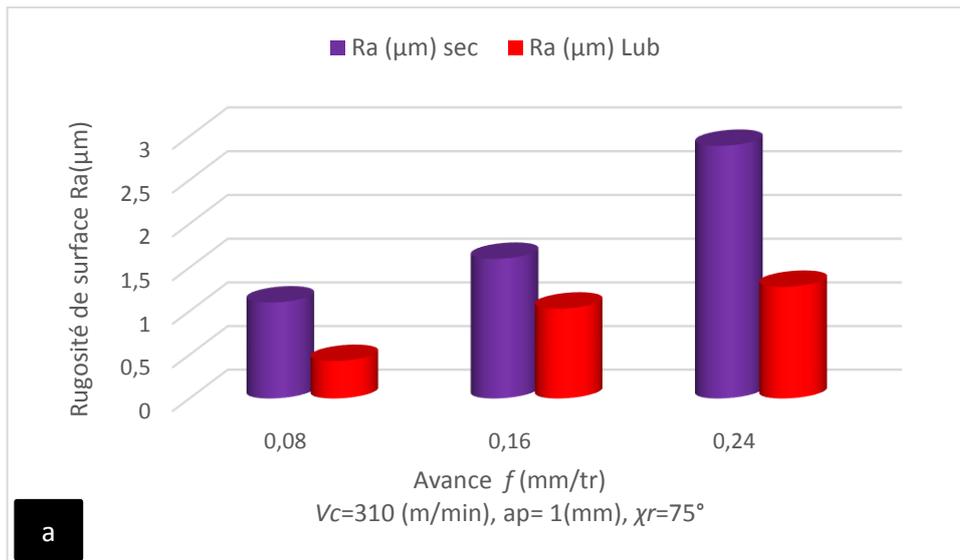


Figure III.10. Effet de la profondeur de passe sur l'effort de coupe

a) effet sur (F_x) ; **b)** effet sur (F_y) et **c)** effet sur (F_z).

b. Effet de l'avance sur la rugosité de surface

La **figure III.11 (a, b, c et d)** illustre la variation de la rugosité de surface en fonction de l'avance par tour pour un usinage à sec et avec lubrifiant. On remarque que la rugosité de surface de la pièce usinée diminue en utilisant un liquide lubrifiant d'une part et elle est minimale en utilisant l'outil de coupe avec $\chi_r = 45^\circ$ ce qui confirme les résultats trouvés dans le point (**III.6.2**). Cela est logique car le lubrifiant sert à diminuer le frottement entre la pièce et l'outil de coupe ce qui implique un état de surface meilleur que celui avec l'usinage à sec. Les différents critères de la rugosité de surface baissent de la manière suivante : R_a de (60,91 ; 35,63 et 55,71%), R_z de (46,63 ; 32,18 et 51,88)%, R_q chute de (51,66 ; 57,85 et 63,97)% et R_t diminue de (39,16 ; 20,32 et 11,25)% lorsque l'avance (f) varie de 0,08 ; 0,16 et 0,24 (mm/tr) respectivement.



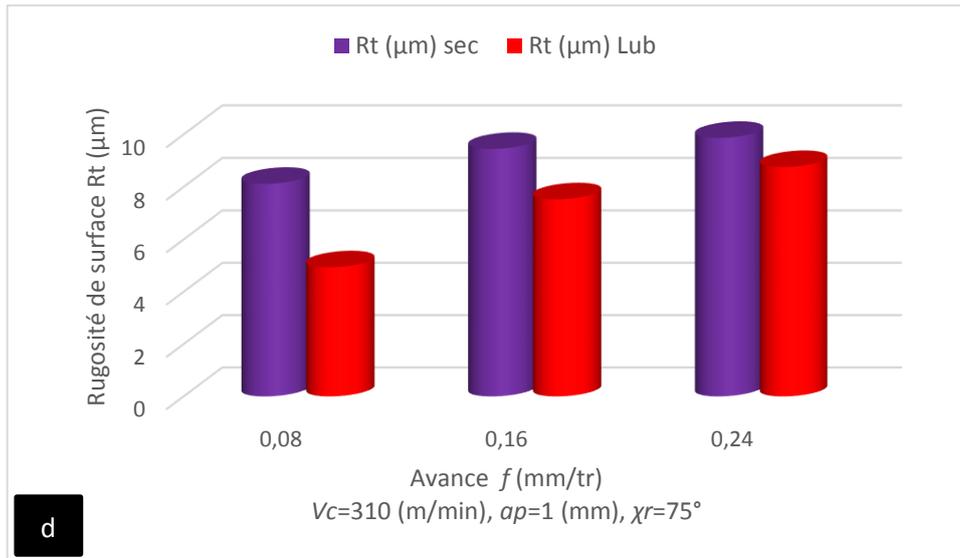


Figure III.11. Effet de l'avance par tour sur la rugosité de surface.

III.8. Effet des conditions de coupe sur la température de coupe

Afin d'étudier la variation de la température d'usinage en fonction des paramètres de coupe, on a réalisé des essais d'usinage sur le polymère POMC, la température ambiante été $T=16,1^\circ\text{C}$. Nous rappelons dans ce cadre que la température de coupe est mesurée à distance sans contact avec la pièce à l'aide d'un pyromètre à infrarouge modèle CAUTION 9U0401 donc c'est une mesure surfacique.

a. Effet de la vitesse de coupe

La **figure III.12** présente l'évolution de la température dans la zone de coupe en fonction de la vitesse de coupe (V_c) en fixant la profondeur de passe (a_p) et l'avance par tour (f) à 1 (mm) et 0,12 (mm/tr) respectivement.

En analysant les résultats obtenus, il est clair qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe la température croît d'une façon remarquable. Cet accroissement est dû à l'augmentation des frottements dans la zone de coupe. Sur le plan pratique, lorsque la vitesse de coupe croît de 220 (m/min) jusqu'au 440 (m/min), nous avons enregistré une augmentation de la température dans la zone de coupe de la manière suivante : ont utilisant un outil de coupe avec l'angle de direction $\chi_r=45^\circ$, l'accroissement de la température est de 23,63% par contre elle est de 12,71% avec l'outil de coupe avec l'angle de direction $\chi_r=75^\circ$.

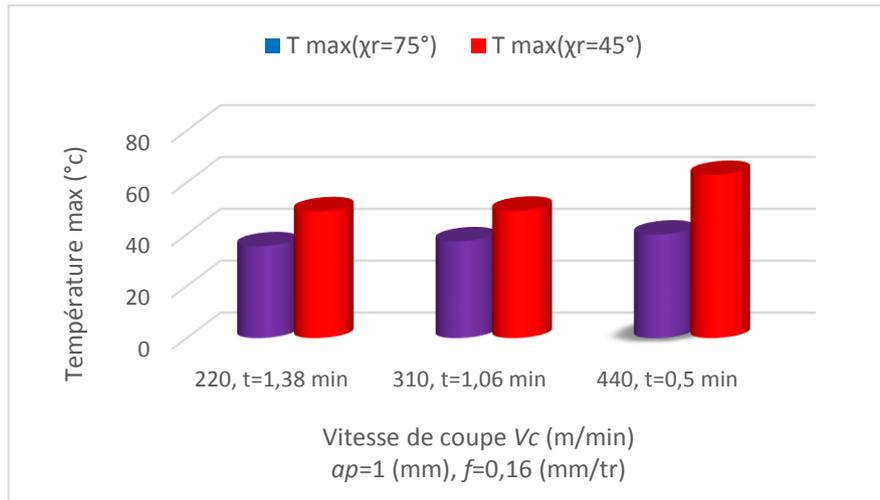


Figure III.12. Evolution de la température dans la zone de coupe en fonction de la vitesse de coupe.

b. Effet de la profondeur de passe

L'évaluation de la température en fonction de la profondeur de passe est présentée dans *la figure (III.13)*. Lorsque la profondeur de passe augmente de 1 jusqu'au 3 (mm), un accroissement de la température maximale dans la zone de coupe est observé. Cela est dû à l'augmentation des efforts de coupe lorsqu'on utilise des profondeurs de passe plus élevées. Cette augmentation est de 37,97% en utilisant l'outil de coupe avec l'angle de direction $\chi_r=75^\circ$, et de 42,77% de température lorsque l'angle de l'outil utilisé est $\chi_r=45^\circ$.

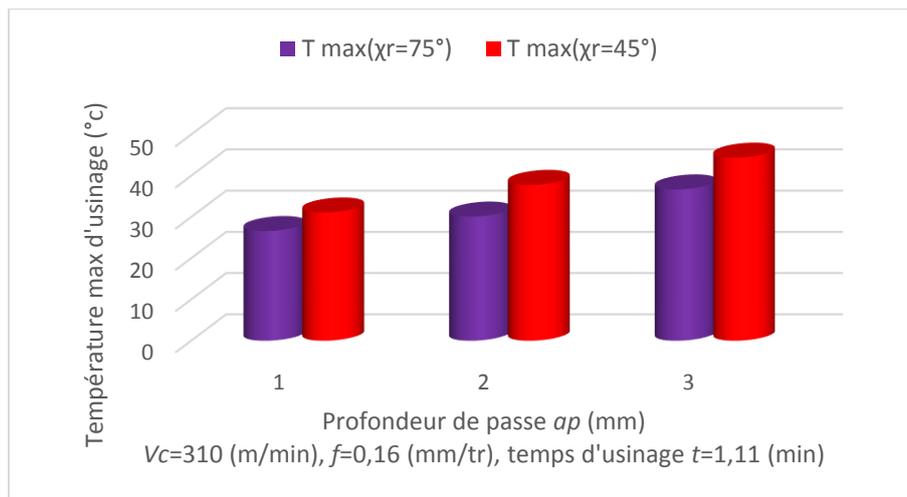


Figure III.13. Evolution de la température dans la zone de coupe en fonction de la profondeur de passe.

c. Effet de l'avance

La figure (III.14) expose les résultats obtenus pour voir l'influence de l'avance sur la température d'usinage. Il est clair que l'augmentation de l'avance de 0,08 jusqu'au 0,24 (mm/tr) conduit à une température maximale dans la zone de coupe, cela est expliqué par l'augmentation des efforts de coupe en utilisant des avances plus élevées, ce qui implique une augmentation de la température d'usinage de 5,97% en utilisant l'outil de coupe avec $\chi_r=75^\circ$ et de 9,83% en utilisant un outil de coupe avec un angle $\chi_r=45^\circ$.

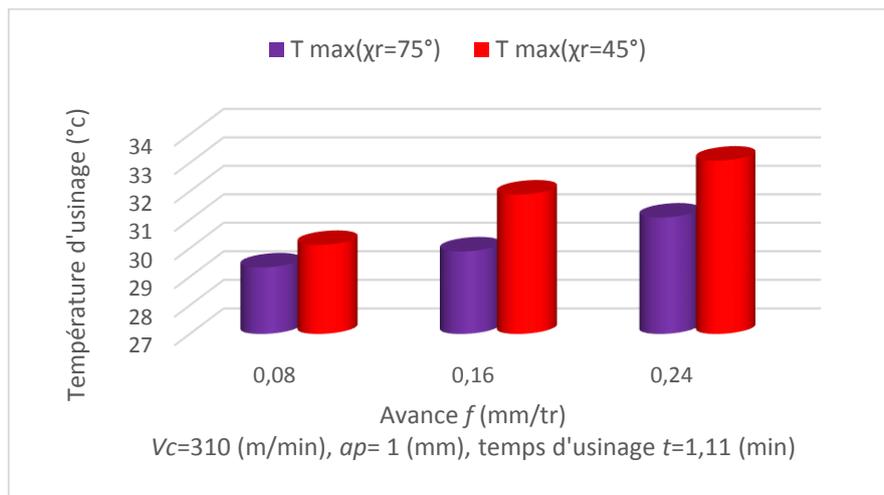


Figure III.14. Evolution de la température dans la zone de coupe en fonction de l'avance.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats des essais paramétriques lors du tournage du POMC. Il ressort de cette étude que l'effet de l'avance est le plus sensible sur l'état de la surface usinée, suivi par la profondeur de passe. La vitesse de coupe n'a pas d'influence sur les critères de la rugosité de surface. D'autre part, l'augmentation des paramètres d'usinage tel que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe fait augmenter la puissance de coupe. L'usinage du POMC avec lubrification fait diminuer les trois composants de l'effort de coupe, aussi la rugosité de surface diminue en utilisant un liquide lubrifiant.

L'utilisation de deux types d'outils de coupe avec deux différents angles de direction principale (45° et 75°) montre qu'avec l'augmentation de l'angle de direction principale, les composantes de l'effort de coupe se trouvent alors diminuées. La rugosité de surface diminue en utilisant l'outil de coupe qui a l'angle $\chi_r=45^\circ$ que celui avec le $\chi_r=75^\circ$.

Les résultats de la mesure de la température de coupe montrent que l'augmentation des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe) font augmenter la température dans la zone de coupe lors de l'usinage du POM C.

Chapitre IV

*Modélisation et optimisation
des paramètres technologiques
d'usinage du POM C*

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Cette dernière nous a permis le développement des modèles par régressions multiples de la rugosité arithmétique de surface (Ra), l'effort tangentiel de coupe (F_z), la puissance de coupe (P_c) et le débit du copeau enlevé (MRR). Ces réponses ont été mesurées lors du tournage du Polyoxyméthylène (POMC) par un outil de coupe en carbure métallique, dont les expériences ont été réalisées en variant la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de passe (ap) et l'avance par tour (f). Les résultats ont été traités statistiquement afin de proposer un régime de coupe optimal. Pour atteindre ces objectifs, nous avons utilisé l'analyse de la variance (ANOVA) qui a pour objectif de déterminer les facteurs et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, aussi pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques. Le but final de notre travail est d'optimiser les conditions de coupe en utilisant la fonction de désirabilité. Le traitement des résultats a été réalisé par un logiciel de statistique appelé «Design Expert 10».

IV.2. Modélisation des différents phénomènes de processus de coupe

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe tel que la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) sur les différents paramètres technologiques d'usinage étudiés : (effort de coupe, rugosité de surface, puissance de coupe et volume de copeau enlevé), nous avons dressé un plan factoriel complet (PFC) ; (3^3) pour les différents paramètres de sortie, ce qui nous donne 27 essais (**Tableau IV.1**). Le traitement des résultats expérimentaux obtenus, nous a permis de déterminer des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre les différents paramètres étudiés et les paramètres du régime de coupe (V_c , f et ap).

IV.2.1. Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) est une technique statistique standard qui est couramment utilisée pour déterminer l'importance des variables indépendantes sur les réponses de sortie. Elle n'analyse pas les données directement, mais détermine le pourcentage de contribution de chaque facteur dans la détermination de la variabilité (variance) des données. La table ANOVA est composée de la somme des carrés (SC) et degrés de liberté (DF) [68].

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

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

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 $i^{\text{ème}}$, N : nombre total d'expériences, N_{nf} : niveau de chaque facteur f .

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

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

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

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

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

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

$$Cont.\% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (\text{IV.4})$$

IV.2.2. Méthodologie des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponse est un ensemble de techniques mathématiques qui se base sur la conception expérimentale pour déterminer la portée des variables d'entrée indépendantes. Cette méthode permet, grâce à des modèles mathématiques empiriques, de déterminer une relation d'approximation entre les réponses de sortie (Y), et les variables d'entrée (vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap)) pour optimiser les paramètres du procédé afin d'atteindre des réponses souhaitables. Dans cette méthode, la réponse peut s'écrire sous la forme suivante [68] :

$$Y = \varphi(Vc.f.ap) \quad (\text{IV.5})$$

Où Y est l'aspect d'usinage souhaité et φ est la fonction de réponse. Le mot d'usinabilité implique de bonnes performances en matière de consommation de puissance de coupe (P_c), de débit du copeau enlevé (MRR), de la rugosité de surface (Ra) et de l'effort tangentiel de coupe (F_z). L'approximation de Y est proposée en utilisant un modèle mathématique quadratique, ce qui aide à étudier les effets d'interaction des paramètres de processus avec des caractéristiques d'usinabilité. Dans le présent travail, le modèle mathématique de second ordre basé sur RSM est donné par les éléments suivants :

$$Y = x_0 + \sum_{i=1}^k y_i X_i + \sum_{ij} y_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k y_{ii} X_i^2 + \varepsilon_{ij} \quad (\text{IV.6})$$

$$(\varepsilon_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij}) \quad (\text{IV.7})$$

Où x_0 est le terme libre de l'équation de régression, les coefficients Y_1, Y_2, \dots, Y_k et $Y_{11}, Y_{22}, \dots, Y_{kk}$ sont les termes linéaires et quadratiques respectivement, tandis que $Y_{12}, Y_{13}, \dots, Y_{k-1}$ sont les termes interactifs et ε_{ij} présente l'erreur d'ajustement pour le modèle de régression.

Pour déterminer l'énergie consommée lors de l'opération d'usinage, on mesure la puissance de coupe P_c (W) liée à l'effort tangentiel de coupe F_z (N) ainsi que le débit de copeau enlevé MRR (cm^3/min). Le dernier peut être défini comme le volume du matériau éliminé divisé par le temps d'usinage. D'autre part, le MRR est le débit de copeau «instantané» car la vitesse à laquelle la surface de la section transversale de la matière enlevée se déplace dans la pièce à usiner. La puissance de coupe (P_c) est calculée avec les résultats obtenus par l'effort tangentiel de coupe comme suit :

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60} \quad (\text{W}) \quad (\text{IV.8})$$

Le débit du copeau enlevé (MRR) est calculé on utilisant la formule suivante :

$$MRR = V_c \times f \times a_p \quad (\text{cm}^3 / \text{min}) \quad (\text{IV.9})$$

D'autre part, le coefficient de détermination R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{IV.10})$$

Où y_i : est la réponse calculée à la $i^{\text{ème}}$ expérience ;

\bar{y}_i : est la valeur moyenne des réponses mesurées.

L'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour tester la validité du modèle, ainsi qu'examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérées statistiquement significatifs. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réelles (expérimentales) [68, 69].

IV.3. Résultats et discussions

Le tableau IV.1 présente les résultats expérimentaux correspondants au critère arithmétique de la rugosité de surface (Ra), l'effort tangentiel de coupe (Fz), la puissance de coupe (Pc) et le débit du copeau enlevé (MRR) avec la combinaison des différents paramètres de coupe lors de l'usinage du Polyoxyméthylène (POM C) en utilisant un outil de coupe en carbure métallique.

Tableau VI.1. Valeurs expérimentales de Ra , Fz , Pc et MRR en fonction de Vc , f et ap

N°	Facteurs			Réponses			
	Vc , m/min	f , mm/tr	ap , mm	Ra , μm	Fz , N	Pc , W	MRR , cm^3/min
1	314	0,08	1	0,67	22,38	117,12	25,12
2	314	0,08	2	1,22	29,12	152,39	50,24
3	314	0,08	3	1,61	34,99	183,11	75,36
4	314	0,16	1	1,40	28,50	149,15	50,24
5	314	0,16	2	1,61	41,63	217,86	100,48
6	314	0,16	3	1,98	50,45	264,02	150,72
7	314	0,24	1	2,02	32,67	170,97	75,36
8	314	0,24	2	2,58	53,41	279,51	150,72
9	314	0,24	3	3,14	66,60	348,54	226,08
10	440	0,08	1	0,56	19,70	144,47	35,20
11	440	0,08	2	1,13	22,98	168,52	70,40
12	440	0,08	3	1,07	30,82	226,01	105,60
13	440	0,16	1	1,13	24,28	178,05	70,40
14	440	0,16	2	1,22	39,48	289,52	140,80
15	440	0,16	3	1,79	47,11	345,47	211,20
16	440	0,24	1	1,98	28,08	205,92	105,60
17	440	0,24	2	2,18	39,94	292,89	211,20
18	440	0,24	3	3,01	56,41	413,67	316,80
19	628	0,08	1	0,47	10,99	115,03	50,24
20	628	0,08	2	0,87	18,46	193,21	100,48
21	628	0,08	3	1	27,09	283,54	150,72
22	628	0,16	1	1,03	20,94	219,17	100,48
23	628	0,16	2	1,16	32,35	338,60	200,96
24	628	0,16	3	1,42	42,18	441,48	301,44
25	628	0,24	1	1,65	21,33	223,25	150,72
26	628	0,24	2	2,01	32,97	345,09	301,44
27	628	0,24	3	2,98	47,48	496,96	452,16

IV.3.1. Analyse des résultats de la rugosité de surface (Ra) en fonction de Vc , f et ap

D'après le *tableau IV.1*, on remarque que pour les différentes combinaisons du régime de coupe : les rugosités obtenues varient entre (0,47 et 3,14) (μm), l'effort tangentiel de coupe (Fz), la puissance de coupe (Pc) et le débit du copeau enlevé (MRR) varient entre (10,99 et 66,6) (N) ; (115,03 et 496,96) (W) et (25,12 et 452,16) (cm^3/min) respectivement.

IV.3.1.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Le *tableau IV.2* illustre les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra) pour un niveau de confiance de 95%. Dans ce tableau, les valeurs de DF, la somme des écarts au carré (SS), le carré moyen (MS) et le pourcentage de contribution (Cont%) de chaque modèle sont présentés. Le but principal est d'analyser l'influence des paramètres de coupe (ap , Vc et f) sur la variance totale des résultats. Les valeurs de «P» dans les modèles sont inférieures à 0,05 ce qui indique que les modèles sont adéquats et que les termes ont un effet significatif sur les réponses, ce qui est souhaitable.

Tableau IV.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface (Ra)

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Régression	13,473	9	1,497	53,547	<0,0001		Signifiant
A- Vc	0,7363	1	0,736	26,330	<0,0001	5,28%	Signifiant
B- f	9,2633	1	9,263	331,345	<0,0001	66,41%	Signifiant
C- ap	2,748	1	2,748	98,283	<0,0001	19,70%	Signifiant
AB	0,0001	1	0,0001	0,005	0,944	0,00%	Non signifiant
AC	0,0105	1	0,010	0,377	0,547	0,08%	Non signifiant
BC	0,187	1	0,187	6,707	0,019	1,34%	Signifiant
A ²	0,0358	1	0,036	1,279	0,274	0,26%	Non signifiant
B ²	0,404	1	0,404	14,446	0,001	2,90%	Signifiant
C ²	0,017	1	0,017	0,598	0,450	0,12%	Non signifiant
Erreur	0,475	17	0,028				
Total	13,948	26					

La *figure VI.1* montre les contributions des termes significatifs du modèle de la rugosité de surface (Ra).

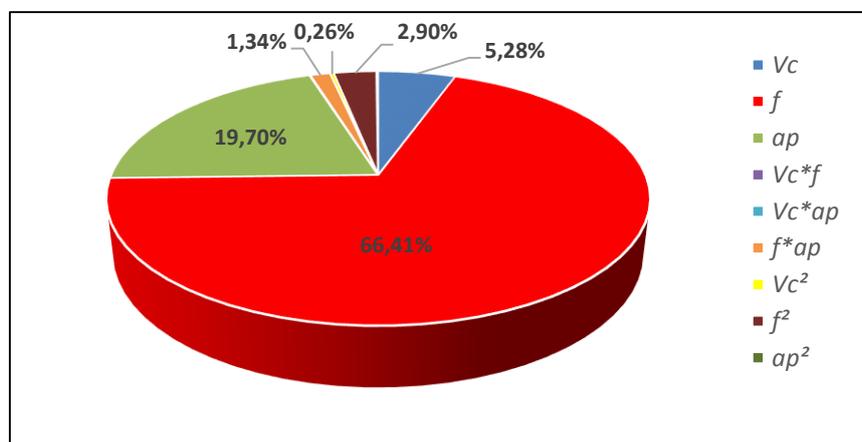


Figure V.1. Contribution des termes significatifs du modèle de la rugosité de surface (Ra).

Il est clair que l'avance par tour (f) est le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface (Ra), sa contribution est 66,41%. Le deuxième facteur important affectant la rugosité de surface est la profondeur de passe (ap) avec 19,70% de contribution, la vitesse de coupe (Vc) avec 5,28% de contribution. C'est logique car l'augmentation de l'avance génère des sillons résultants de la cinétique d'usinage qui sont plus profonds et plus larges lorsque l'avance par tour (f) augmente. Des résultats comparatifs ont été trouvés par Madic et autres [57] lors du tournage du Polyamide PA6. Un exemple représentatif d'une image en 3D d'une surface tournée est représenté dans la **figure IV.2** pour mieux visualiser ces rainures.

L'interaction ($f \times ap$) et le produit (f^2) ont des contributions inférieures à 1,5%. Les autres termes peuvent être supposés non significatifs.

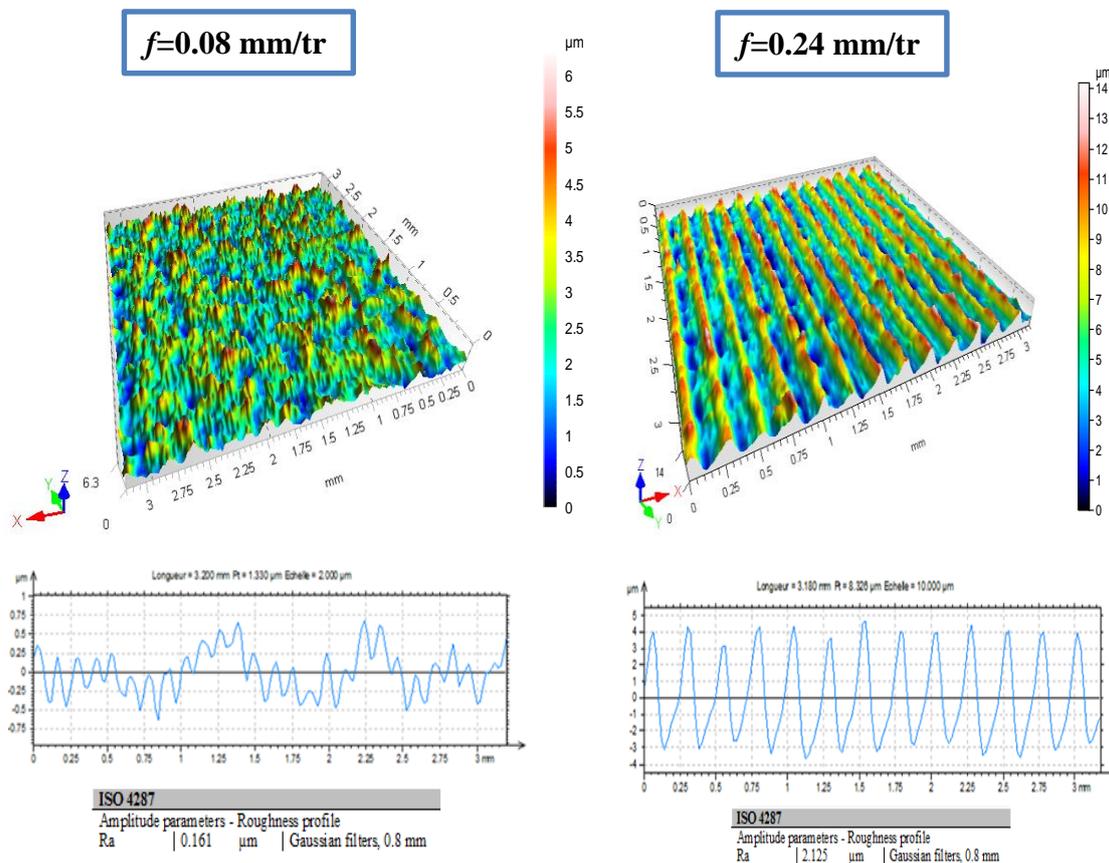


Figure IV.2. Topographie d'une surface usinée avec deux différentes avances.

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse de la variance, un graphe de Pareto est construit (**figure IV.3**). Ce graphe classe les paramètres de coupe et leurs interactions suivant leur influence décroissante sur la rugosité de surface (Ra). Les effets sont normalisés pour une meilleure comparaison. Les valeurs standardisées de cette figure sont obtenues en divisant

l'effet de chaque facteur par l'erreur sur la valeur estimée du facteur correspondant. Plus l'effet est normalisé, plus le facteur considéré est influencé. Si les valeurs F sont supérieures à 4,45, les effets sont significatifs. Par contre, si les valeurs du tableau F sont inférieures à 4,45, les effets ne sont pas significatifs. Tel que la valeur 4,45 est trouvée en comparant les valeurs de F-table de l'ANOVA par celles des tables de Fisher [70]. L'intervalle de confiance choisi est de 95%.

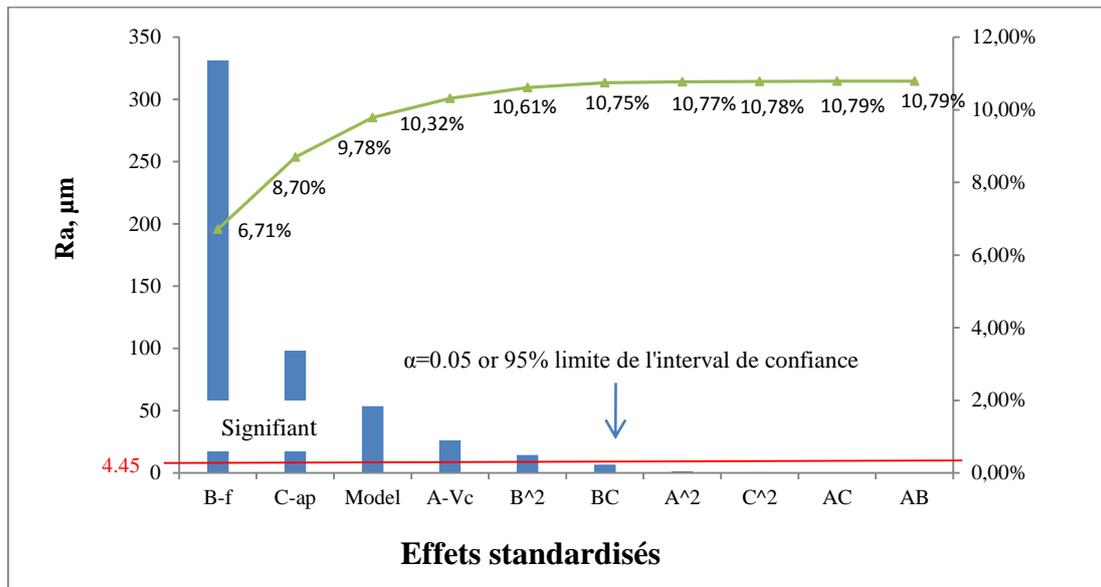


Figure IV.3. Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la rugosité (R_a).

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la **figure IV.4**. A partir de cette figure, on peut visualiser et comparer le degré d'influence de divers facteurs sur la réponse étudiée. La courbe qui a la pente la plus élevée signifie que le facteur a la plus grande influence sur la réponse. Il apparaît clairement que l'avance par tour (f) affecte fortement la rugosité de surface (R_a) suivie par la profondeur de passe (ap). Par contre, la vitesse de coupe (V_c) a une très faible influence sur (R_a).

Les graphes de la **figure VI.3 et VI.4** confirment les résultats de l'analyse de la variance indiqués au **tableau IV.2**.

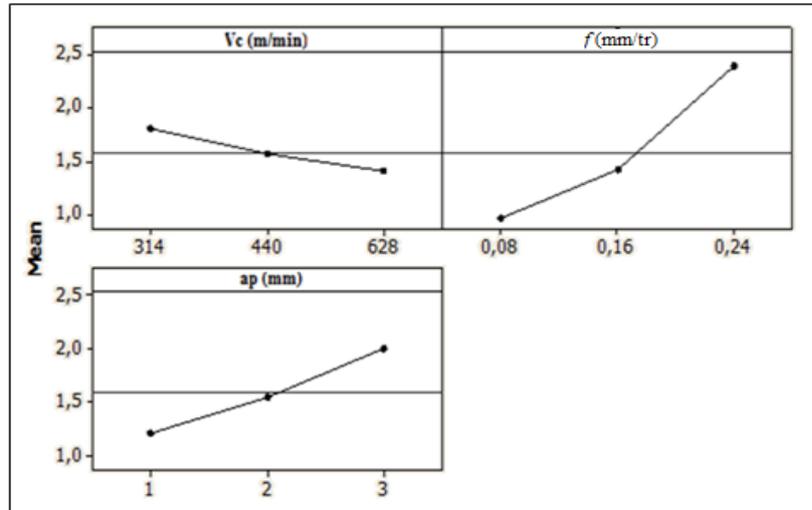


Figure IV.4. Graphiques des effets principaux pour la rugosité (Ra).

IV.3.1.2. Analyse de régression de (Ra) en fonction de Vc , f et ap

La relation entre les facteurs d'entrée et de sortie est modélisée par une régression quadratique. Le modèle de régression obtenu est donné ci-dessous par l'équation (IV.11) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 96,59\%$.

$$Ra = 2,016 - 4,047 E - 3 \times Vc - 7,230 \times f + 0,019 \times ap + 2,723 E - 4 \times Vc \times f - 1,874 E - 4 \times Vc \times ap + 1,563 \times f \times ap + 3,280 E - 6 \times Vc^2 + 40,538 \times f^2 + 0,053 \times ap^2 \quad (IV.11)$$

Afin de mieux comprendre l'effet d'interaction des paramètres de coupe tel que l'avance par tour (f), la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (Vc) sur la rugosité de surface (Ra), les surfaces en 3D ont été tracés sur la **figure (IV.5)** à partir de l'équation du modèle (**Equation IV.8**).

Les figures (a) et (b) montrent que l'effet de la vitesse de coupe (Vc) sur la rugosité de surface (Ra) est moindre par rapport aux effets de l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap). La figure (c) montre que l'augmentation de l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) provoque une augmentation de la rugosité (Ra). Cependant, il est noté que l'effet de l'avance est plus important, comme l'ont démontré [55].

Il convient de noter que la rugosité de surface minimale est survenue pour la combinaison des deux valeurs faibles des paramètres (f , ap) et la valeur maximale de (Vc).

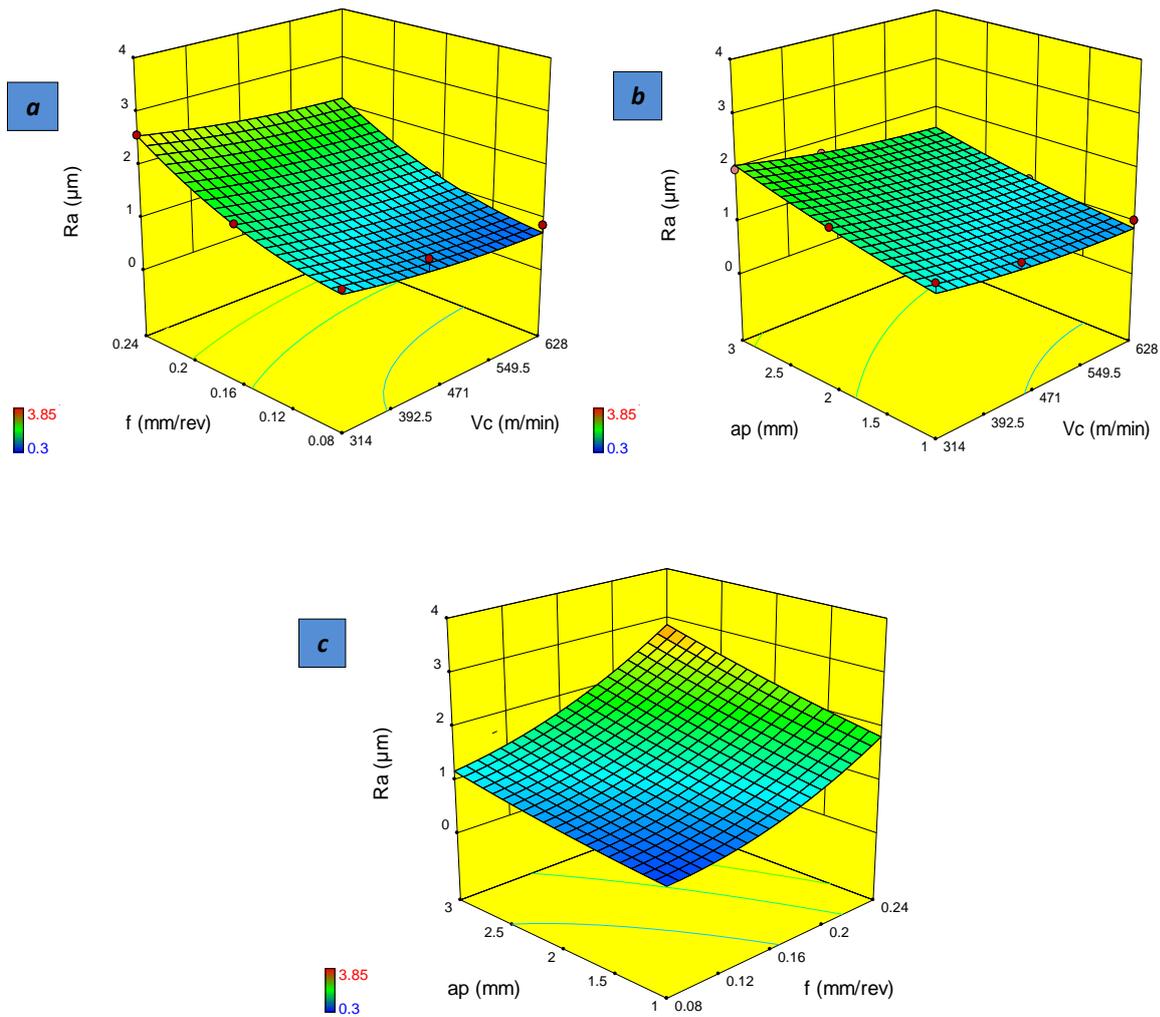


Figure IV.5. Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité de surface (R_a).

IV.3.1.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La **figure IV.6** illustre les différences entre les valeurs mesurées et prédites de la rugosité de surface (R_a). Ces chiffres indiquent que les modèles quadratiques sont capables de représenter le système dans le domaine expérimental donné. La comparaison des résultats prouve que les valeurs prédites et celles mesurées sont très proches ce qui prouve que le modèle est fiable.

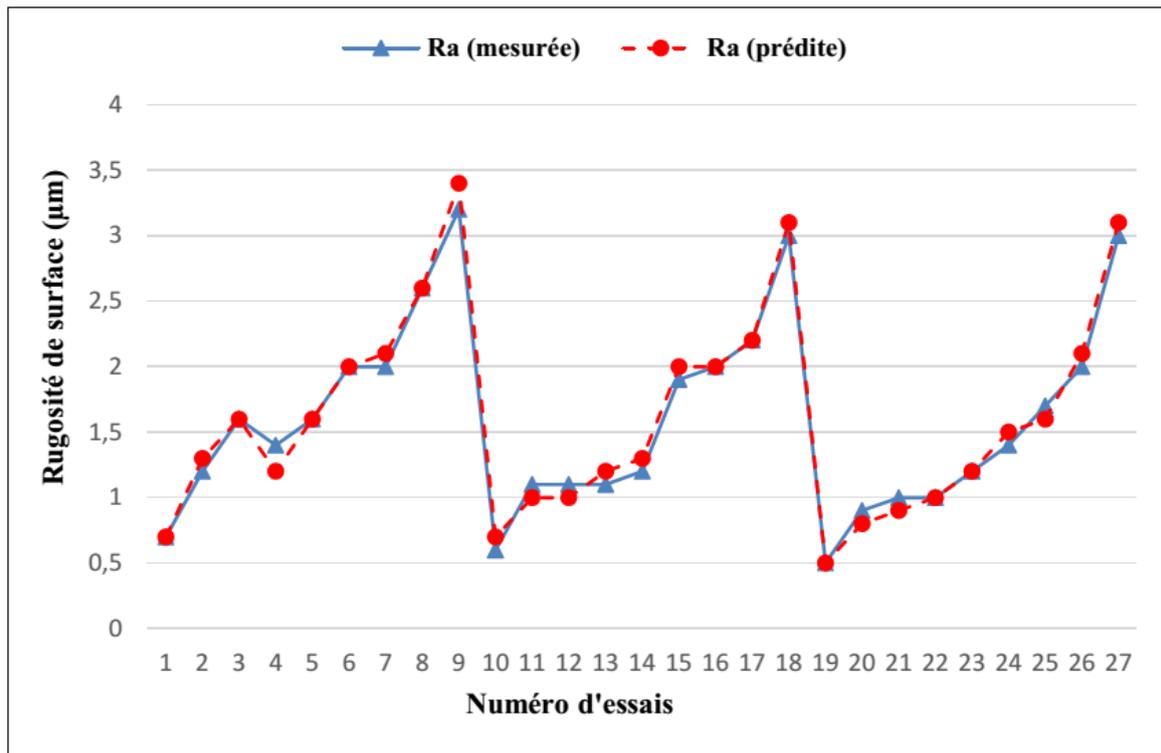


Figure IV.6. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (R_a).

IV.4. Analyse des résultats de l'effort de coupe (F_z) en fonction de V_c , f , a_p

IV.4.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Le tableau IV.3 et la figure IV.7 illustrent les résultats de l'ANOVA pour l'effort tangentiel de coupe (F_z) pour un niveau de confiance de 95%.

Tableau IV.3. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort de coupe (F_z)

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Régression	4481,948	9	497,994	99,975	<0,0001		Signifiant
A- V_c	623,751	1	623,751	125,221	<0,0001	13,66%	Signifiant
B- f	1419,871	1	1419,871	285,047	<0,0001	31,09%	Signifiant
C- a_p	2073,715	1	2073,715	416,309	<0,0001	45,41%	Signifiant
AB	33,967	1	33,967	6,819	0,018	0,74%	Signifiant
AC	1,674	1	1,674	0,336	0,570	0,04%	Non signifiant
BC	196,668	1	196,668	39,482	<0,0001	4,31%	Signifiant
A ²	5,198	1	5,198	1,043	0,321	0,11%	Non signifiant
B ²	63,202	1	63,202	12,688	0,002	1,38%	Signifiant
C ²	1,395	1	1,395	0,280	0,603	0,03%	Non signifiant
Erreur	84,680	17	4,981				
Total	4566,628	26					

On peut constater que (ap) et (f) ont un effet significatif sur (F_z). Néanmoins, (ap) est le facteur le plus important influençant (F_z) avec une contribution de 45,41%. Le facteur suivant influençant (F_z) est l'avance (f) suivi par (V_c), leurs contributions sont de 31,09% et 13,66% respectivement. L'interaction ($f \times ap$) et le terme (f^2) ont les contributions de 4,31% et 1,38% respectivement. Les autres termes ont une contribution inférieure à 1%. Des résultats comparatives ont été trouvés par M. S. Ansari et autres [71] lors du tournage du polymère polytétrafluoroéthylène et M. Madic et autres [57] lors du tournage du polymère polyamide.

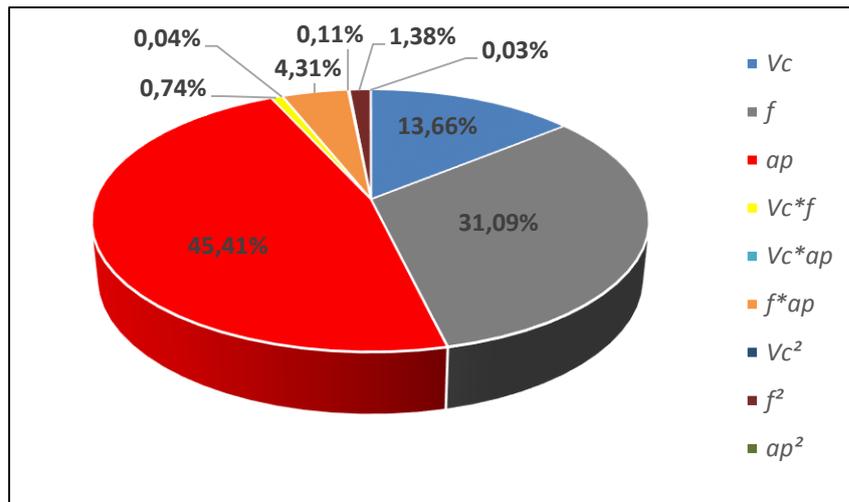


Figure V.7. Contribution des termes significatifs du modèle de l'effort de coupe (F_z).

La figure IV.8 expose le graphe de Pareto qui est construit pour confirmer les résultats de l'analyse de la variance. Il ressort que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influant sur l'effort tangentiel de coupe (F_z) suivi par l'avance par tour (f) et la vitesse de coupe (V_c), ce qui confirme les résultats indiqués dans **le tableau IV.4**.

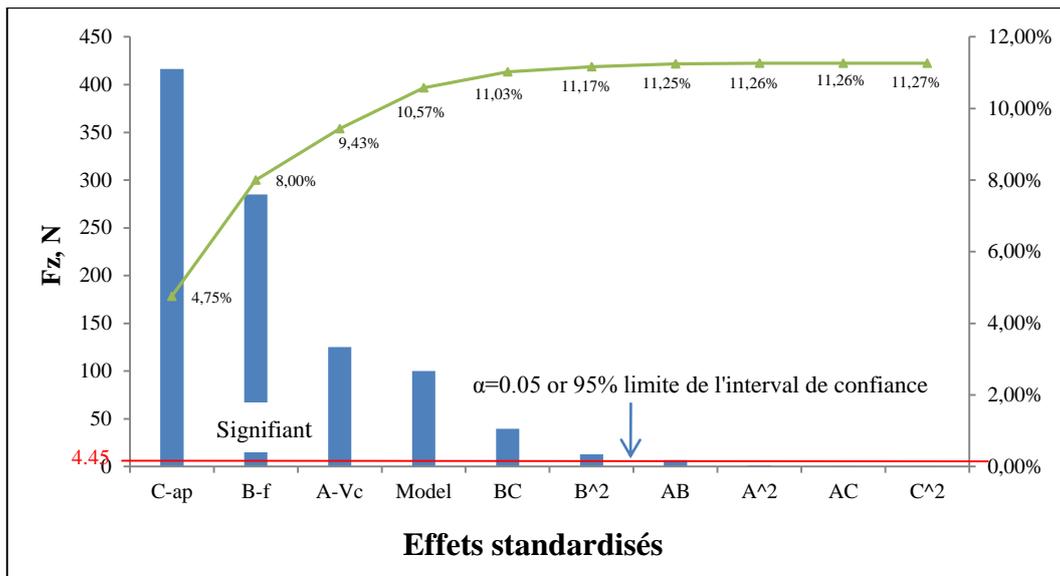


Figure IV.8. Graphe de PARETO des effets des paramètres de l'effort de coupe (F_z).

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la **figure IV.9**, à partir de cette figure, On peut dire que la profondeur de passe (ap) affecte fortement l'effort tangentiel de coupe (F_z), suivie par l'avance par tour (f) puis la vitesse de coupe (V_c). L'étude du graphique des effets principaux concorde avec les résultats des surfaces de réponse.

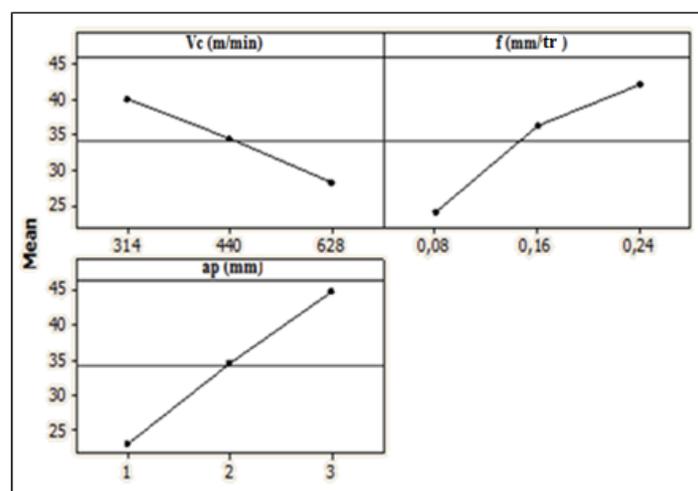


Figure IV.9. Graphiques des effets principaux pour l'effort de coupe (F_z).

IV.4.2. Analyse de régression de (F_z) en fonction de V_c , f et ap

L'équation de régression obtenue est donnée ci-dessous par l'équation (IV.12) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 98,15\%$.

$$F_z = 11,699 - 0,049 \times V_c + 235,130 \times f + 5,713 \times a_p - 0,133 \times V_c \times f - 2,364 \times V_c \times a_p + 50,604 \times f \times a_p + 3,955E - 5 \times V_c^2 - 507,118 \times f^2 - 0,482 \times a_p$$

(IV.12)

La **figure VI.10 (a, b, et c)** présente les surfaces de réponses en 3D. La figure (a) illustre l'effet de l'interaction entre la profondeur de passe (a_p) et l'avance par tour (f). Comme il a été prévu, on remarque que l'effort tangentiel de coupe augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance par tour. Ceci est dû à l'élargissement de la section de coupe. Aussi, on peut déduire que l'influence de la profondeur de passe est plus importante. Les figures (b) et (c) révèlent que la vitesse de coupe (V_c) a un effet moindre sur l'effort tangentiel de coupe (F_z) ce qui confirme les résultats présentés dans **le tableau IV.3**.

Sur le plan pratique, pour une profondeur de passe minimale ($a_p=1\text{mm}$) et une avance par tour aussi minimale ($f=0,08\text{ mm/tr}$), l'effort tangentiel de coupe est minimale ($F_z=10,99\text{ N}$), et pour une profondeur de passe maximale ($a_p=3\text{mm}$) et une avance maximale ($f=0,24\text{ mm/tr}$), l'effort tangentiel de coupe (F_z) est maximale ($F_z=66,6\text{ N}$).

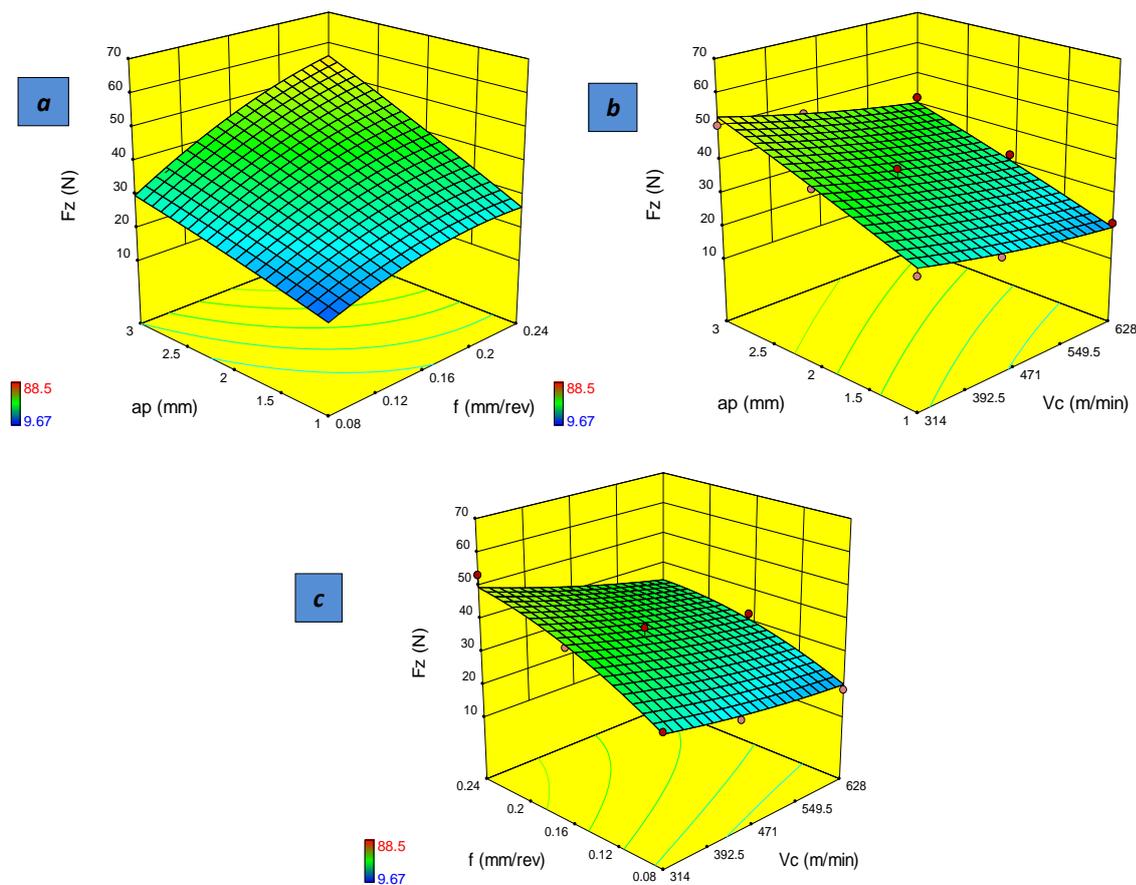


Figure IV.10. Surface de réponse estimée pour l'effort de coupe (F_z) selon V_c , f et a_p .

IV.4.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

Les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'effort tangentiel de coupe (F_z) sont exposées dans la **figure IV.11**. La comparaison des résultats montre que les valeurs prédites et celles mesurées sont proches ce qui prouve la fiabilité du modèle. De manière générale on remarque que la courbe des valeurs prédites épouse la forme de la courbe des valeurs expérimentales excepté quelques points d'essai où nous pouvons noter une petite divergence.

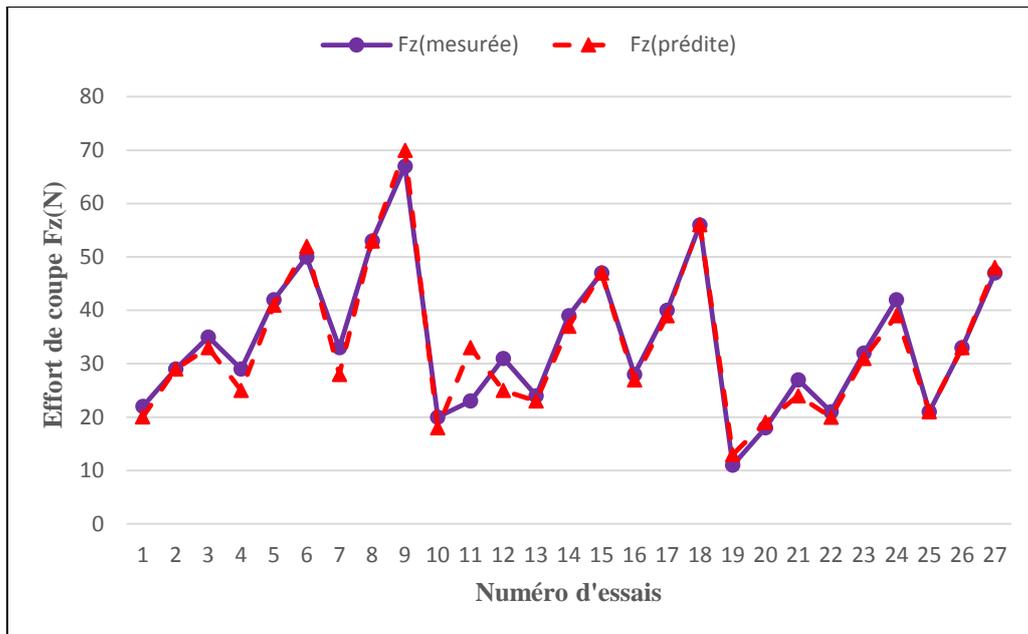


Figure IV.11. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (F_z).

IV.5. Analyse des résultats de la puissance de coupe (P_c) en fonction de V_c , f et ap

IV.5.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Les résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe (P_c) pour un niveau de confiance de 95% sont exprimés dans **le tableau IV.4**. Ce tableau indique que tous les paramètres d'entrée sont significatifs, mais la profondeur de passe (ap) est le facteur qui a la plus grande influence suivi par l'avance par tour (f) et en dernier lieu par la vitesse de coupe (V_c), leurs contributions sont de 47,81%, 30,50% et 12,63% respectivement. Les interactions ($V_c \times ap$ et $f \times ap$) et le terme (f^2) ont des contributions inférieures à 1%. Les autres termes n'ont pas d'effet significatif sur la puissance de coupe (P_c). **La figure IV.12** explique mieux l'ordre des grandeurs des différentes contributions des facteurs principaux et des interactions et aussi des termes carrés indiqués dans **le tableau IV.4**.

Tableau IV.4. Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe (P_c)

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Régression	258468,167	9	28718,685	100,389	<0,0001		Signifiant
A- V_c	33251,362	1	33251,362	116,233	<0,0001	12,63%	Signifiant
B- f	80320,241	1	80320,241	280,767	<0,0001	30,50%	Signifiant
C- ap	125900,59	1	125900,59	440,098	<0,0001	47,81%	Signifiant
AB	1431,590	1	1431,590	5,004	0,039	0,54%	Non signifiant
AC	8075,110	1	8075,110	28,227	<0,0001	3,07%	Signifiant
BC	9802,444	1	9802,444	34,265	<0,0001	3,72%	Signifiant
A ²	372,768	1	372,768	1,303	0,269	0,14%	Non signifiant
B ²	5132,276	1	5132,277	17,940	0,0005	1,95%	Signifiant
C ²	15,837	1	15,837	0,055	0,817	0,01%	Non signifiant
Erreur	4863,259	17	286,074				
Total	263331,426	26					

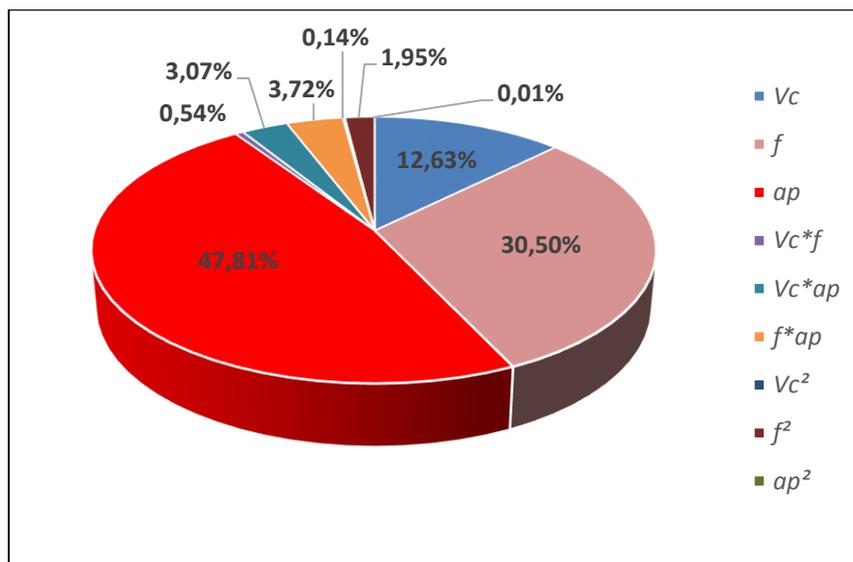


Figure IV.12. Répartition des contributions des termes significatifs du modèle du (P_c).

Pour mieux visionner les résultats de l'analyse des variances, un graphe de Pareto est construit, il est représenté dans la **figure IV.13**.

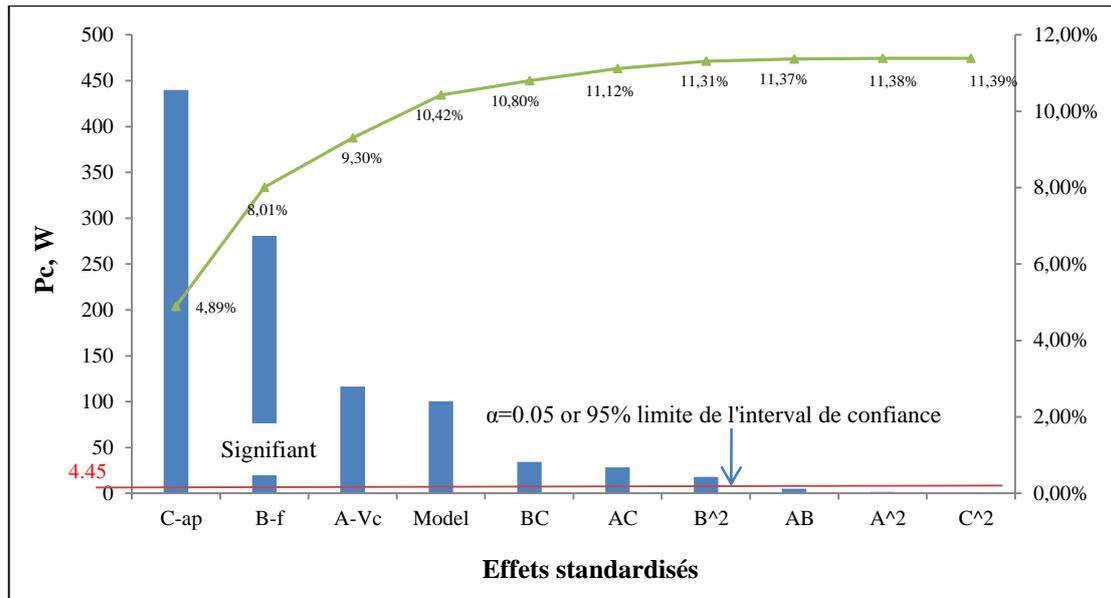


Figure IV.13. Graphe de PARETO des effets des paramètres de coupe sur la puissance de coupe (P_c).

La figure IV.14 présente les graphiques des effets principaux pour la puissance de coupe (P_c). À partir de cette figure, On peut observer que la profondeur da passe (ap) affecte fortement la puissance de coupe (P_c), suivie par l'avance par tour (f) et en dernier lieu la vitesse de coupe (V_c). Cela confirme les résultats de l'ANOVA (Tableau VI.4).

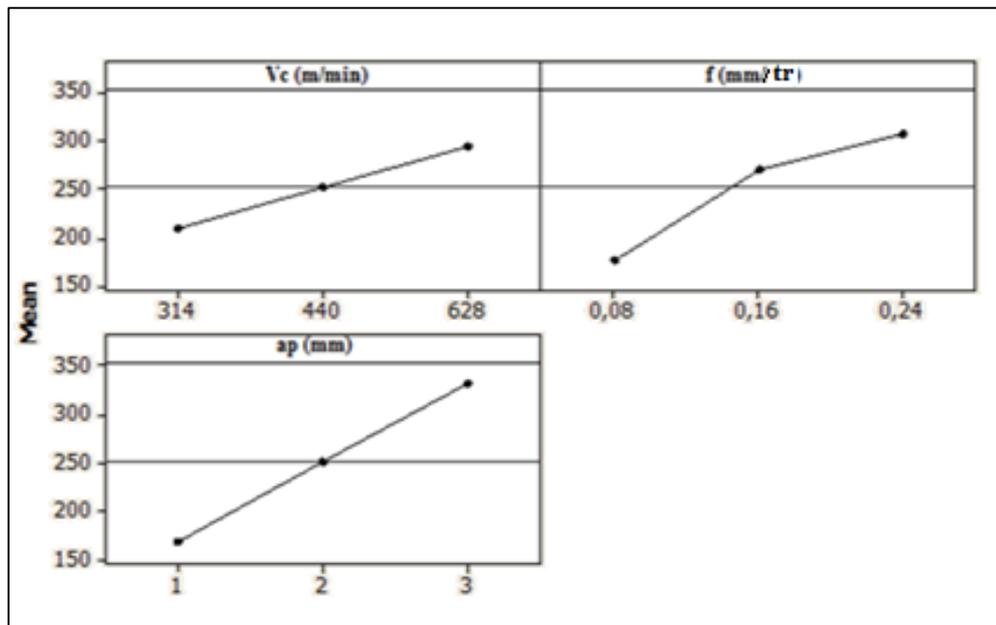


Figure IV.14. Graphiques des effets principaux pour la puissance de coupe (P_c).

IV.5.2. Analyse de régression de la puissance de coupe (P_c) en fonction de V_c , f et ap

Le modèle de régression quadratique obtenue est donnée ci-dessous par l'équation (IV.13) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 98,15\%$.

$$P_c = -13,467 + 0,123 \times V_c - 1178,538 \times f - 44,084 \times ap + 0,864 \times V_c \times f + 0,164 \times V_c \times ap + 357,261 \times f \times ap - 3,349E - 4 \times V_c^2 - 4569,823 \times f^2 - 1,625 \times ap^2$$

(IV.13)

La figure VI.15 expose les résultats de la surface de réponse en 3D de la puissance de coupe (P_c) en fonction des conditions de coupe (V_c , f et ap). Comme on peut le voir à partir de cette figure, la puissance de coupe tend à augmenter considérablement avec l'augmentation de l'avance par tour (f) et de la profondeur de passe (ap). Par contre l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c) engendre un accroissement moins important comparativement à la profondeur de passe (ap) et à l'avance (f). Avec l'augmentation des trois facteurs (V_c), (f) et (ap), la puissance de coupe s'accroît puisqu'elle est étroitement liée à l'augmentation des efforts de coupe et aussi la vitesse de coupe (équation IV.4)

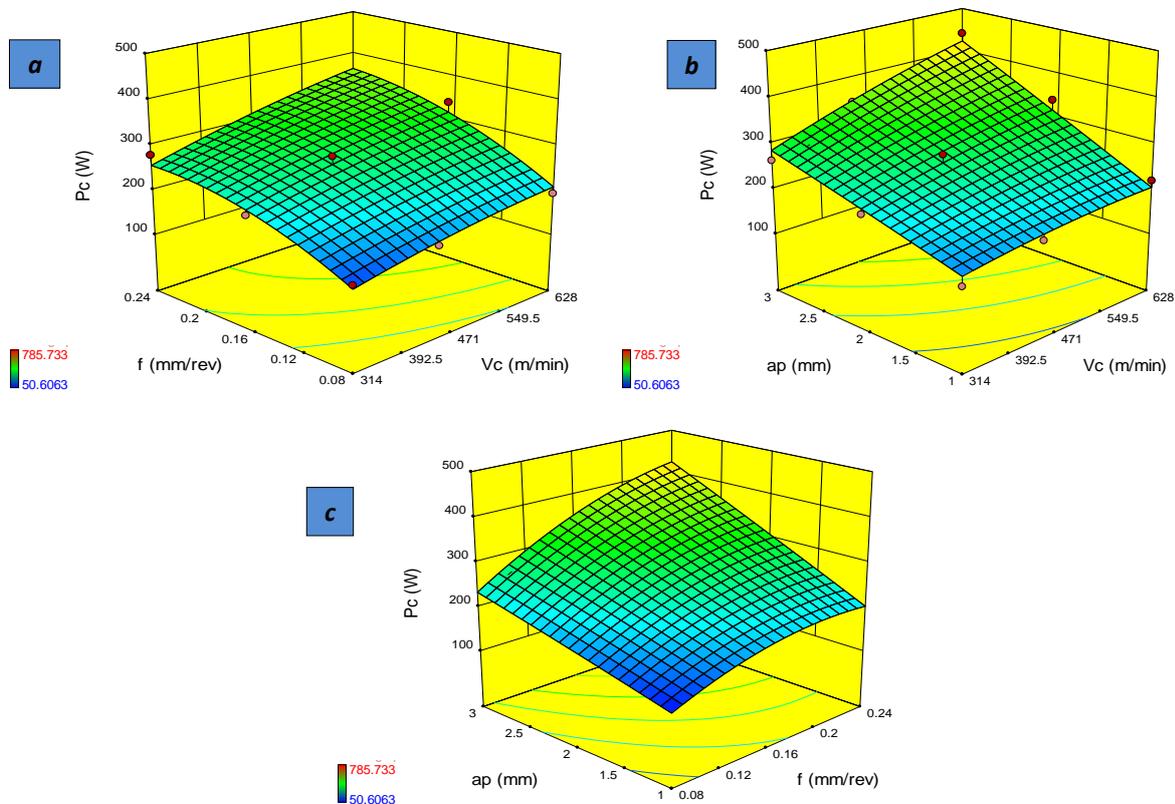


Figure IV.15. Surface de réponse estimée pour la puissance de coupe (P_c) selon V_c , f et ap .

IV.5.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La *figure IV.16* illustre les différences entre les valeurs mesurées et celles prédites de la puissance de coupe (P_c). On remarque que l'allure générale de la courbe des valeurs prédites suit celle de la courbe des valeurs expérimentales. Néanmoins, quelques divergences sont observées ce qui prouve que le modèle trouvé est efficace.

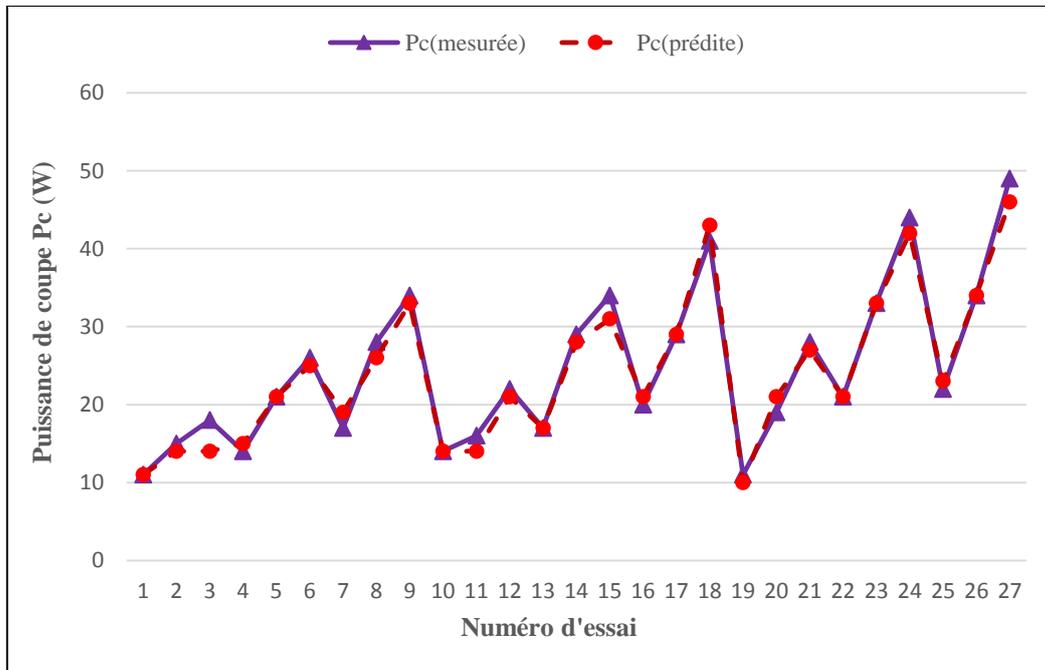


Figure IV.16. Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (P_c).

IV.6. Analyse des résultats du débit du copeau enlevé (MRR) en fonction de V_c , f et ap

IV.6.1. Analyse de la variance (ANOVA)

Le tableau IV.5 et *la figure IV.17* présente les résultats de l'analyse ANOVA pour le débit du copeau enlevé (MRR). On peut affirmer que la profondeur de passe (ap) et l'avance par tour (f) ont la signification statistique la plus élevée (37,00%) suivie par la vitesse de coupe (V_c) (16,55%). Les interactions ($V_c \times f$, $V_c \times ap$ et $f \times ap$) ont des contributions moins importantes et varient entre 5,94% et 2,79%.

Tableau IV.5. Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de coupe enlevé (*MRR*)

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Régression	273238,869	9	30359,874	403,712	<0,0001		Signifiant
A- <i>Vc</i>	45433,037	1	45433,037	604,149	<0,0001	16,55%	Signifiant
B- <i>f</i>	101572,791	1	101572,791	1350,670	<0,0001	37,00%	Signifiant
C- <i>ap</i>	101572,791	1	101572,791	1350,67	<0,0001	37,00%	Signifiant
AB	7670,579	1	7670,579	102	<0,0001	2,79%	Signifiant
AC	7670,579	1	7670,579	102	<0,0001	2,79%	Signifiant
BC	16298,018	1	16298,018	216,724	<0,0001	5,94%	Signifiant
Erreur	1278,430	17	75,202				
Total	274517,299	26					

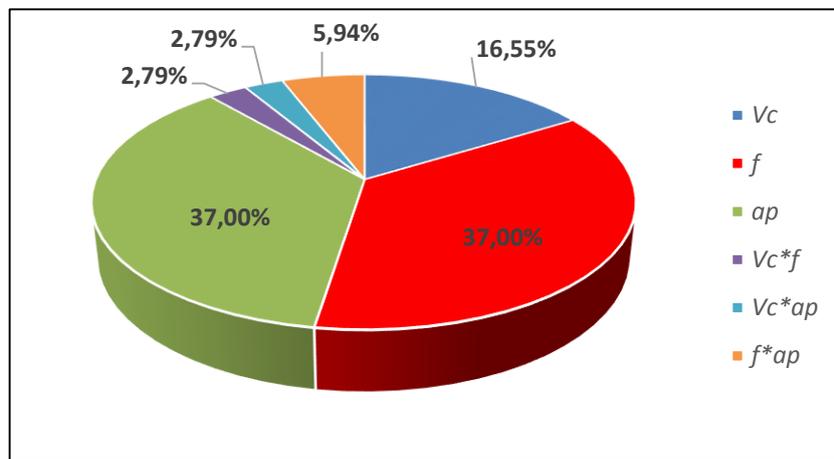


Figure IV.17. Contribution des termes significatifs du modèle de (*MRR*).

Le graphe de Pareto construit est illustré dans la (**figure IV.18**).

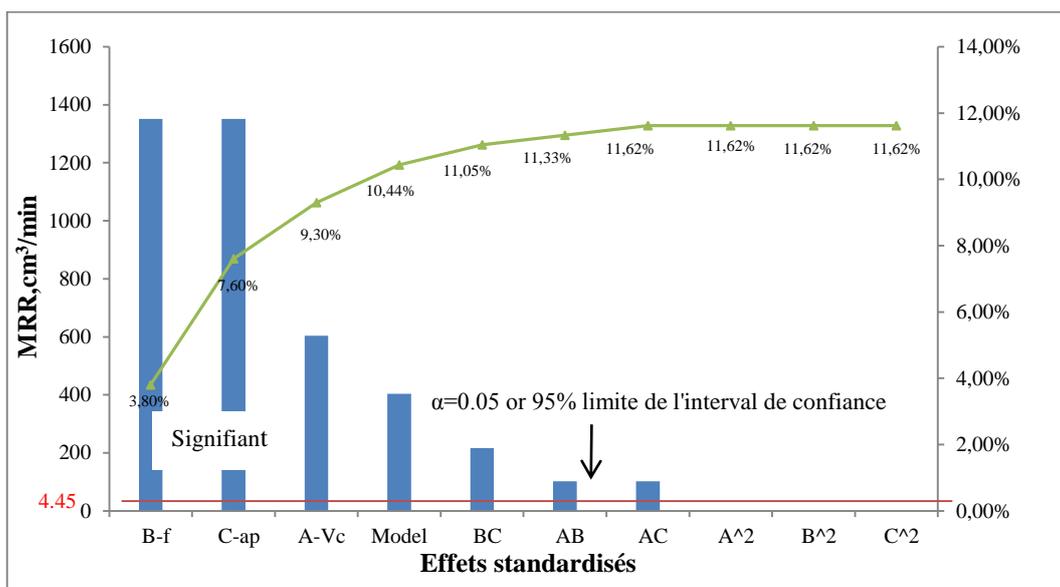


Figure IV.18. Graphe de PARETO des effets des paramètres du (*MRR*).

La **figure IV.19** présente les graphiques des effets principaux, on remarque que la profondeur de passe (ap) et l'avance par tour (f) ont une influence élevée sur le débit du coupeau enlevé (MRR), car ils ont la plus grande pente. Elles sont suivies par la vitesse de coupe (Vc).

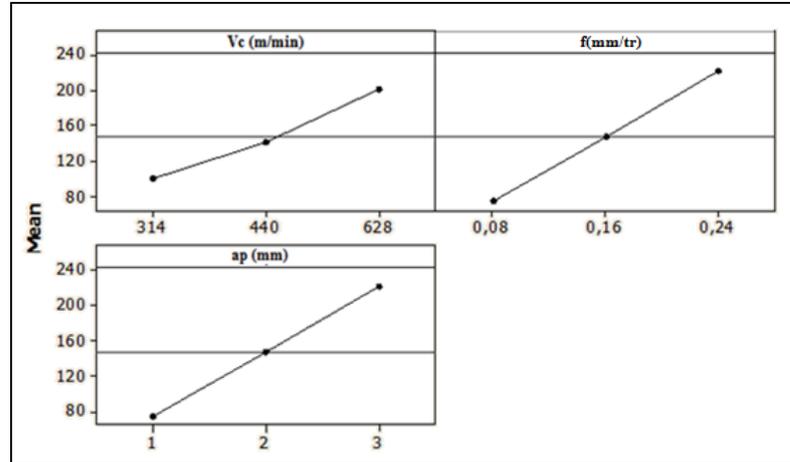


Figure IV.19. Graphiques des effets principaux pour le débit du coupeau enlevé (MRR).

IV.6.2. Analyse de régression de MRR en fonction de Vc , f et ap

L'équation de régression obtenue est donnée ci-dessous par l'équation (IV.14) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 99,53\%$.

$$MRR = 147,431 - 0,320 \times Vc - 921,333 \times f - 73,707 \times ap + 2 \times Vc \times f + 0,160 \times Vc \times ap + 460,667 \times f \times ap \quad (IV.14)$$

Afin d'étudier l'influence des paramètres de coupe sur le débit de coupeau enlevé (MRR), les surfaces de réponse en (3D) sont tracées et présentées sur **la figure IV.20**. On peut observer d'une part que le (MRR) croît avec l'augmentation des trois paramètres de coupe telle que la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap). Il convient de noter que le taux maximal d'enlèvement du matériau s'est produit pour la combinaison des trois valeurs les plus élevées des paramètres de coupe (Vc , f et ap). Ces résultats confirment celles obtenus par l'analyse ANOVA (**Tableau IV.5**).

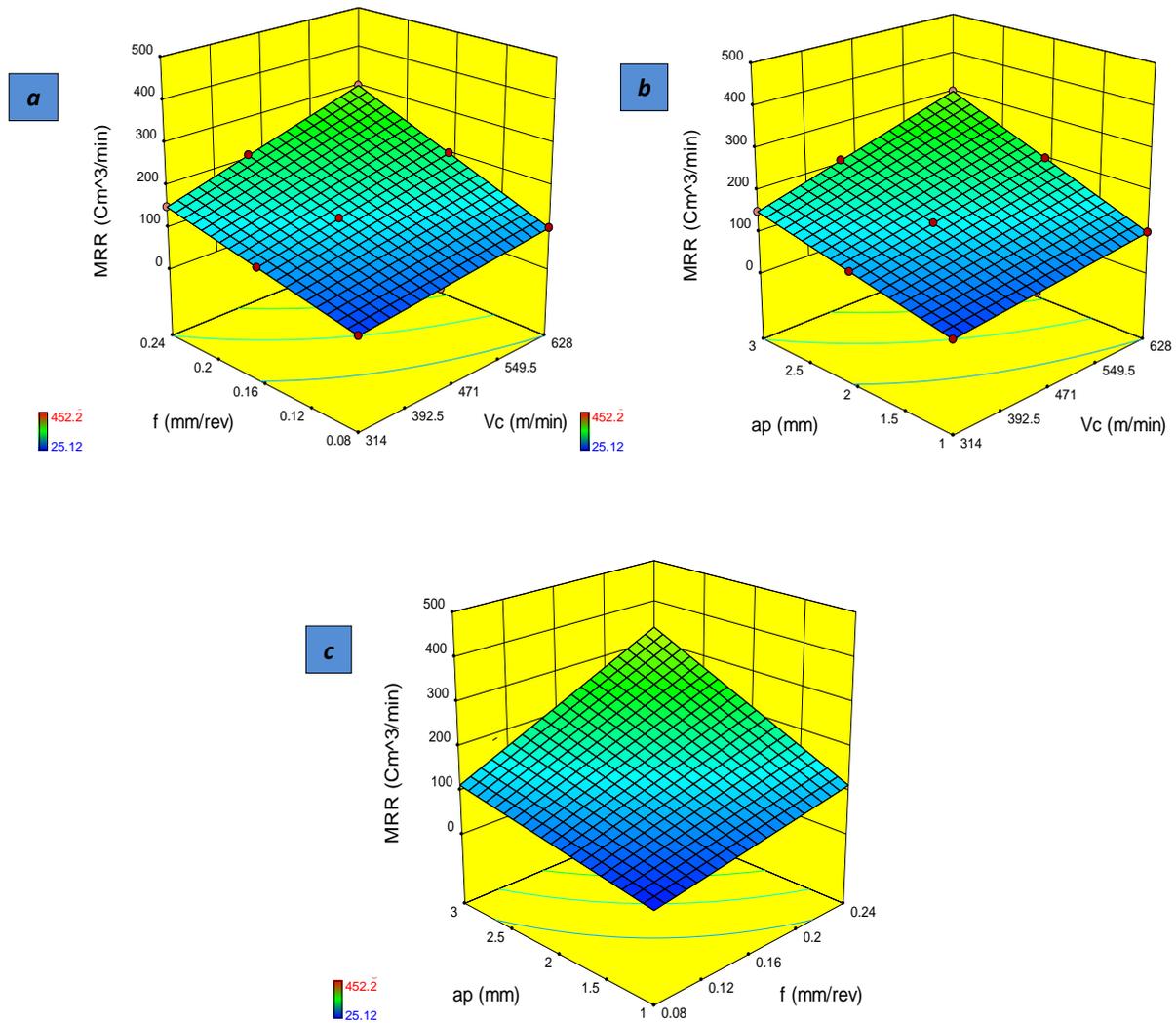


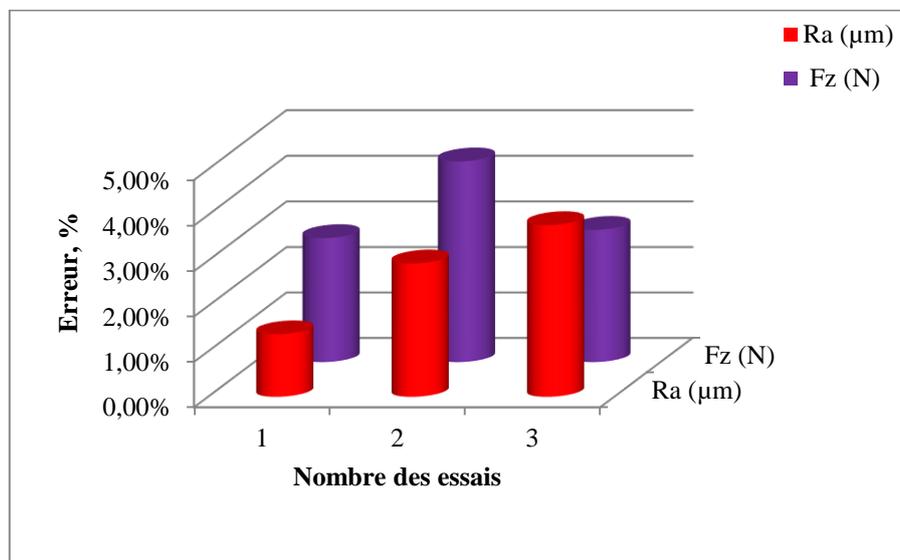
Figure IV.20. Surface de réponse estimée pour le (MRR) en fonction de V_c , f et a_p .

IV.7. Confirmation des essais

Afin de vérifier la validation des modèles quadratiques obtenus pour (Ra) et (Fz), des tests de confirmation ont été effectués. Les résultats obtenus sont présentés dans **le tableau IV.6** et sur **la figure IV.21**. On voit clairement que l'erreur calculée est très faible. Les erreurs entre les valeurs expérimentales et prédites pour (Ra) et (Fz) sont de 1,38% à 3,78% et de 2,73% à 4,41%, respectivement. Cela prouve que les modèles obtenus sont très fiables.

Tableau IV.6. Résultats des expériences de confirmation

Teste	V_c , m/min	f , mm/tr	ap , mm	Valeurs expérimentales	Valeurs prédites	Erreur, %
Rugosité de surface (R_a)						
1	360	0,14	1	0,99	1,003	1,38%
2	534	0,08	2	0,76	0,782	2,94%
3	534	0,14	2	1,22	1,266	3,78%
Effort de coupe (F_z)						
1	360	0,14	1	26,30	27,019	2,73%
2	534	0,08	2	20,98	21,906	4,41%
3	534	0,14	2	32,53	33,476	2,91%

Figure IV.21. Vérification des résultats obtenus pour (R_a) et (F_z).

IV.8. Optimisation des conditions de coupe

L'objectif de l'optimisation multi-réponse est de déterminer les conditions sur les variables indépendantes qui conduisent à des valeurs optimales ou presque optimales des variables de réponse. La désirabilité semble avoir été proposée en premier lieu comme critère pour l'optimisation de la réponse par Harrington et autres [72] et popularisé par Derringer et Suich [17].

Les plages souhaitables entre 0 et 1 et la désirabilité de 0, c'est-à-dire qu'une désirabilité élémentaire prenant la valeur zéro, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente l'idéal du cas.

La fonction objective simultanée est une moyenne géométrique de toutes les réponses transformées :

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{1/n} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{IV.15})$$

Où d_i est la désirabilité définie pour la $i^{\text{ème}}$ sortie ciblée et n est le nombre de réponses dans la mesure. Pour l'optimisation simultanée, chaque réponse doit avoir une valeur basse et élevée assignée à chaque but. Lors de l'optimisation, le logiciel propose pour chaque réponse cinq choix pour définir le but désiré. Sur la feuille de travail, le champ de "but" doit être donc rempli par un des choix suivants :

- Aucun
- Maximum
- Minimum
- Cible
- Dans la gamme

Les significations des paramètres de but sont :

- Dans le cas de la recherche d'un **maximum**, la désirabilité est réécrite comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = 0 \text{ si la réponse} < \text{ la valeur basse} \\ 0 \leq d_i \leq 1 \text{ si la réponse varie entre la valeur basse et la valeur haute} \\ d_i = 1 \text{ si la réponse} > \text{ la valeur élevée} \end{array} \right. \quad (\text{IV.16})$$

- Dans le cas de la recherche d'un **minimum**, la désirabilité est réécrite comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = 1 \text{ si la réponse} < \text{ la valeur basse} \\ 1 \geq d_i \geq 0 \text{ si la réponse varie entre la valeur basse et la valeur haute} \\ d_i = 0 \text{ si la réponse} > \text{ la valeur élevée} \end{array} \right. \quad (\text{IV.17})$$

Dans notre cas, trois approches d'optimisation sont envisagées. Ils sont appelés «*optimisation de la qualité*», «*optimisation de la productivité*», et la dernière est la combinaison entre les deux optimisations précisées «*optimisation combinée*».

La première consiste à trouver le minimum de la rugosité de surface (Ra), dans la seconde, nous cherchons le maximum du débit du coupeau enlevé (MRR). Le dernier type d'optimisation appelée «*optimisation combinée*» sert à obtenir le minimum de rugosité de surface (Ra) ainsi que l'effort tangentiel de coupe (Fz) et la puissance de coupe (Pc) et le maximum du débit du coupeau enlevé (MRR) en même temps et c'est notre objectif dans cette étude. Les plages de facteurs définis pour chaque optimisation sont résumées dans le **tableau IV.7**.

Tableau IV.7. Conditions d'optimisations

Contraintes						
Paramètres	objectif	Limite inférieure	Limite supérieure	Importance		
				Qualité	Productivité	Combinée
Vc (m/min)	Dans la gamme	314	628	3	3	3
f (mm/tr)	Dans la gamme	0,08	0,24	3	3	3
ap (mm)	Dans la gamme	1	3	3	3	3
Ra (μm)	Minimisé	0,47	3,14	5	Aucun	5
Fz (N)	Minimisé	10,99	66,6	Aucun	Aucun	1
Pc (W)	Minimisé	115,03	496,96	Aucun	Aucun	1
MRR (cm^3/min)	Maximisé	25,12	452,16	Aucun	5	5

IV.8.1. Optimisation pour un objectif de la qualité

L'objectif choisi dans le premier cas, c'est une rugosité de surface minimale sans prendre par considération les autres paramètres de sortie. Donc on va calculer les conditions de coupe optimales pour arriver à l'objectif désiré. Ce cas est très intéressant pour les travaux de finition.

Le tableau IV.8 présente les résultats obtenus dans ce cas. Le graphique de contour est présenté dans la *figure IV.22* ; Ils présentent les valeurs optimales des paramètres de coupe telle que la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap), avec une désirabilité de 0,973.

Tableau IV.8. Solutions pour l'optimisation de la qualité de surface (*Ra*)

Solutions						
Number	Vc	f	ap	Ra	Desirability	
1	628,000	0,080	1,000	0,542	0,973	Choisi

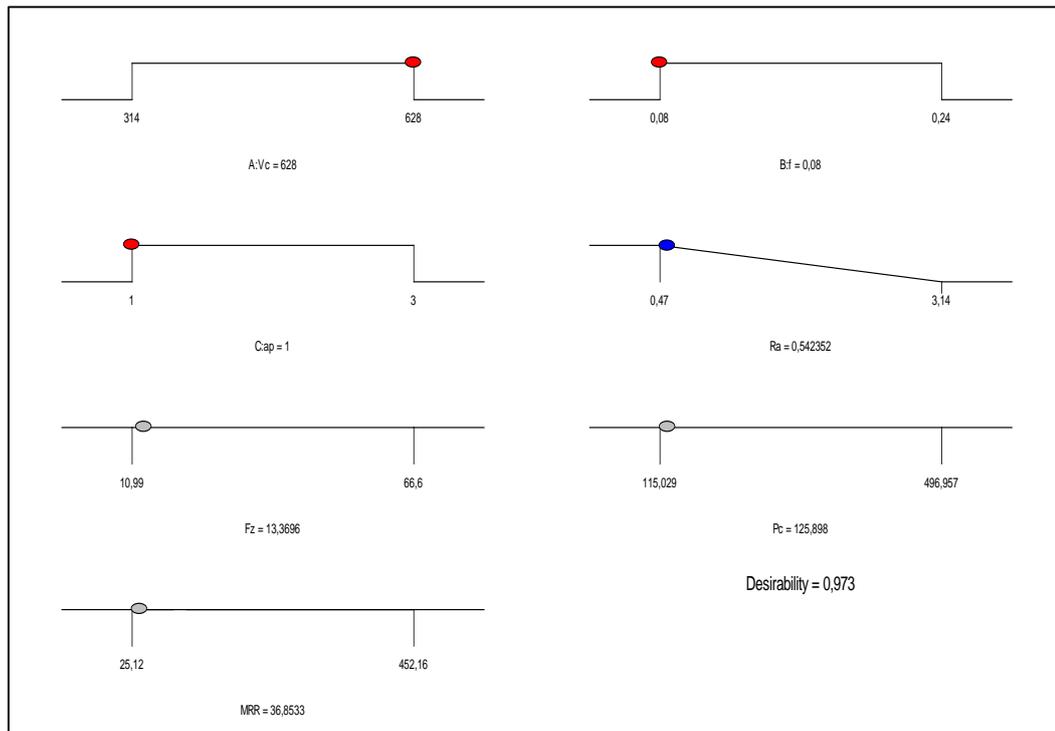


Figure IV.22. Graphique de l'optimisation de la rugosité de surface (optimisation de la qualité).

D'après **la figure IV.22**, les valeurs des paramètres de coupe optimaux pour obtenir une meilleure qualité de surface $Ra=0,54$ (μm) sont : $Vc = 628$ (m / min), $f = 0,08$ (mm/tr) et $ap= 1$ (mm).

IV.8.2. Optimisation pour un objectif de la productivité

L'optimisation de la productivité, comme son nom l'indique, a le but d'augmenter le rendement de la production indépendamment de la qualité de la surface des pièces usinées. Notre but donc est de maximiser le débit du coupeau enlevé (*MRR*). Ce cas est très intéressant pour les travaux dégrossissage pour les pièces mécanique.

Les résultats obtenus sont présentés dans **le tableau IV.9** et **la figure IV.23**.

Tableau IV.9. Solutions pour l'optimisation du débit de coupe enlevé (*MRR*)

Solutions						
Number	<i>V_c</i>	<i>f</i>	<i>ap</i>	<i>MRR</i>	Desirability	
1	<u>628,00</u>	<u>0,24</u>	<u>3,00</u>	<u>438,773</u>	<u>1,000</u>	<u>Choisi</u>

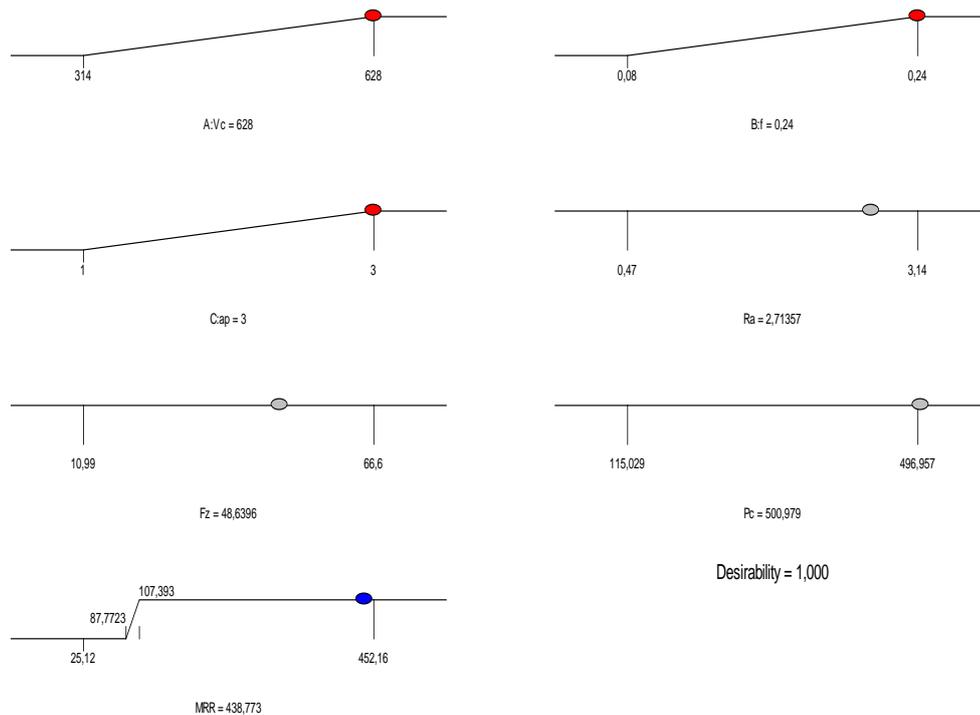


Figure IV.23. Graphique de l'optimisation du débit de coupe enlevé (optimisation de la productivité).

Les valeurs des paramètres de coupe optimaux pour augmenter la production sont :

***V_c* = 628 (m /min), *f* = 0,24 (mm /tr) et *ap* = 3,00 (mm).** Le débit de coupe enlevé est ***MRR* = 438,773 (cm³ /min).**

IV.8.3. Optimisation combinée

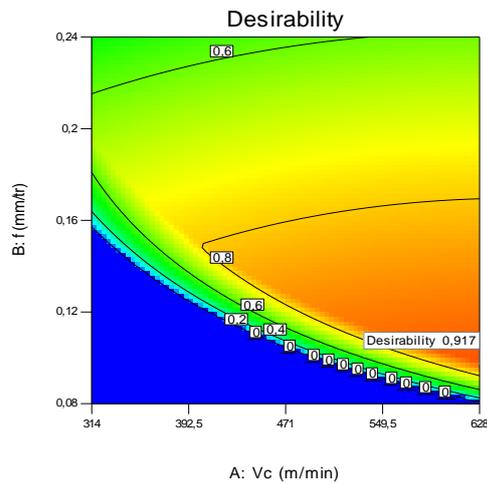
Dans le cas de l'optimisation combinée, un avantage intéressant consiste à avoir une productivité élevée et une bonne qualité de surface en même temps, et c'est ce qu'il est visé dans l'industrie. Le **tableau IV.10** présente les résultats des solutions proposées obtenus dans ce cas d'optimisation. Les graphiques de contour sont présentés dans la **figure IV.24**, ils présentent

les valeurs optimales des paramètres de coupe telle que la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap).

Tableau IV.10. Solutions pour l'optimisation combinée

Solutions									
Numéro	V_c ; (m/min)	f ; (mm/tr)	ap ; (mm)	Ra ; (μm)	Fz ; (N)	Pc ; (W)	MRR ; (cm^3/min)	Désirabilité	
1	<u>628,000</u>	<u>0,097</u>	<u>1,803</u>	<u>0,731</u>	<u>21,487</u>	<u>218,578</u>	<u>107,394</u>	<u>0,917</u>	Choisi
2	627,998	0,097	1,794	0,731	21,500	218,605	107,394	0,917	
3	628,000	0,098	1,785	0,731	21,513	218,629	107,394	0,917	
4	627,998	0,096	1,818	0,731	21,465	218,532	107,393	0,917	
5	627,997	0,098	1,778	0,731	21,523	218,651	107,395	0,917	
6	627,999	0,098	1,776	0,731	21,526	218,656	107,395	0,917	
7	627,927	0,095	1,826	0,732	21,456	218,518	107,393	0,917	
8	628,000	0,094	1,841	0,732	21,429	218,460	107,394	0,917	

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 All Responses
 1,000
 0,000
 X1 = A: V_c
 X2 = B: f
 Actual Factor
 C: $ap = 1,79649$



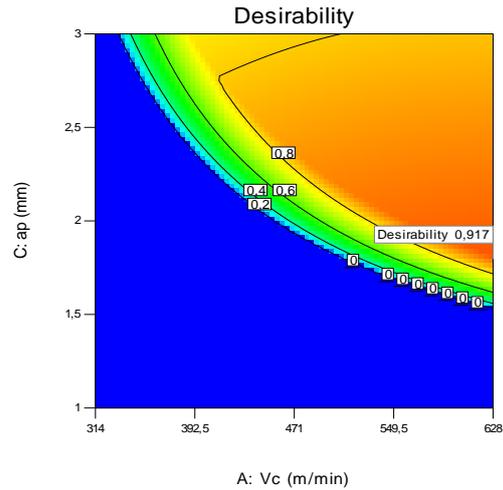
Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
All Responses



X1 = A: Vc
X2 = C: ap

Actual Factor
B: f = 0,0970903

b



Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
All Responses



X1 = B: f
X2 = C: ap

Actual Factor
A: Vc = 627,997

c

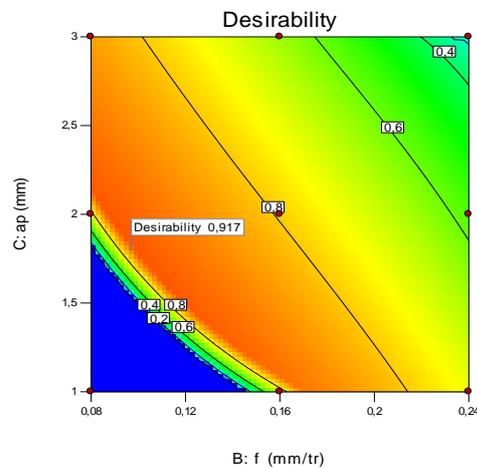


Figure IV.24. Graphique de contour de désirabilité.

La *figure IV.25* présente les résultats de l'optimisation. Les valeurs des paramètres de coupe optimaux se révèlent comme suit : $Vc = 628$ (m /min), $f = 0,097$ (mm /tr) et $ap = 1,80$ (mm). La rugosité de surface optimisée et le volume de coupe enlevé sont les suivants ($Ra = 0,731$ (μm), $Fz=21,49$ (N), $Pc=218,58$ (W) et $MRR = 107,394$ (cm^3 / min)). La *figure IV.26* présente le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses ainsi que les désirabilités combinés=0,917.

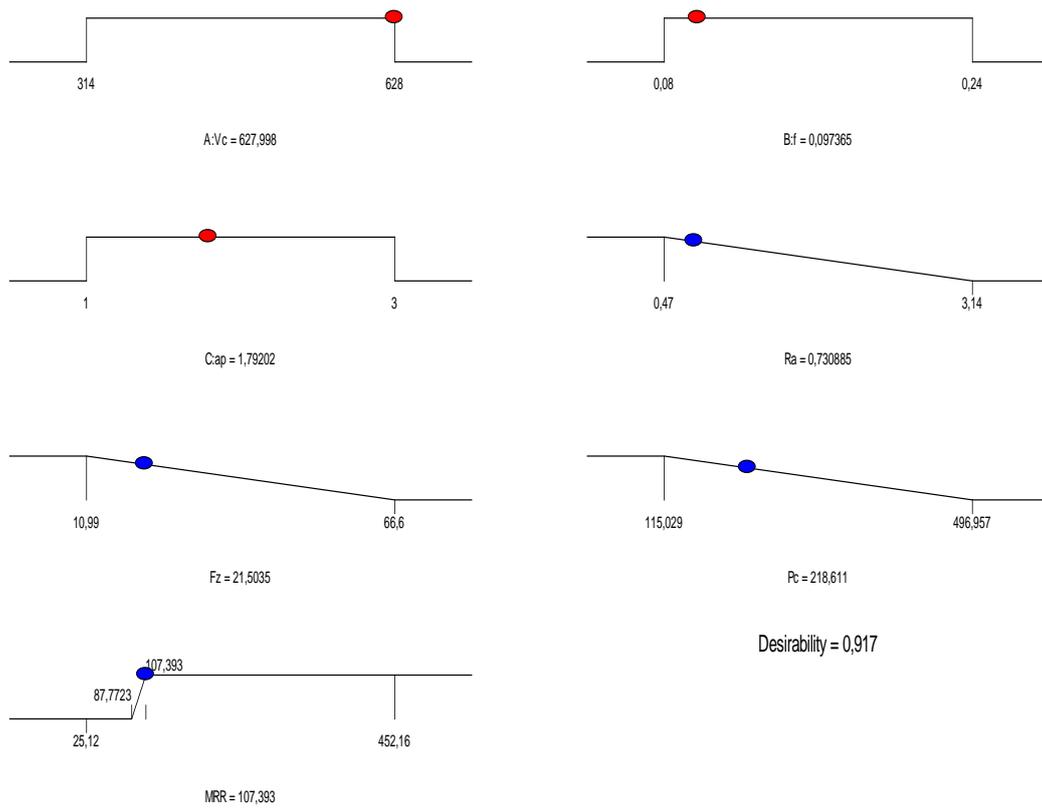


Figure IV.25. Graphique de l'optimisation combinée de (Ra), (Fz), (Pc) et (MRR).

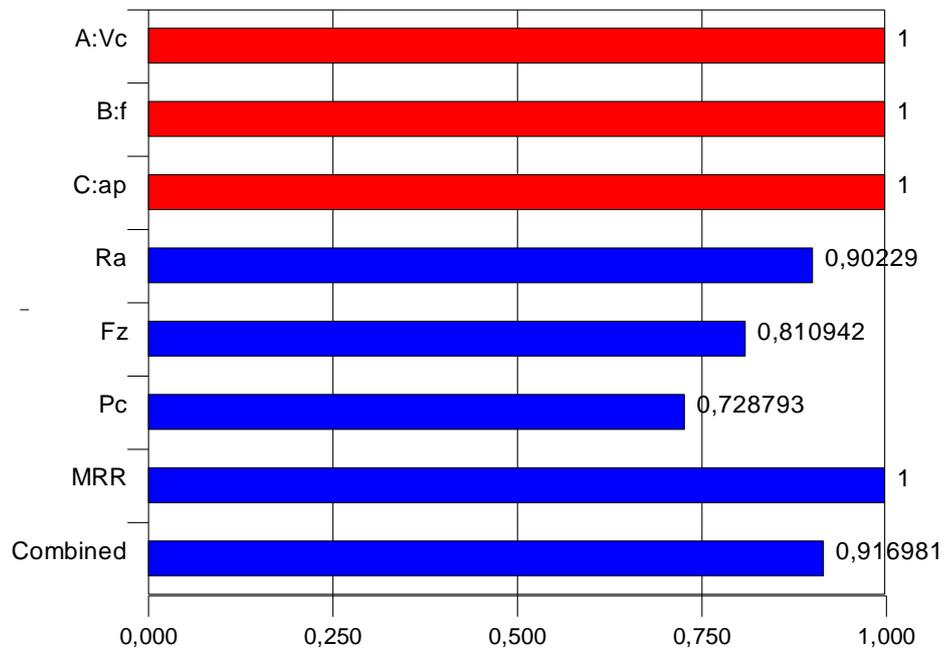


Figure IV.26. Barres analogiques des desirabilités des conditions de coupe et des réponses ainsi que les desirabilités combinés=0,917.

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression en tournage conventionnel du Polyoxyméthylène (POMC) avec un outil de coupe en carbure métallique a permis d'obtenir des modèles mathématiques de la rugosité de surface arithmétique (Ra), l'effort tangentiel de coupe (Fz), la puissance de coupe (Pc) et aussi le débit du copeau enlevé (MRR) en fonction des paramètres d'usinage (Vc, f et ap).

Les modèles trouvés sont exploités pour l'optimisation suivant trois objectifs (rugosité minimale ; débit de copeau enlevé maximal et rugosité de surface et volume de copeau enlevé ensemble).

Chapitre V

*Application des (ANN) pour
modéliser (Ra) et (Fz) lors de
l'usinage du POMC*

V.1. Introduction

Les réseaux de neurones formels sont devenus en quelques années des outils précieux dans des domaines très divers de l'industrie et des services. Néanmoins, ils n'ont pas encore atteint leur plein développement, pour des raisons plus psychologiques que techniques, liées aux connotations biologiques du terme, et au fait qu'ils sont considérés, à tort, comme des outils d'Intelligence Artificielle. Or l'intérêt des réseaux de neurones, dans le domaine des Sciences de l'ingénieur, ne doit rien à la métaphore biologique : il est uniquement dû aux propriétés mathématiques spécifiques de ces réseaux. Récemment, l'algorithme de réseau neuronal artificiel (ANN) est apparu comme l'une des méthodes les plus efficaces pour la modélisation empirique et l'optimisation, en particulier pour les systèmes non linéaires [73].

Dans ce chapitre, deux méthodes de modélisation ont été utilisées et comparées afin de modéliser les paramètres de sortie. Pour cela, nous avons utilisés les réseaux de neurones artificiels en se servant des résultats d'un plan d'expérience de 27 essais. Les modèles trouvés sont comparés aux modèles obtenus par la méthode RSM afin de déterminer la capacité de prédiction et la précision des deux méthodes.

V.2. Les réseaux de neurones artificiels

V.2.1. Définition

Un réseau neuronal artificiel (ANN) est un paradigme de traitement de l'information qui s'inspire de la façon dont les systèmes nerveux biologiques, tels que le cerveau, traitent l'information (*figure V.1*).

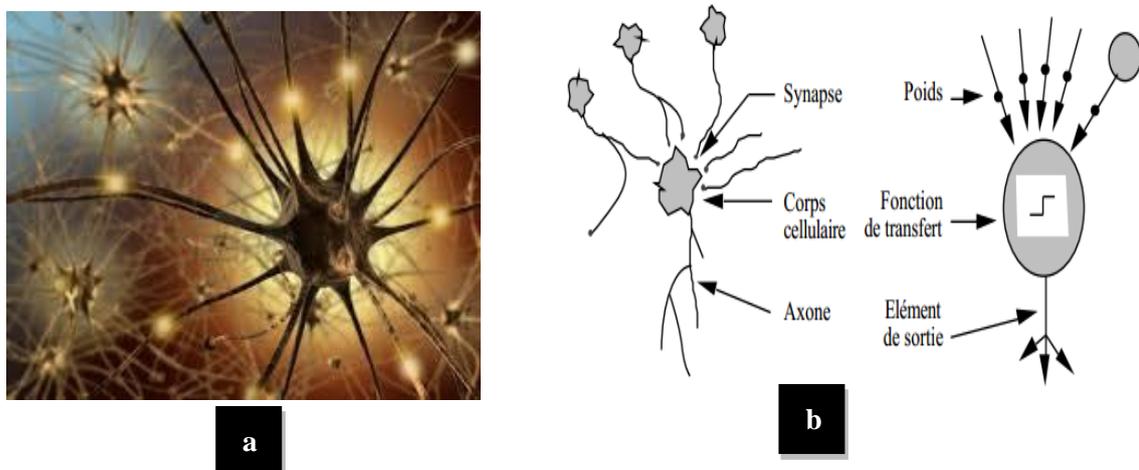


Figure V.1. a) Un neurone biologique [74] ; b) Analogie entre neurone biologique et neurone formel [75].

Un réseau neuronal artificiel consiste en une collection d'éléments de traitement hautement interconnecté et transformer un ensemble d'entrées à un ensemble de sorties désirées. Le résultat de la transformation est déterminé par les caractéristiques des éléments et les poids associés avec les interconnexions entre eux. En modifiant les connexions entre les nœuds, le réseau est capable de s'adapter aux résultats souhaités [76, 77].

Contrairement aux systèmes experts, qui peuvent fournir à l'utilisateur une réponse définitive si les caractéristiques qui sont examinées correspondent exactement à celles qui ont été codées dans la base de règles, un réseau neuronal analyse les informations et fournit une estimation de probabilité que les données correspondent aux caractéristiques qu'il a été entraîné à reconnaître. Alors que la probabilité d'une correspondance déterminée par un réseau de neurones peut être de 100%, l'exactitude de ses décisions repose entièrement sur l'expérience acquise par le système dans l'analyse d'exemples du problème énoncé.

Le réseau de neurones acquiert d'abord l'expérience en formant le système pour identifier correctement les exemples présélectionnés du problème. La réponse du réseau neuronal est revue et la configuration du système est affinée jusqu'à ce que l'analyse des données d'apprentissage par le réseau neuronal atteigne un niveau satisfaisant. En plus de la période de formation initiale, le réseau de neurones acquiert également de l'expérience au fil du temps en effectuant des analyses sur les données liées au problème.

V.2.2. Composantes d'un réseau de neurones artificiel

V.2.2.1. Neurone formel

La figure V.2 montre la structure d'un neurone artificiel. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w (*abréviation de weight*) représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval. À chaque connexion est associé un poids.

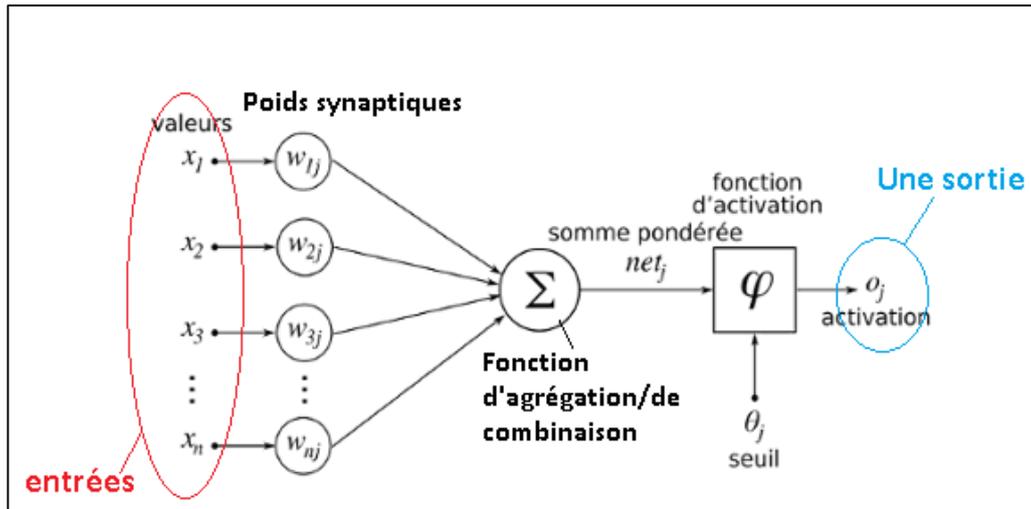


Figure V.2. Schéma d'un neurone formel [78].

V.2.2.2. Comportement (fonctions de transfert)

La première phase est habituellement le calcul de *la somme pondérée des entrées* (a) selon l'expression suivante :

$$a = \sum(w_i \times e_i) \quad (\text{V.1})$$

À partir de cette valeur, une fonction de transfert calcule la valeur de l'état du neurone. C'est cette valeur qui sera envoyée aux neurones avals. Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert. Les plus courantes sont présentées sur *la figure V.3*.

On remarquera qu'à la différence des neurones biologiques dont l'état est binaire, la plupart des fonctions de transfert sont continues, offrant une infinité de valeurs possibles comprises dans l'intervalle $[0, +1]$ (ou $[-1, +1]$).

Nom de la fonction	Relation d'entrée/sortie	Icône
seuil	$a = 0$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
seuil symétrique	$a = -1$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
linéaire	$a = n$	
linéaire saturée	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $0 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
linéaire saturée symétrique	$a = -1$ si $n < -1$ $a = n$ si $-1 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
linéaire positive	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $n \geq 0$	
sigmoïde	$a = \frac{1}{1+\exp^{-n}}$	
tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	
compétitive	$a = 1$ si n maximum $a = 0$ autrement	

Figure V.3. Types de fonctions de transfert [79].

V.2.2.3. Perceptron

Le Perceptron (un seul neurone) en phase d'utilisation (figure V.4).

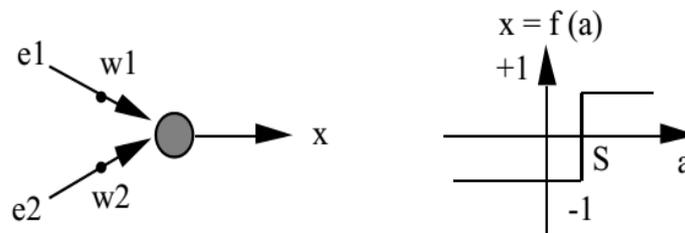


Figure V.4. Structure et comportement du perceptron

On distingue deux types de perceptron : Perceptron simple et Perceptron multi-couches.

- Perceptron simple

Pour faciliter l'étude des comportements du perceptron, il est courant d'utiliser un perceptron d'une forme plus simple que celle définie par le modèle générale. Dans ce cas :

- Les valeurs de sorties de toutes les cellules (rétine, association, décision) sont binaires en 0 et 1.

- Les fonctions réalisées par les cellules d'associations sont des fonctions booléennes et les cellules de décision sont des automates à seuil.
- Il n'existe pas de connexion entre deux cellules d'association, ni entre deux cellules de décisions.
- Les connexions entre cellules d'association et cellules de décision sont à sens unique association décision.

La figure V.5 présente un schéma de principe d'un perceptron simple.

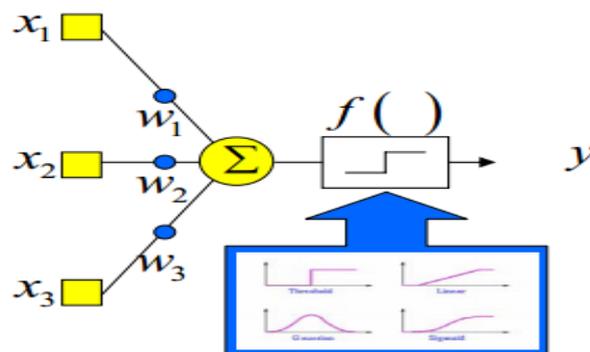


Figure V.5. Principe d'un perceptron simple [80].

- *Perceptron multi-couches*

Le perceptron multi-couches est un type de réseau neuronal formel organisé en plusieurs couches au sein desquelles une information circule de la couche d'entrée vers la couche de sortie uniquement (figure V.6). Chaque couche est constituée d'un nombre variable de neurones, les neurones de la dernière couche (dite « de sortie ») étant les sorties du système global.

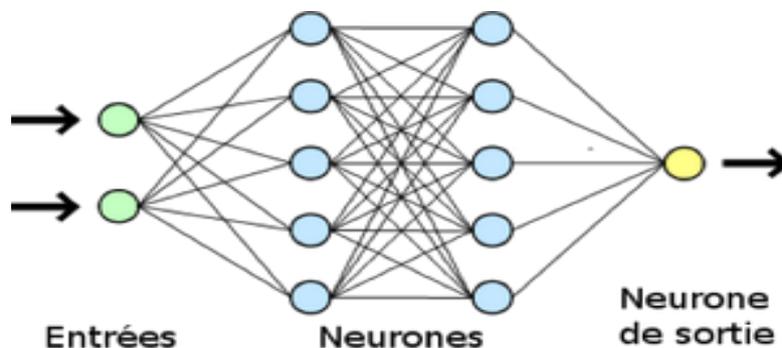


Figure V.6. Perceptron multi-couches : 02 entrées + 02 couches cachées (10 neurones) et 01 sortie.

V.2.2.4. Apprentissage des Réseaux de Neurones

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement. La procédure de l'apprentissage d'un réseau de neurones est expliquée dans *la figure V.7*.

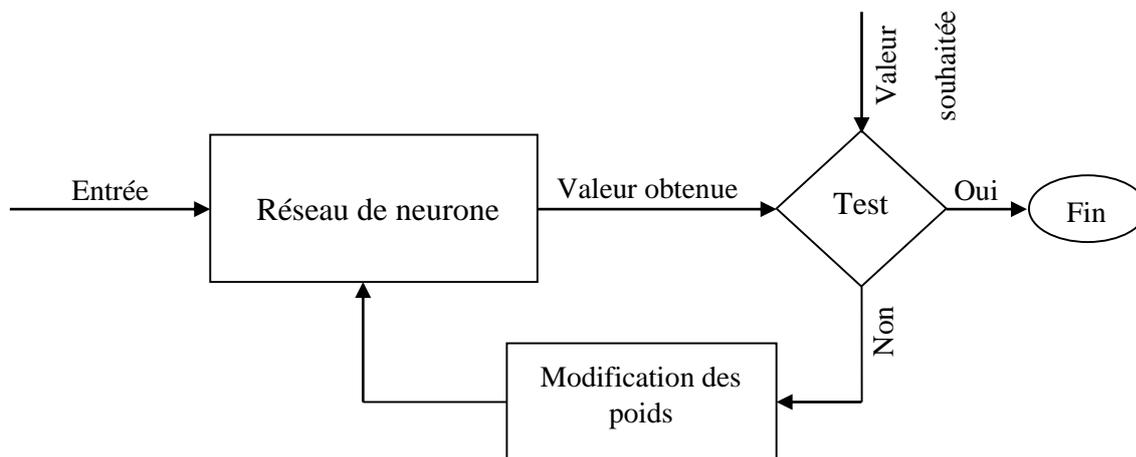


Figure V.7. Système d'apprentissage du réseau de neurone [81].

Les procédures d'apprentissage peuvent se subdiviser, elles aussi, en deux grandes catégories : *supervisé* ou *non supervisé*

- *Apprentissage supervisé*

Dans ce cas, la connaissance a priori de la sortie désirée est nécessaire. On présente au réseau le vecteur d'entrée puis on calcule sa sortie, cette dernière sera comparée avec la sortie désirée, ensuite les poids sont ajustés de façon à réduire l'écart entre elles. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère de performance soit satisfait.

- *Apprentissage non supervisé*

L'apprentissage non supervisé copie le fonctionnement du cerveau humain qui retrouve les informations par association. On présente à l'entrée du réseau des exemples connus et le réseau s'organise lui-même autour d'attracteurs qui correspondent à des configurations stables du modèle dynamique non linéaire associé au réseau. L'apprentissage est accompli à l'aide de règles qui changent ou adaptent le poids des coefficients synaptiques en fonction des exemples présentés à l'entrée et dans certains cas en fonction des sorties désirées. Alors aucune sortie désirée n'est fixée, aucune erreur n'est calculée [81].

V.2.2.5. Algorithme de Rétro propagation

La rétro propagation est le paradigme des réseaux de neurones le plus utilisé. Le terme se réfère à un algorithme pour ajuster les poids de connexions en un réseau de neurones multi couches. La rétro propagation est basée sur des principes mathématiques. Pour l'appliquer il suffit d'avoir des données d'entrée et des données de sorties. Cependant, toute information que possède un réseau de neurones est représentée par les poids d'interconnexions, cette information est acquise durant la phase d'apprentissage.

La rétro propagation est basée sur l'adaptation des coefficients synaptiques dites encore des coefficients de pondération dans le but de minimiser une fonction de coût (performance) donnée par :

$$E(W) = \sum_{P=1}^P E_P(W) \quad (\text{V.2})$$

$$E_P(W) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (t_{Pi} - O_{Pi})^2 \quad (\text{V.3})$$

Ou : t_{Pi} et O_{Pi} représentent respectivement la sortie désirée (*target*) et la sortie du réseau (*output*) ; P : Le nombre d'exemples ou de la longueur de l'ensemble des entraînements.

L'adaptation (ajustement, mise en forme) des coefficients synaptique, se fait par la méthode du gradient basée sur la formule itérative suivante :

$$W_{ij}(n+1) = W_{ij}(n) + \Delta W_{ij}^{(\text{époque})} \quad (\text{V.4})$$

$$\Delta_P W_{ij} = -\eta \times \frac{\partial E_P}{\partial W_{ij}} \quad (\text{V.5})$$

n : représente le numéro d'itération.

η : représente le pas d'apprentissage. Ce facteur influe sur la vitesse de convergence du réseau.

La dérivée partielle de $E(W)$ par rapport à chaque poids du réseau, pour cela et on utilisant la règle de delta généralisée. Nous devons charger notre poids liés à :

$$\Delta_P W_{ij} = \eta \times \delta_{Pi} \times O_{Pj} \quad (\text{V.6})$$

Avec :

O_{Pj} : Sortie du neurone j pour un exemple P .

δ_{Pi} : L'erreur commise à la sortie du neurone i pour l'exemple P . Posant maintenant :

$$\delta_{Pi} = -\frac{\partial E_P}{\partial S_{Pi}} = (t_{Pi} - O_{Pi}) \quad (\text{V.7})$$

L'astuce est de calculer δ_{Pi} pour chaque neurone dans le réseau. Le résultat intéressant que nous avons dérivé maintenant, est qu'il y a un simple calcul récursif de ces δ qui peuvent être implémentés par la rétro propagation du signal d'erreur à travers le réseau.

Pour la couche de sortie :

$$\delta_{Pk} = (t_{kP} - O_{kP})(1 - O_{kP}); \quad k= 1, \dots, k \quad (\text{V.8})$$

Pour la couche cachée :

$$\delta_{Pi} = O_{Pi}(1 - O_{Pi}) \sum \delta_{Pk} W_{kj}; \quad j= 1, \dots, j \quad (\text{V.9})$$

Où j est le nombre de neurones dans la couche cachée. Le processus d'apprentissage est initialisé en attribuant de petites valeurs de poids à toutes les connexions. Les paires entrée-sortie sont présentées un par un et leur poids sont mis à jour à chaque fois. La moyenne des carrés des erreurs (\bar{E}) est calculée à la fin de chaque itération pour toutes les paires comme suit :

$$\bar{E} = \frac{1}{R} \sum_{P=1}^R \frac{1}{NA} \sum_{k=1}^N (S_{kP} - y_{kP})^2 \quad (\text{V.10})$$

Où R est le nombre d'échantillon d'apprentissage.

Le processus d'apprentissage s'arrêtera lorsque l'objectif défini de \bar{E} ou le nombre maximal d'itérations sera atteint [82].

V.2.2.6. Taux d'apprentissage

Le taux d'apprentissage dans les réseaux de neurones artificiels est un paramètre qui favorise la modification de l'erreur vers le minimum souhaité. Il contrôle la vitesse d'ajustement des pondérations. Ce taux peut être fixe (élevé ou faible), comme il peut être variable du plus fort au plus faible, de plus en plus que E converge vers la valeur de sortie souhaitée.

V.3. Modélisation des paramètres de performance par réseaux de neurones artificiels

Afin de modéliser les paramètres de performance de la rugosité de surface (Ra) et l'effort tangentiel de coupe (Fz) lors du tournage du polymère POM C, nous avons employé un perceptron multicouche. À cet effet, un plan expérimental de 27 essais a été utilisé. Nous avons

utilisé un logiciel de calcul «JMP 10» pour l'apprentissage et la validation des réseaux. Les données expérimentales utilisées pour établir les modèles des différents paramètres étudiés sont présentées dans *le tableau (V.1)*.

Tableau V.1. Résultats expérimentaux des paramètres de performance

N°	Facteurs			Réponses	
	V_c , m/min	f , mm/tr	ap , mm	Ra , μm	Fz , N
1	314	0,08	1	0,67	22,38
2	314	0,08	2	1,22	29,12
3	314	0,08	3	1,61	34,99
4	314	0,16	1	1,40	28,50
5	314	0,16	2	1,61	41,63
6	314	0,16	3	1,98	50,45
7	314	0,24	1	2,02	32,67
8	314	0,24	2	2,58	53,41
9	314	0,24	3	3,14	66,60
10	440	0,08	1	0,56	19,70
11	440	0,08	2	1,13	22,98
12	440	0,08	3	1,07	30,82
13	440	0,16	1	1,13	24,28
14	440	0,16	2	1,22	39,48
15	440	0,16	3	1,79	47,11
16	440	0,24	1	1,98	28,08
17	440	0,24	2	2,18	39,94
18	440	0,24	3	3,01	56,41
19	628	0,08	1	0,47	10,99
20	628	0,08	2	0,87	18,46
21	628	0,08	3	1	27,09
22	628	0,16	1	1,03	20,94
23	628	0,16	2	1,16	32,35
24	628	0,16	3	1,42	42,18
25	628	0,24	1	1,65	21,33
26	628	0,24	2	2,01	32,97
27	628	0,24	3	2,98	47,48

V.3.1. Modélisation de la rugosité de surface (Ra) par un réseau de neurones artificiel

La conception expérimentale se compose de 27 essais : 23 sont utilisés pour l'apprentissage du réseau et 4 sont arbitrairement choisis pour valider le réseau. L'apprentissage du réseau neuronal est effectué par un algorithme de rétro propagation, qui repose sur la méthode de la descente en gradient. Avant de faire le choix de la structure optimale, plusieurs structures de réseau ont été testées. La structure optimale est choisie selon le coefficient de corrélation R^2 et l'erreur racine carrée (RMSE) pour les ensembles d'apprentissage et de validation. Dans notre cas nous avons adopté la structure 3-5-1 (figure V.8). Elle est composée de trois nœuds dans la couche d'entrée, ce qui correspond au nombre de paramètres de coupe (Vc , f et ap), cinq nœuds dans la couche cachée ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique et un nœud dans la couche de sortie ayant une fonction de transfert linéaire.

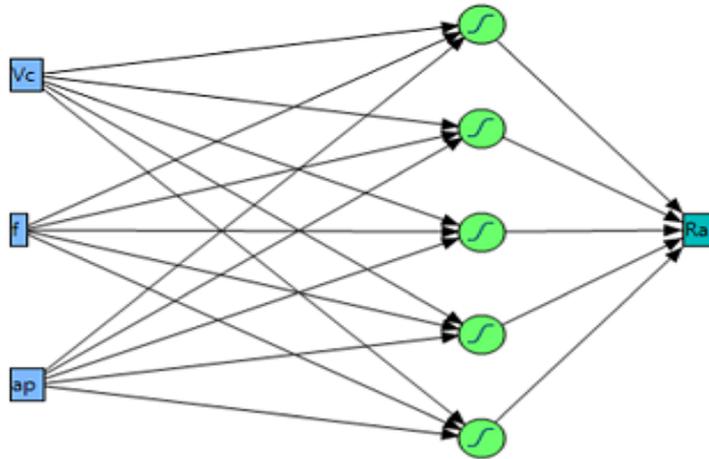


Figure V.8. Architecture neurale choisie pour la rugosité (Ra).

Les équations ci-dessous de H_1 à H_5 sont obtenues par la méthode des réseaux de neurones artificiels. Ils présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée.

$$\left. \begin{aligned}
 H_1 &= \tanh(0,5 \times (0,00102 \times Vc - 2,0243 \times f - 1,3173 \times ap + 2,4759)); \\
 H_2 &= \tanh(0,5 \times (0,0019 \times Vc + 14,1623 \times f - 0,1530 \times ap - 4,0373)); \\
 H_3 &= \tanh(0,5 \times (-0,0044 \times Vc - 6,4026 \times f + 0,3529 \times ap - 2,7273)); \\
 H_4 &= \tanh(0,5 \times (0,0032 \times Vc - 13,9206 \times f - 0,7324 \times ap + 2,5319)); \\
 H_5 &= \tanh(0,5 \times (-0,0011 \times Vc + 17,0501 \times f + 1,3700 \times ap - 4,7352));
 \end{aligned} \right\} \quad (V.11)$$

La somme des sorties des 5 neurones de la couche cachée multipliée par une fonction de transfert linéaire nous donne le modèle mathématique de la rugosité de surface (Ra) donné par l'équation (V.12).

$$Ra = -1,6384 \times H1 + 1,5791 \times H2 + 0,1739 \times H3 - 2,3481 \times H4 - 2,2761 \times H5 + 2,7517 \quad (\text{V.12})$$

Le tableau (V.2) présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation). Ce dernier indique pour le groupe d'apprentissage et celui de validation que les coefficients de détermination R^2 sont respectivement (0,9464 et 0,9994) et les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (0,2401 et 0,0200), ce qui nous donne un coefficient de détermination globale $R^2 = 97, 29\%$. Ces résultats prouvent que le modèle neuronal explique très bien la variation de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe.

Tableau V.2. Conditions de la modélisation de la rugosité de surface(Ra) par les ANN

	Apprentissage	Validation
R^2	0,9464	0,9994
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,2401	0,0200
Nombre de tests	23	4

La figure V.9 expose les tracés des valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondantes. En analysant cette figure, nous pouvons constater que les points d'intersection entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches de la ligne médiane pour les ensembles d'apprentissage et de validation (avec une inclinaison de 45°), ce qui prouve l'efficacité du modèle des ANN.

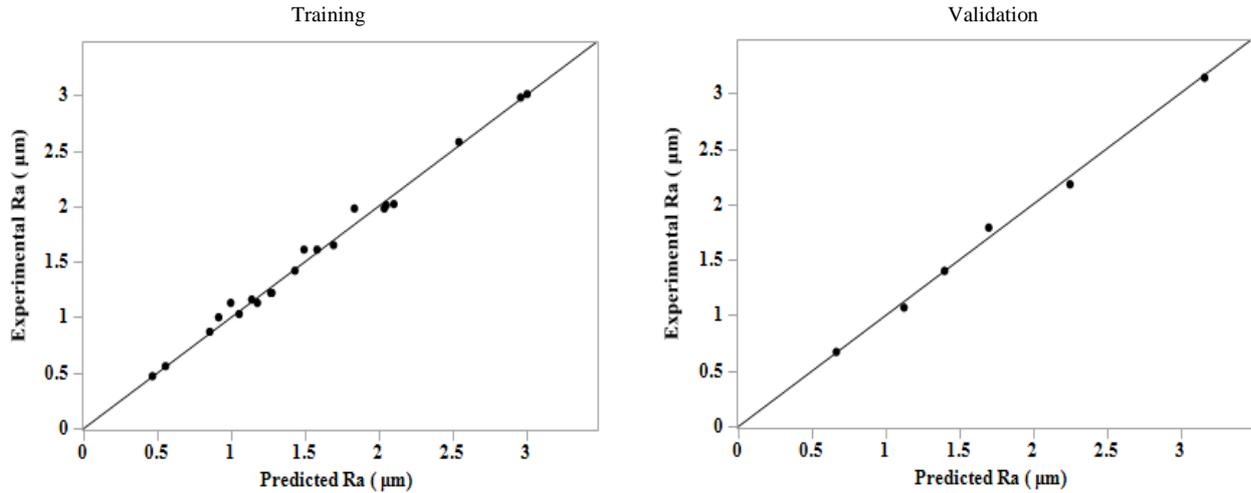


Figure. V.9. Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra).

V.3.2. Modélisation de l'effort tangentiel de coupe (Fz) par un réseau de neurones artificiel (ANN)

Les mêmes étapes pour l'application de l'approche des ANN sont considérées pour le modèle de l'effort tangentiel de coupe (Fz). Selon le coefficient de corrélation R^2 et l'erreur de la racine moyenne carrée (RMSE) pour les ensembles d'apprentissage et de validation, l'architecture adoptée est **3-7-1** (Figure V.10). Elle est composée de trois nœuds dans la couche d'entrée, sept nœuds dans la couche cachée ayant une fonction de transfert tangent hyperbolique et un nœud dans la couche de sortie ayant une fonction de transfert linéaire.

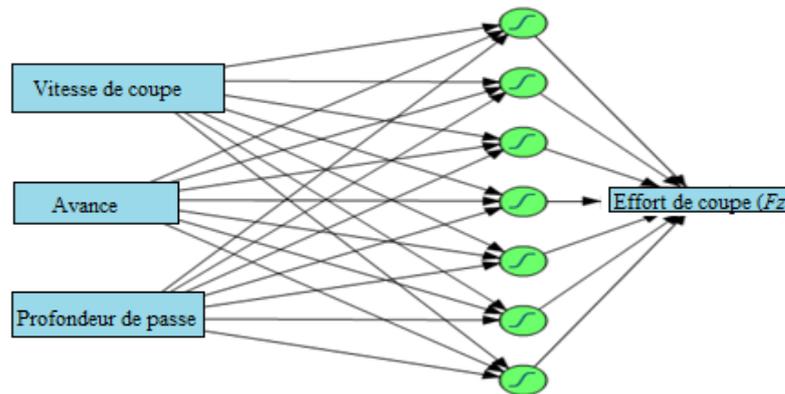


Figure.V.10 .Architecture neurale choisie pour l'effort (Fz).

Les équations des sorties de chaque neurone de la couche cachée (de H_1 à H_7) de l'effort tangentiel de coupe (Fz) sont données par les équations (V.13) :

$$\left. \begin{aligned}
 H1 &= \tanh(0,5 \times (0,0006 \times Vc - 11,7481 \times f + 1,4929 \times ap + 1,1212)); \\
 H2 &= \tanh(0,5 \times (-0,0147 \times Vc + 8,4132 \times f - 0,3640 \times ap + 6,5017)); \\
 H3 &= \tanh(0,5 \times (-0,0279 \times Vc - 42,3032 \times f + 2,4317 \times ap - 0,4152)); \\
 H4 &= \tanh(0,5 \times (0,0086 \times Vc + 28,9844 \times f - 2,5376 \times ap - 0,0306)); \\
 H5 &= \tanh(0,5 \times (0,0017 \times Vc - 15,0143 \times f + 0,0078 \times ap + 5,1553)); \\
 H6 &= \tanh(0,5 \times (0,0005 \times Vc + 18,5188 \times f - 0,4125 \times ap - 2,9456)); \\
 H7 &= \tanh(0,5 \times (0,0004 \times Vc + 1,1126 \times f + 1,1126 \times ap + 0,2648));
 \end{aligned} \right\} \quad (\text{V.13})$$

La somme des sorties des sept neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle mathématique de l'effort tangentiel de coupe (F_z) indiqué dans l'équation (V.14).

$$F_z = 126,5419 \times H1 + 16,5034 \times H2 - 6,4844 \times H4 - 100,8435 \times H5 + 59,9123 \times H6 + 41,5666 \times H7 + 44,7858 \quad (\text{V.14})$$

Le tableau (V.3) présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) de la structure optimale choisie. Ce dernier indique pour le groupe d'apprentissage et celui de validation que les coefficients de détermination R^2 sont respectivement (0,997 et 0,9926) et les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (0,636 et 2,338), ce qui nous donne un coefficient de détermination globale $R^2 = 99,48\%$.

Tableau V.3. Conditions de la modélisation de l'effort de coupe (F_z) par les ANN

	Apprentissage	Validation
R^2	0,997	0,9926
Erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,636	2,338
Nombre de tests	23	4

La figure V.11 illustre le tracé des valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondantes pour l'effort tangentiel de coupe (Fz). Il est bien vu que la majorité des points d'intersection sont proches de la ligne médiane, ce qui confirme la robustesse de la technique de modélisation des ANN.

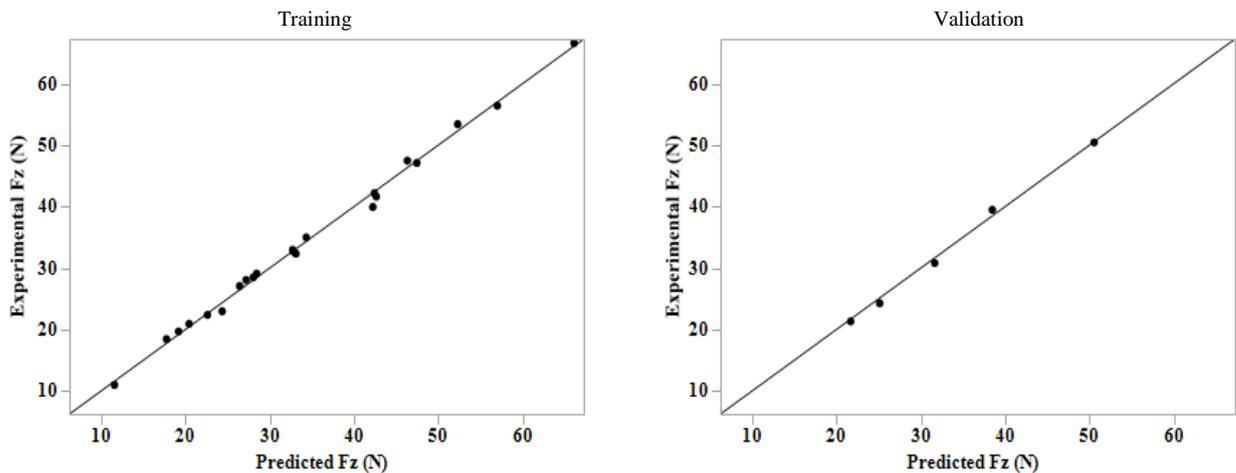


Figure. V.11. Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour l'effort de coupe (Fz).

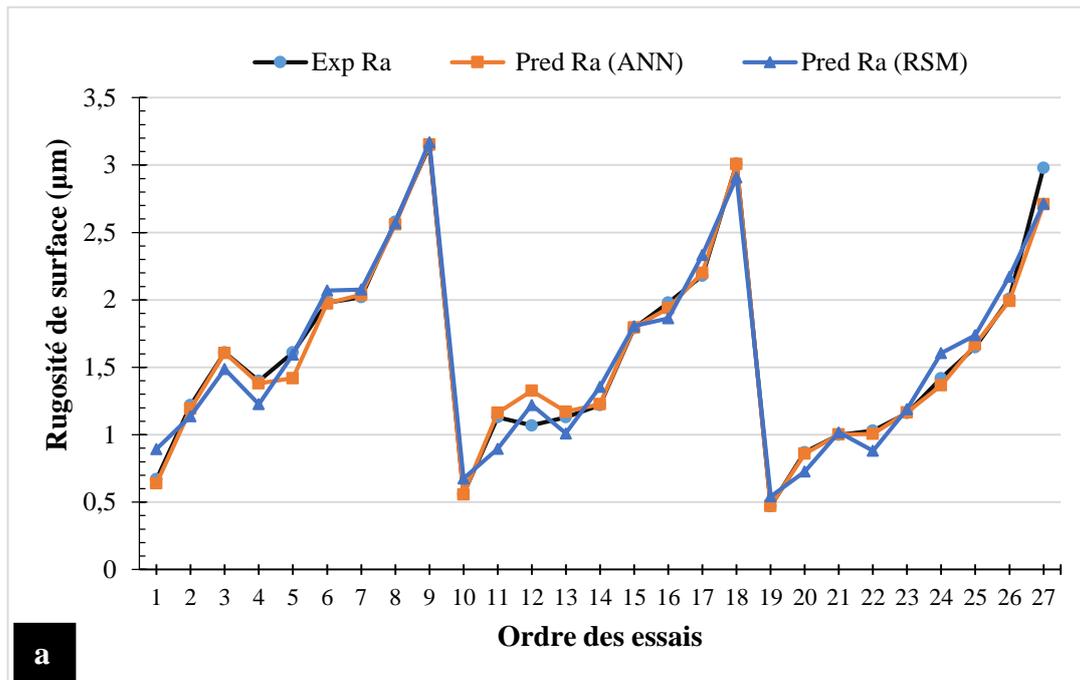
V.4. Comparaison des résultats obtenus par les ANN et la méthodologie de surface des réponses RSM

Le tableau (V.4) résume les résultats trouvés des coefficients de détermination R^2 des modèles de la rugosité de surface (Ra) et de l'effort tangentiel de coupe (Fz) développés en utilisant la méthode de la surface de réponse (RSM) et les réseaux neuronaux artificiels (ANN). On peut constater que les deux modèles donnent de bons résultats pour les deux paramètres étudiés (Ra et Fz). Les valeurs de R^2 obtenus par les modèles des ANN sont plus grandes que celles des modèles obtenues par RSM. Ce constat nous permet de dire que le modèle des ANN est clairement meilleur que celui obtenu par RSM pour (Ra) et (Fz), ce qui prouve la robustesse et la fiabilité de la méthode des ANN.

Tableau V.4. Coefficients de corrélation pour RSM et ANN

	Coefficient de détermination R^2 (%)	
	RSM	ANN
Rugosité de surface Ra ; (μm)	96,59	97,29
Effort tangentiel de coupe Fz ; (N)	98,15	99,48

Les valeurs expérimentales et prédites obtenues par les modèles RSM et ANN de la rugosité de surface (Ra) et de l'effort tangentiel de coupe (Fz) sont présentées dans **la figure V.12 (a et b)**. On remarque que la courbe du modèle obtenu par RSM de la rugosité de surface (Ra) et celle obtenu par le modèle des ANN sont parfaitement confondues avec la courbe des valeurs expérimentales exceptée à quelques points d'essai où nous pouvons noter une petite divergence. De même, pour l'effort tangentiel de coupe (Fz), il est clair que les points des trois courbes sont très proches. Comme on peut aussi remarquer que les valeurs données par le modèle des réseaux de neurones artificiels sont plus proches aux valeurs expérimentales que celles données par le modèle de la méthodologie des surfaces de réponse. Pour cela on peut dire que les modèles des ANN sont jugés les meilleurs par rapport aux modèles développés par RSM.



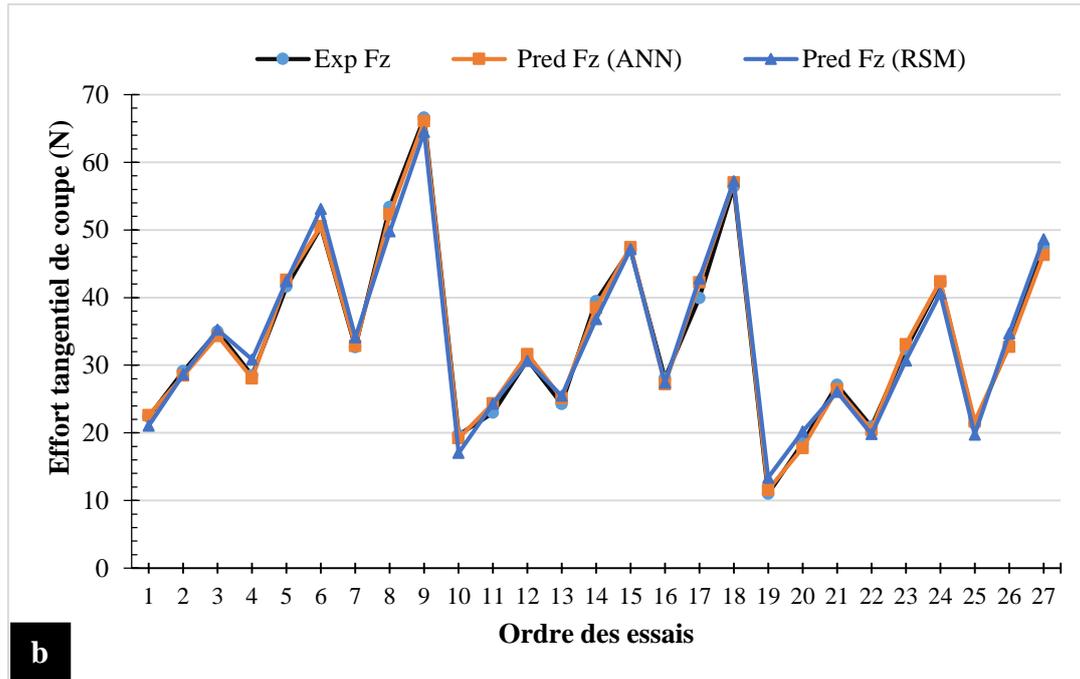


Figure V.12. Comparaison entre les valeurs expérimentales, prédites par RSM et ANN :

a) Rugosité de surface (Ra), b) Effort tangentiel de coupe (Fz).

V.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la technique des ANN pour développer des modèles de prédiction de la rugosité de surface (Ra) et de l'effort tangentiel de coupe (Fz). Ensuite, nous avons comparé les modèles obtenus par la méthode des ANN avec ceux développés par la méthodologie de surface de réponse (RSM). On a trouvé que l'application de la technique des ANN sur un nombre limité d'expériences est capable de donner des résultats très satisfaisants. D'autre part, on a trouvé que les résultats dépendent de la structure du réseau, qui peut être modifiée à travers le nombre des couches et des nœuds et les paramètres d'apprentissage jouent un rôle important dans l'amélioration du modèle. On peut conclure que les modèles obtenus par les ANN représentent bien la relation non linéaire entre les réponses étudiées et les paramètres d'usinage plus efficacement que les modèles de régression.

Chapitre VI

*Optimisation des conditions de
coupe selon : Taguchi, GRA et
DF*

VI.1 Introduction

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques, tels que les méthodes, Taguchi, GRA, GA, PSO, DF, etc.... [82].

Elle permet le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus. Ce qui a généralement un impact économique direct sur la production telle que : le temps technologique d'usinage ou le coût global d'opération. L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation de différentes méthodes d'optimisation.

- Optimisation mono-objectif : En utilisant la méthode de Taguchi.
- Optimisation multi-objectif : En utilisant l'analyse relationnelle grise (GRA).
- Optimisation multi-objectif : En utilisant la fonction de désirabilité (DF).

VI.2. Optimisation mono-objectif

VI.2.1 Méthode de Taguchi

L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit (S/N). Le signal représente la variable principale à l'entrée du procédé et le bruit représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie [83]. Le rapport (S/N) mesure les caractéristiques de qualité provenant des valeurs désirées. L'intérêt de la conception de Taguchi est que de multiples facteurs peuvent être considérés à la fois.

Dans cette étude, La plus faible rugosité de surface (Ra) et la plus élevée quantité de copeau enlevé d'autre part sont souhaitables. La caractéristique (S/N) la plus petite est la meilleure (*smaller-the-better*) a été utilisé pour la rugosité de surface (Ra) et la plus grande est la meilleure (*larger-the-better*) a été utilisé pour le débit du copeau enlevé (MRR).

VI.2.1.1. La démarche de la méthode de Taguchi

La démarche de Taguchi se présente en six étapes [84] :

- **Etape 1** : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.
- **Etape 2** : sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif. Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.
- **Etape 3** : construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans

que l'effet influe sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais.

- **Etape 4** : réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignait les réponses dans un tableau.
- **Etape 5** : Calculer le rapport S/N et analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).
- **Etape 6** : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus, sélectionnez les niveaux optimaux des paramètres du procédé et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.).

VI.2.1.2. Apport de la méthode Taguchi

✓ le ratio signal / bruit

La méthode classique fait intervenir pour chaque essai. La valeur moyenne des différentes mesures faite et ne tient pas directement compte de la dispersion des mesures. La supériorité de la méthode Taguchi, par rapport à la méthode classique des plans d'expériences, résulte de l'utilisation d'un indicateur de performance : le ratio signal / bruit. Il prend simultanément en compte : d'une part : l'objectif recherché (le signal), d'autre part, la dispersion de cette valeur (le bruit).

Les caractéristiques de qualité S/N , la plus petite est mieux et la plus grande est mieux sont calculées avec les équations suivantes :

- Le plus petit est le meilleur (*Smaller-the-better*) :

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

Où : n = nombre de répétitions

y_i = valeur observée de la réponse, Avec : $i = 1, 2, \dots n$.

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

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

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

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

Indépendamment de la catégorie des caractéristiques de performance, la plus grande valeur du rapport (S/N) correspond à la meilleure performance des caractéristiques. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres du processus est le niveau le plus élevé du rapport (S/N). En outre, une analyse statistique de variance (ANOVA) est effectuée pour voir lequel des paramètres de processus sont statistiquement significatifs.

Finalement, une expérience de confirmation conduit à vérifier le processus optimal des paramètres obtenus à partir de la conception des paramètres.

VI.2.1.3. Les matrices d'expériences fractionnaires Taguchi

La mise au point d'une matrice d'expériences fractionnaires orthogonale, spécialement adaptée à la réalisation d'une expérimentation donnée, n'est pas à la portée des non spécialistes. Une des contributions majeures de Taguchi est d'avoir mis au point des outils qui simplifient, et, surtout, fiabilisent considérablement cette tâche notamment une collection de matrices d'expériences fractionnaires orthogonales standard, qui s'avèrent suffisantes pour la quasi-totalité des situations industrielles. Chaque matrice est désignée par un symbole.

Par exemple :

- La table L9 (3^4) comporte 9 essais pour étudier un problème possédant au maximum 4 facteurs avec trois niveaux pour chacun (*tableau VI.1*).

Tableau VI 1. Matrice d'expériences L9 (4 facteurs à 3 niveaux) [85]

N° : essai	facteurs			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

- La table L16 (4^3) comporte 16 essais pour étudier un problème possédant au maximum 3 facteurs avec trois niveaux pour chacun (*tableau VI.2*).

Tableau VI.2. Table orthogonale de Taguchi L16 [85]

N° : essai	Facteurs		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

- La table L18 ($2^1 \times 3^7$) comporte 18 essais pour étudier un facteur à deux niveaux et 7 autres facteurs à trois niveaux (*tableau .VI.3*).

Tableau V.3. Table orthogonale de Taguchi L18 ($2^1 \times 3^7$) [85]

N° : essai	Facteurs							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	2	2	2	3	3
5	1	2	2	3	3	3	1	1
6	1	2	3	1	1	1	2	2
7	1	3	1	1	1	3	2	3
8	1	3	2	2	2	1	3	1
9	1	3	3	3	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	3	3	1	3	2
14	2	2	2	1	1	2	1	3
15	2	2	3	2	2	3	2	1
16	2	3	1	2	2	3	1	2
17	2	3	2	3	3	1	2	3
18	2	3	3	1	1	2	3	1

VI.2.1.4. Optimisation des conditions de coupe la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé

Dans le but d'optimiser la rugosité de surface (Ra) et le débit du copeau enlevé (MRR), lors de l'usinage à sec du Polyoxyméthylène (POM C) avec des plaquettes en carbure métallique, en fonction de la variation des paramètres de régime de coupe (Vc : vitesse de coupe, f : l'avance par tour et ap : profondeur de passe), nous avons utilisé la table orthogonale de Taguchi L16 (4^3) (*tableau .VI.4*).

La moyenne des ratios (S/N) pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios (S/N) pour le même niveau du facteur divisé par le nombre des ratios pour le niveau du facteur. Les valeurs relatives du rapport (S/N) les plus grandes permettront d'identifier le ou les designs optimaux. On peut estimer l'effet de chaque facteur sur le rapport (S/N) en effectuant une analyse de la variance. On peut donc ainsi identifier les facteurs de design les plus importants. De plus on peut déterminer la modalité optimale de chaque facteur [84, 86].

Tableau VI.4. Résultats expérimentaux et S/N pour (Ra) et (MRR)

ap ; (mm)	f ; (mm/tr)	Vc ; (m/min)	Ra ; (μm)	MRR ; (mm^3/min)	S/N (Ra)	S/N (MRR)
0,5	0,08	220	0,94	8800	-0,53744	78,890
0,5	0,12	310	1,35	18600	2,60668	85,390
0,5	0,16	440	1,83	35200	5,24902	90,931
0,5	0,2	500	2,34	50000	7,38432	93,979
1	0,08	310	1,02	24800	0,17200	87,889
1	0,12	220	1,23	26400	1,79810	88,432
1	0,16	500	1,94	80000	5,75603	98,062
1	0,2	440	2,85	88000	9,09690	98,890
1,5	0,08	440	1,21	52800	1,65571	94,453
1,5	0,12	500	1,41	90000	2,98438	99,085
1,5	0,16	220	1,67	52800	4,45433	94,453
1,5	0,2	310	2,01	93000	6,06392	99,370
2	0,08	500	1,21	80000	1,65571	98,062
2	0,12	440	1,33	105600	2,47703	100,473
2	0,16	310	1,47	99200	3,34635	99,930
2	0,2	220	3,13	88000	9,91089	98,890

a) Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra) et (MRR)

Le **tableau VI.5** expose les résultats de l'analyse de la variance pour (Ra). Cette analyse était faite pour les valeurs de P inférieure à 0,05 (ou 95% de confiance). L'analyse montre que l'avance (f) est le facteur dominant sur la qualité de surface. Sa contribution est (77,67%) suivie par le produit (f^2) avec une contribution de (6,31%). Les autres termes ont une contribution inférieure à 2%.

Ce résultat est en accord avec celui trouvé et expliqué dans **le chapitre IV** dans le point **IV.3.1**.

Tableau VI.5. Analyse de la variance (ANOVA) pour (Ra)

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont%
ap	1	0,021	0,078	0,837	0,391	0,35
f	1	4,724	0,032	0,344	0,576	77,67
Vc	1	0,028	0,006	0,064	0,808	0,46
$ap \times f$	1	0,062	0,081	0,869	0,382	1,02
$Vc \times f$	1	0,106	0,106	1,132	0,323	1,74
$ap \times ap$	1	0,004	0,004	0,045	0,838	0,07
$f \times f$	1	0,384	0,384	4,117	0,082	6,31
$Vc \times Vc$	1	0,099	0,099	1,06	0,337	1,63
Error	7	0,654	0,093			10,75
Total	15	6,082				100,00

b) Analyse de la variance (ANOVA) pour (MRR)

Le **tableau IV.6** présente les résultats d'analyse de variance pour le rapport (MRR). Il est clair que la profondeur de passe est le facteur qui a l'influence la plus significative sur le débit du copeau enlevé, sa contribution est de (58,64%), il est suivi par l'avance avec une contribution de (19,03%) puis la vitesse de coupe avec (14,48%) de contribution. Les interactions ($Vc \times f$, $Vc \times ap$ et $f \times ap$) et les produits (Vc^2 , f^2 et ap^2) ont des contributions qui varient de 0,17 à 2,94%.

Tableau VI.6. Analyse de la variance (ANOVA) pour (*MRR*)

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont%
<i>ap</i>	1	9,03E+09	23881280	0,4472	0,525087	58,64
<i>f</i>	1	2,93E+09	67090463	1,2564	0,299308	19,03
<i>Vc</i>	1	2,23E+09	7369719	0,138	0,721253	14,48
<i>ap*f</i>	1	4,53E+08	420964401	7,8834	0,026231	2,94
<i>Vc*f</i>	1	3,18E+08	318180637	5,9586	0,044692	2,06
<i>ap*ap</i>	1	3,14E+07	31360000	0,5873	0,468522	0,20
<i>f*f</i>	1	3,14E+07	31360000	0,5873	0,468522	0,20
<i>Vc*Vc</i>	1	2,55E+07	25500725	0,4776	0,51179	0,17
Error	7	3,74E+08	53398518			2,43
Total	15	1,54E+10				100,00

c) Analyse de régression : (*Ra*) et (*MRR*) en fonction de *Vc*, *f* et *ap*

Le traitement statistique des résultats nous a permis de proposer le modèle de (*Ra*) qui *est* donné par l'équation (VI.3) :

$$Ra = 2,06191 - 1,00276 \times ap - 10,5956 \times f - 0,002056 \times Vc + 0,065 \times ap^2 + 4,98883 \times ap \times f + 96,875 \times f^2 - 0,02888 \times Vc \times f + 1,02913e - 005 \times Vc^2 \quad (\text{VI.3})$$

Le coefficient de contribution est ($R^2=89,25\%$).

Le modèle de (*MRR*) est donné par l'équation. (VI.4). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 97,58\%$).

$$MRR = -9374,35 + 17530,8 \times ap - 483952 \times f - 72,2105 \times Vc - 5600 \times ap \times ap + 359407 \times ap \times f - 875000 \times f \times f + 1584,88 \times Vc \times f - 0,165186 \times Vc^2 \quad (\text{VI.4})$$

On remarque que les valeurs de R^2 sont égales à (89,25% et 97,58%) pour $S/N_{(Ra)}$ et $S/N_{(MRR)}$ respectivement. Ils sont proches de 1, ce qui indique l'adéquation du modèle qui peut être utilisée pour la prédiction dans les limites des facteurs étudiés.

d) Analyse des traces d'interactions (3D)

La **figure VI.1** (a, b et c) présente le tracé d'interaction (3D) pour (Ra). Il convient de noter que, la plus faible valeur du (Ra) est produite pour la combinaison des faibles valeurs de trois paramètres (f , ap et Vc). Par contre, pour la valeur maximale de (MRR), elle est produite par la combinaison des trois valeurs les plus élevées des paramètres (Vc , f et ap) comme il est indiqué dans la **figure VI.2**. (a, b et c).

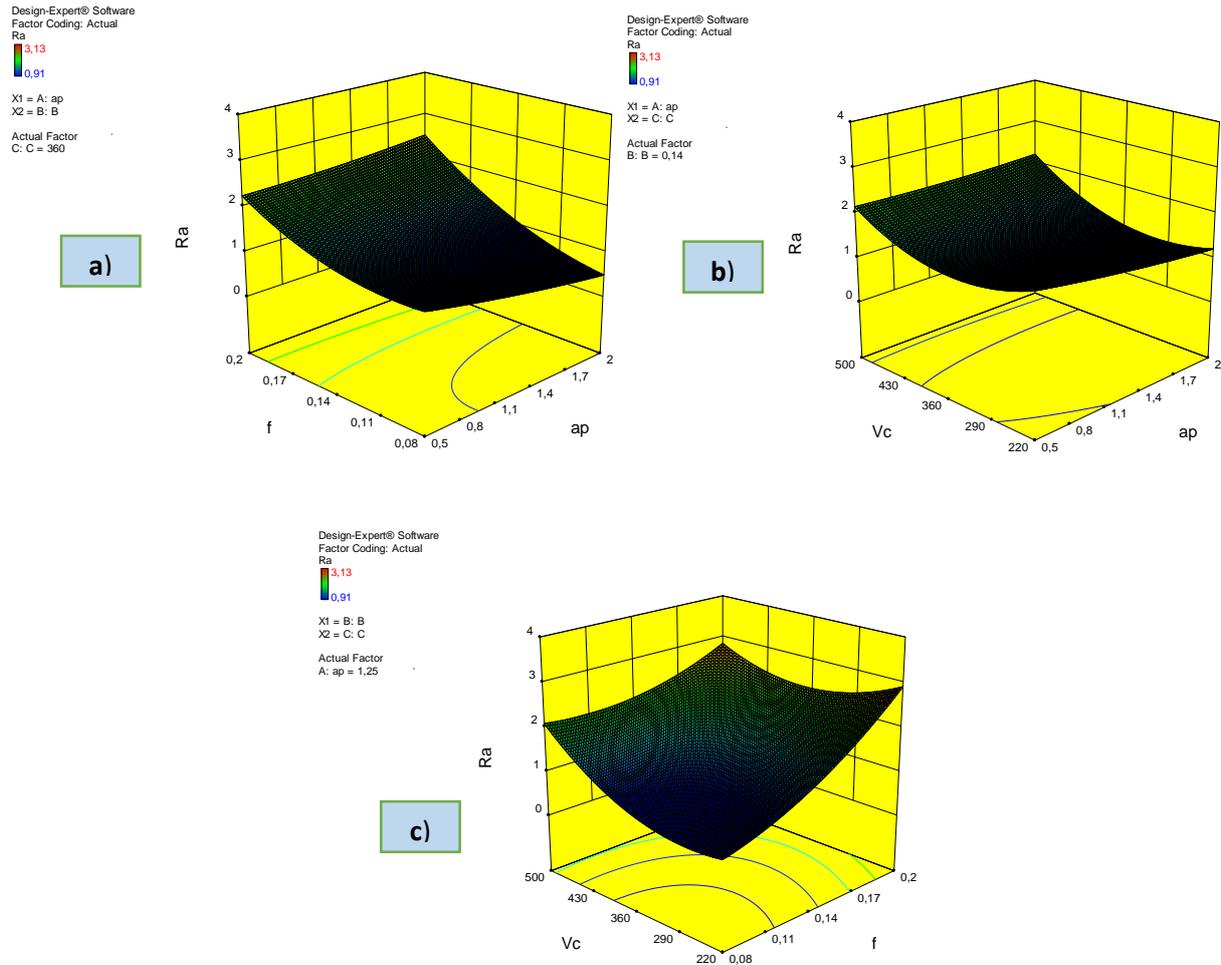


Figure VI.1. Tracé d'interaction (3D) pour (Ra).

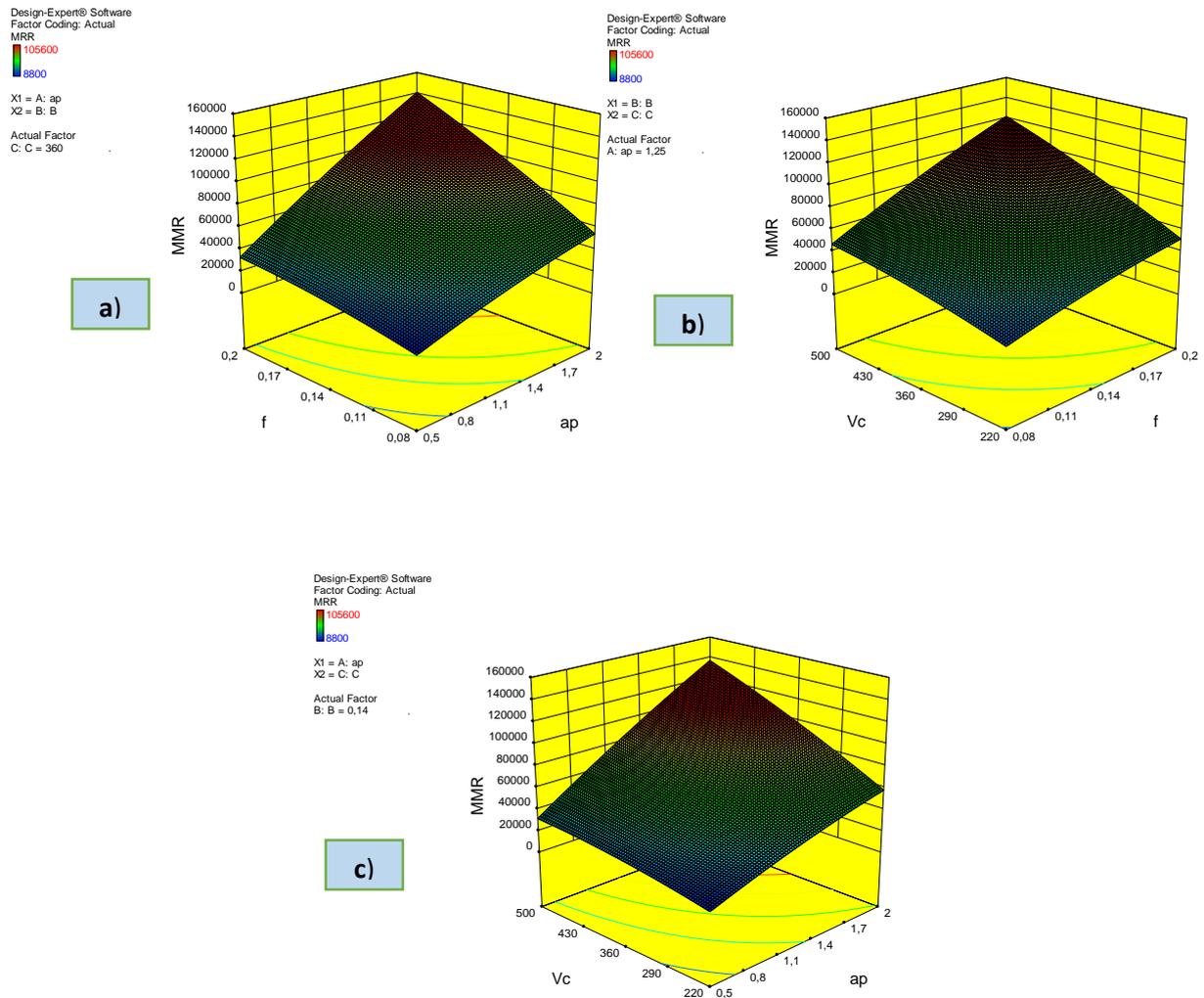


Figure VI.2. Tracé d'interaction (3D) pour (MRR).

e) Optimisation mono-objectif par la méthode de Taguchi

Les figures (VI.3 et VI.4) présentent les valeurs du régime optimal pour la rugosité de surface (Ra) et le débit du copeau enlevé (MRR) respectivement en utilisant le Minitab 18. Ces valeurs sont les suivantes : une profondeur de passe $ap=1,5$ (mm), la plus faible avance $f=0,08$ (mm/tr) et une vitesse de coupe $Vc=310$ (m/min) pour la rugosité (Ra), et la plus grande valeur de la profondeur de passe $ap=2$ (mm), la plus grande valeur de l'avance $f=0,2$ (mm/tr) et la vitesse de coupe maximale $Vc=500$ (m/min) pour le débit du copeau enlevé (MRR). Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence dans des cercles.

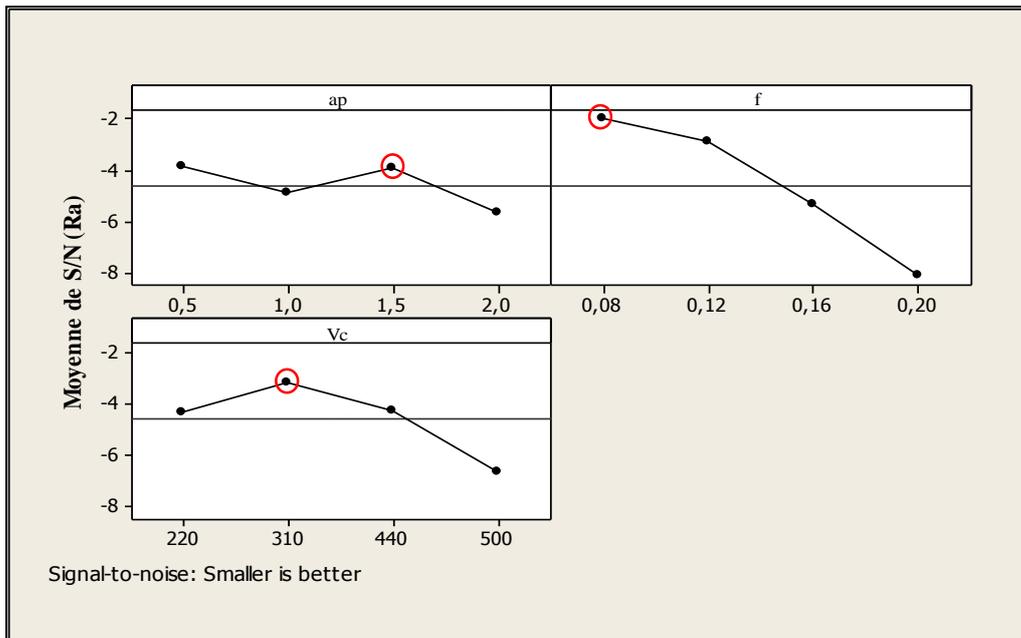


Figure VI.3. Graphique des effets principaux pour (Ra).

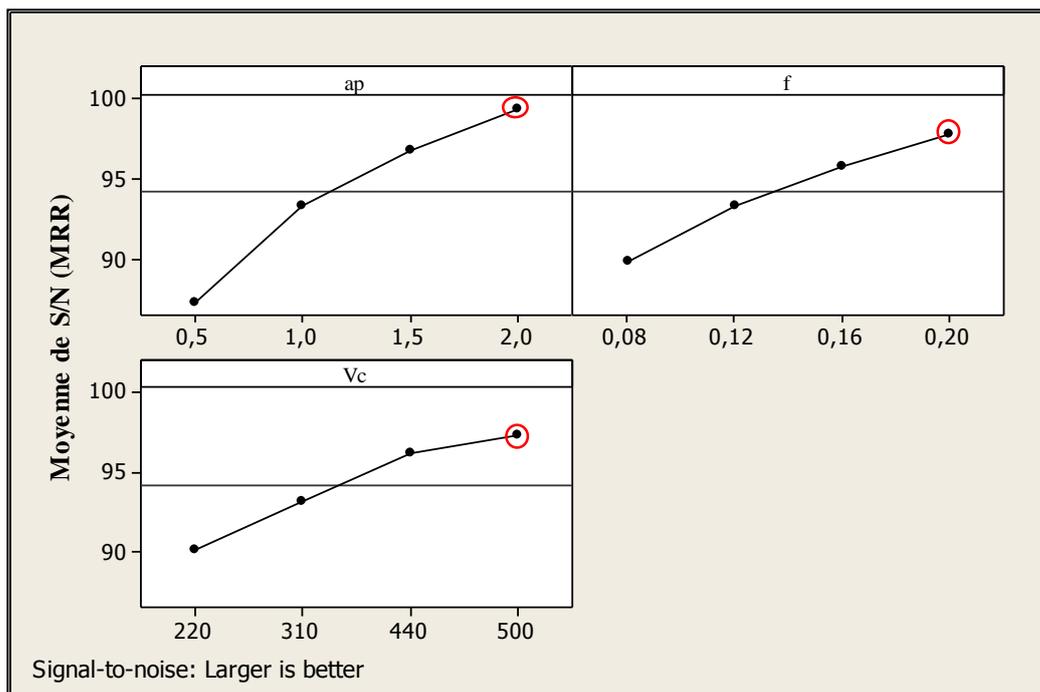


Figure VI.4. Graphique des effets principaux pour (MRR).

VI.3. Optimisation multi-objectif avec la méthode d'Analyse Relationnelle Grise (GRA)

Le but de la méthode d'analyse rationnelle grise est de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui nous permet de minimiser la rugosité de surface (Ra) et maximiser le débit du copeau enlevé (MRR) simultanément.

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

VI.3.1 La normalisation

La première étape de l'analyse relationnelle grise est de normaliser (dans l'intervalle 0 et 1) les données expérimentales selon le but d'optimisation [87].

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

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

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

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

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{VI.6})$$

Où : $x_i(k)$ valeur normalisée de la séquence, $\max(x_i^0(k))$ la plus grande valeur de $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse, $\min(x_i^0(k))$ la plus petite valeur de $x_i^0(k)$ la $k^{\text{ième}}$ réponse [84].

Le but de la normalisation est rendre toutes les réponses en même grandeur, les données traitées par la normalisation sont données dans **le tableau VI.7**.

Tableau VI.7. Résultats expérimentale normalisé ($x_i(k)$)

<i>N° Essai. (i)</i>	<i>Ra</i>	<i>MRR</i>
Valeur Idéal	1,000	1,000
1	0,813	0,824
2	0,585	0,273
3	0,361	0,426
4	0,963	0,165
5	0,897	0,182
6	0,543	0,736
7	0,128	0,818
8	0,877	0,455
9	0,785	0,839
10	0,667	0,455
11	0,511	0,87
12	0,877	0,736
13	0,822	1
14	0,758	0,934
15	0	0,818
16	1	0

VI.3.2 Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational) ($\eta_i(k)$) peuvent être calculés comme suit [87, 88] :

$$\eta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \omega\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \omega\Delta_{\max}}; \quad 0 < \eta_i(k) \leq 1 \quad (\text{VI.7})$$

Où :

$\Delta_{0i}(k)$: La différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$,

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

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

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{VI.8})$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{VI.9})$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{VI.10})$$

La valeur de ω est en générale égale à (0,5) [89].

La valeur du coefficient η a été prise (0,5). Les valeurs des coefficients "Gris Rationnelle Coefficients" est présentés dans le *tableau VI.8*.

Tableau .VI.8. Coefficients du GR ($\eta_i(k)$)

<i>N : • Essai (i)</i>	<i>Ra</i>	<i>MRR</i>
1	0	1
2	0,187	0,176
3	0,415	0,727
4	0,639	0,574
5	0,037	0,835
6	0,103	0,818
7	0,457	0,264
8	0,872	0,182
9	0,123	0,545
10	0,215	0,161
11	0,333	0,545
12	0,489	0,13
13	0,123	0,264
14	0,178	0
15	0,242	0,066
16	1	0,182

VI.3.3. Calcul du GRG (*Grey relational grade*)

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

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \eta_i(k) \quad (\text{VI.11})$$

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

La plus grande valeur de (*Grey Relational Grade*) est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale ($x_0(k)$) et la séquence donnée ($x_i(k)$). La séquence idéale ($x_0(k)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel (*Relational Grade*) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale [84].

Selon le *tableau VI.9* et la *figure VI.5*, la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience **14** a eu la qualité grise (*GRG*) la plus élevée et ceci signifie que cette expérience présente la combinaison des paramètres optimaux qui donne une rugosité de surface minimale, et un volume de copeau enlevé maximum.

Tableau IV.9. Niveau relationnel gris et son ordre (*Grey relational grade (GRG)*)

N° Essai. (i)	GRG (α_i)	Ordre
1	0,667	6
2	0,734	3
3	0,477	15
4	0,452	16
5	0,653	7
6	0,604	10
7	0,588	11
8	0,549	12
9	0,64	9
10	0,728	5
11	0,539	13
12	0,65	8
13	0,728	4
14	0,869	1
15	0,779	2
16	0,533	14

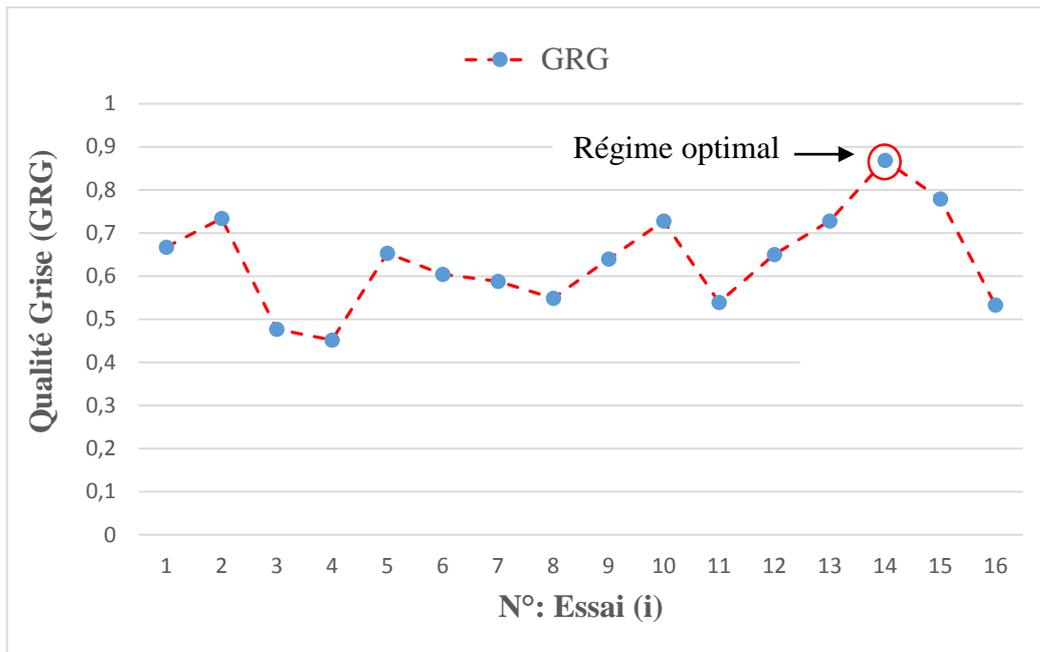


Figure VI.5. Qualité Relationnelle Grise (GRG).

La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage du Polyoxyméthylène (POM C) est obtenue à partir de **tableau VI.10**. Cette combinaison est :

- Vitesse de coupe optimale (niveau 3).
- Profondeur de passe optimale (niveau 4).
- Avance (niveau 2).

Tableau VI.10. Réponses pour la catégorie relationnelle grise (Grey Grade)

<i>Niveau</i>	<i>Vc</i>	<i>f</i>	<i>ap</i>
1	220	0,08	0,5
2	310	0,12	1
3	440	0,16	1,5
4	500	0,2	2

Donc la combinaison optimale (pour les deux réponses) des paramètres est : $Vc3 f2 ap4$. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : (vitesse de coupe : $Vc = 440$ (m/min), avance : $f = 0,12$ (mm/tr) et profondeur de passe : $ap = 2$ (mm)).

VI.4. Optimisation par la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) en utilisant la fonction de désirabilité (DF)

VI.4.1. Introduction

L'approche de la fonction désirabilité est l'une des méthodes les plus utilisées par pour l'optimisation multi-objective des réponses grâce à sa simplicité, sa souplesse de pondération et à sa disponibilité dans les logiciels statistiques [90].

La désirabilité permet d'évaluer en fonction des réponses calculées par le modèle statistique, l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface (R_a) et le débit du coupeau enlevé (MRR) souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour l'optimisation semblé être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (R_a) et de maximiser le débit du coupeau enlevé (MRR) lors de l'usinage du POMC.

Les étapes de la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour les différents paramètres étudiés ont été exposées dans *le chapitre IV*. Dans ce chapitre on s'intéresse seulement au résultat de l'optimisation.

VI.4.2. Optimisation des conditions de coupe pour (R_a) et (MRR)

Le *tableau VI.11* présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe lors de tournage du Polyoxyméthylène (POM C) avec une plaquette en carbure SCMN 12 04 08 (K10), pour la rugosité de surface arithmétique (R_a) et le débit du coupeau enlevé (MRR).

Tableau VI.11. Conditions d'optimisation pour (R_a) et (MRR)

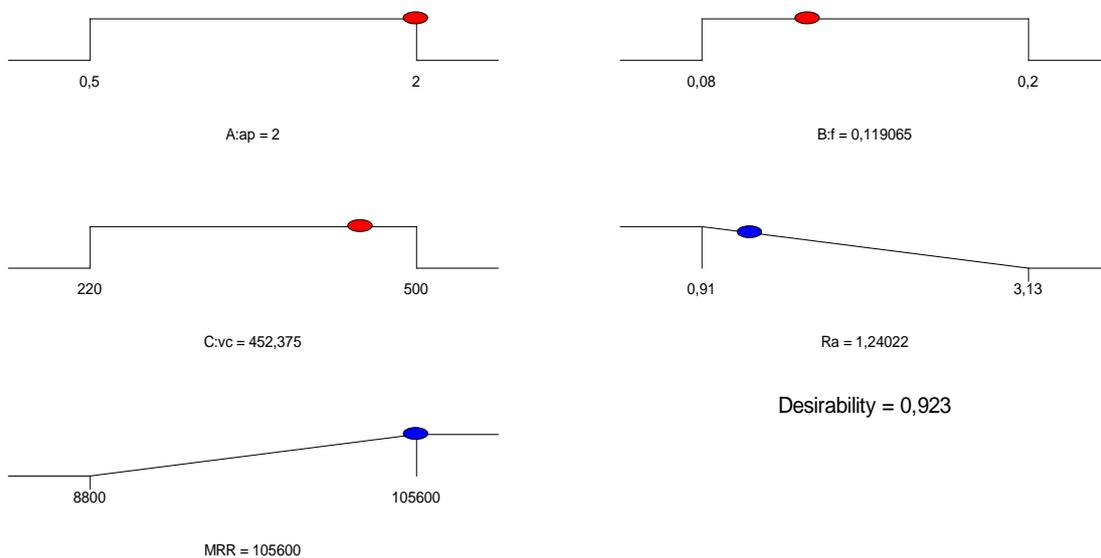
<i>Conditions</i>	<i>Objectifs</i>	<i>Limite inférieure</i>	<i>Limite supérieure</i>
Vitesse de coupe, V_c (m/min)	Gamme	220	500
Avance, f (mm/tr)	Gamme	0,08	2
Profondeur de passe, ap (mm)	Gamme	0,5	2
R_a (μm)	Minimiser	0,91	3,13
MRR (mm^3/min)	Maximiser	8800	105600

Le *tableau VI.12* présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (RSM) de la rugosité de surface (R_a) et le débit du coupeau enlevé (MRR).

Tableau VI.12. Optimisation par RSM de (Ra) et (MRR)

Solutions						
Num	ap (mm)	f (mm/tr)	Vc (m/min)	Ra (μm)	MRR (mm^3/min)	Désirabilité
1	<u>2,000</u>	<u>0,119</u>	<u>452,343</u>	<u>1,240</u>	<u>105599,954</u>	<u>0,923</u>

Les paramètres de coupe optimaux s'avèrent : la vitesse de coupe $Vc= 452.343$ (m/min), l'avance par tour $f= 0,119$ (mm/tr) et la profondeur de passe (ap) = 2 (mm). La rugosité de surface optimisée est $Ra = 1,24$ (μm) et le débit du coupeau enlevé est $MRR=105600$ (mm^3/min) (*figure VI.6*).

**Figure VI.6.** Le graphique de fonction pour l'optimisation de (Ra) et (MRR).

La *figure VI.7* représente le graphique de contour de désirabilité (DF=92.3%) pour la rugosité de surface (Ra) et le débit du coupeau enlevé (MRR).

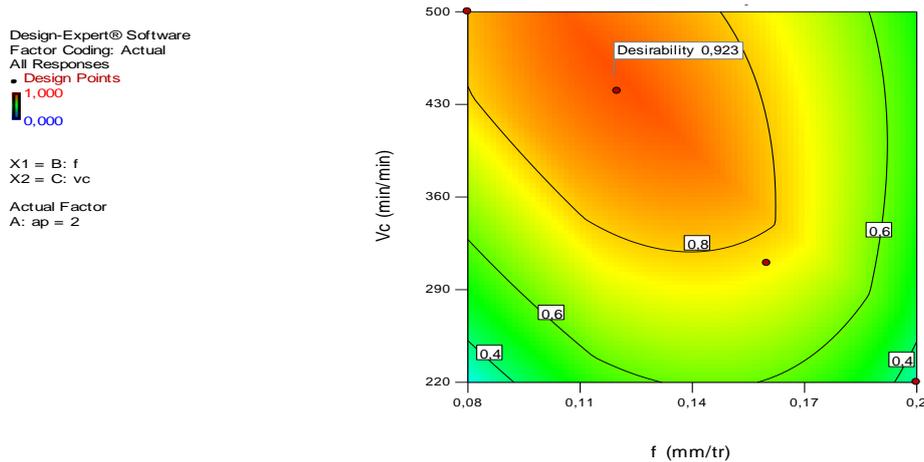


Figure VI.7. Graphique de contour de désirabilité pour (Ra) et (MRR).

VI.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué trois types d'optimisation : l'optimisation mono-objective, dans laquelle nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser et l'optimisation multi-objective en appliquant deux méthodes différentes : la méthode Grise (Grey Relationnel Analysis) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF) pour optimiser le débit du copeau enlevé (MRR) et la rugosité arithmétique de surface (Ra) simultanément. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de :
 - ✓ Méthode de Taguchi est : une vitesse de coupe de $V_c=310$ m/min, une avance de $f = 0,08$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap=1,5$ mm pour une rugosité optimale $Ra=1,02$ μm ($MRR=24800$ mm^3/min) et $V_c = 500$ m/min, $f = 0,2$ mm/tr et $ap = 2$ mm pour $MRR=88000$ mm^3/min ($Ra=3,13$ μm).
 - ✓ L'Analyse Relationnelle Grise est : vitesse de coupe de $V_c = 440$ m/min, avance $f = 0,12$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap = 2$ mm.
 - ✓ La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) : la vitesse de coupe $V_c=452.343$ m/min, l'avance par tour $f = 0,119$ mm/tr et la profondeur de passe $ap=2$ mm.
- La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse. Par contre les méthodes (GRA) et (DF) sont employées pour l'optimisation multi-objective.

Conclusions générales et perspectives

L'étude expérimentale du comportement des matériaux de coupe lors du tournage du Polyoxyméthylène POMC en utilisant un outil de coupe en carbure cémenté, nous a permis d'étudier l'usinabilité de ce polymère en se basant sur les critères suivants : la rugosité des surfaces usinées, les efforts de coupe, la puissance de coupe et la pression de coupe et optimiser les conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe). Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

- 1- Les résultats des essais uni-factoriels sur la rugosité de surface montrent que :
 - La vitesse de coupe (V_c) n'a pas d'influence significative sur la rugosité de surface. Une augmentation de la vitesse de coupe de 160 à 440 m/min fait diminuer les différents critères de rugosité (R_a , R_q , R_z et R_t) respectivement de 11,11 %, 14,74%, 10 % et 17,36%.
 - La profondeur de passe (ap) intervient d'une manière plus significative que la vitesse de coupe. Sur le plan pratique, on peut dire que l'augmentation de (ap) de 0,5 à 3 mm fait augmenter les critères R_a , R_z , R_q et R_t de (23,91%, 15,58%, 21,74% et 8,53%) respectivement.
 - Par contre, l'état de surface se détériore avec l'augmentation de l'avance et cette dégradation est significative au-delà de $f = 0,2$ (mm/tr). Une augmentation de l'avance de 0,08 à 0,28 (mm/tr) induit une augmentation des critères de rugosité (R_a , R_z , R_q et R_t) de (341,30 ; 157,51 ; 320,35 et 147,63%) respectivement. On peut dire que l'effet de l'avance (f) est le plus important sur l'état de la surface usinée du polymère POM C.
 - La rugosité de surface est plus petite en utilisant un outil de coupe avec l'angle de direction ($\chi_r=45^\circ$) que celui avec ($\chi_r=75^\circ$).
- 2- On ce qui concerne les efforts de coupe, nous avons trouvé que :
 - L'accroissement de la vitesse de coupe (V_c) de 160 à 440 (m/min) fait diminuer les trois composantes (F_x , F_y et F_z) respectivement de 40,73%, 53,97% et 23,75%.
 - Lorsque la profondeur de passe (ap) augmente de 0,5 à 3 mm, les trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) augmentent de 523,66%, 368,61% et 250,77% respectivement. Nous avons remarqué aussi que la

valeur maximale de l'effort (F_x) n'a pas dépassé 100 (N) pour une profondeur de passe $ap=3$ (mm). D'autre part, la composante axiale F_x est la plus influencée par l'augmentation de la profondeur de passe.

- Les efforts de coupe sont influencés par l'avance, une augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 (mm/tr) conduit à une élévation de la composante tangentielle de l'effort de coupe (F_z) de 460,97%, les deux autres composants (F_x) et (F_y) de (11,43% ; 41,66%) successivement.
- L'analyse des résultats nous permet de conclure qu'avec l'augmentation de l'angle de direction principale, les composantes des efforts de coupe se trouvent alors diminuées.

3- Pour l'effort spécifique de coupe :

- L'effort spécifique de coupe diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe, sur le plan pratique une élévation de la vitesse de coupe de 160 à 440 m/min conduit à une diminution de l'effort spécifique de (23,75%), ce qui est bien pour l'arête de coupe de l'outil.
- L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24 (mm/tr) implique une diminution de l'effort spécifique de coupe de 66,67%, ce qui est bien pour l'arête de coupe de l'outil, mais élève aussi la rugosité de surface du POM C. Cela nous pousse à choisir un compromis entre la rugosité et l'effort spécifique.
- L'accroissement de la profondeur de passe de 0,5 à 3 (mm) conduit à une diminution de l'effort spécifique de coupe de 83,33%, cela est profitable à l'arête tranchante de l'outil de coupe.

4- A propos de la puissance de coupe, nous avons remarqué qu'une augmentation des différents paramètres de coupe (V_c , f et ap) conduit à une augmentation de la puissance de coupe (P_c).

- Une augmentation de la vitesse de coupe de 160 m/min à 440 (m/min) fait augmenter la puissance de coupe jusqu'au 109,64%.
- L'augmentation de l'avance de 0,08 (mm/tr) à 0,24 (mm/tr) fait augmenter la puissance de coupe jusqu'au 460,95%.
- Une augmentation de la profondeur de passe de 0,5 à 3 (mm) conduit à une augmentation de puissance de 500%.

5- L'usinage avec lubrification fait diminuer les trois composants de l'effort de coupe; lorsqu'on passe de l'usinage à sec à l'usinage lubrifié et pour les valeurs de la profondeur de passe (ap) de 1, 2 et 3 (mm), l'effort (F_x) chute de (35,33 ; 14,93 et

18,765)% successivement, l'effort (F_y) chute de (37,20 ; 35,01 et 35,93)%, et l'effort (F_z) chute de (2,26 ; 2,02 et 11,00)%.

Pour les différents critères de la rugosité de surface, ils chutent de la manière suivante : R_a chute de (52,34 ; 43,45 et 28,21)%, (R_z) réduit de (51,01 ; 33,19 et 54,04)%, (R_q) chute de (43,90 ; 59,66 et 63,08)% et (R_t) de (48,14 ; 28,83 et 47,32)% pour $f = (0,08 ; 0,16$ et $0,24$ mm/tr) respectivement.

- 6- Avec l'augmentation de (V_c), la température croît d'une façon remarquable. Sur le plan pratique, lorsque (V_c) augmente de 220 (m/min) jusqu'au 440 (m/min), la température croît dans la zone de coupe de la manière suivante : ont utilisant un outil de coupe avec l'angle de direction $\chi_r = 45^\circ$, l'accroissement de la température est de 23,63% par contre elle est de 12,71% avec l'outil de coupe avec l'angle de direction $\chi_r = 75^\circ$. D'autre part, lorsque (ap) augmente de 1 jusqu'au 3 (mm), une augmentation de la température maximale dans la zone de coupe est remarquée. Cette augmentation est de 37,97 % en utilisant un outil de coupe avec l'angle de direction $\chi_r = 75^\circ$, et de 42,77% lorsque l'angle de l'outil utilisé est $\chi_r = 45^\circ$. Une augmentation de (f) de 0,08 jusqu'au 0,24 (mm/tr) conduit à une température maximale dans la zone de coupe, une élévation de température d'usinage de 5,97 % en utilisant l'outil de coupe avec $\chi_r = 75^\circ$ et de 9,83 % en utilisant un outil de coupe avec un $\chi_r = 45^\circ$.
- 7- Les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (R_a) pour un niveau de confiance de 95% montrent que l'avance est le facteur le plus important qui affecte (R_a), sa contribution est de 66,41% suivie par la profondeur de passe (ap) avec 19,70% de contribution, la vitesse de coupe (V_c) avec 5,28% de contribution. L'interaction ($f \times ap$) et le produit (f^2) ont des contributions inférieures à 1,5%. Les autres termes peuvent être supposés non significatifs. Ces résultats sont confirmés avec les diagrammes de Pareto.
- 8- Les résultats de l'ANOVA pour l'effort tangentiel de coupe (F_z) pour un niveau de confiance de 95% montrent que (ap) et (f) ont un effet significatif sur (F_z). Néanmoins, (ap) est le facteur le plus important-avec une contribution de 45,41%. Le facteur suivant le plus important influençant (F_z) est (f) suivi par (V_c), leurs contributions sont de 31,09% et 13,66% respectivement. L'interaction ($f \times ap$) à 4,31% de contribution et le terme (f^2) a 1,38%. Les autres termes ont une contribution inférieure à 1%.
- 9- Concernant la puissance de coupe (P_c), les résultats de l'ANOVA indiquent que tous les paramètres d'entrée sont significatifs mais la profondeur de passe (ap) est le facteur le

plus important suivi par l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c), leurs contributions sont de 47,81%, 30,50% et 12,63% respectivement. Les interactions ($V_c \times ap$ et $f \times ap$) et le terme (f^2) ont des contributions inférieures à 1%. Les autres termes n'ont pas d'effet significatif sur la puissance de coupe (P_c).

10- D'après les résultats de l'ANOVA la profondeur de passe (ap) et l'avance (f) ont la signification statistique la plus élevée sur le débit du copeau enlevé (MRR) avec une contribution de (37,00%) suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec (16,55%) de contribution. Les interactions ($V_c \times f$, $V_c \times ap$ et $f \times ap$) ont une contribution moins importante qui varie entre 5,94% et 2,79%.

11- Pour l'optimisation combinée (minimiser (Ra) et (F_z) et maximiser (MRR)), les valeurs des paramètres de coupe optimaux se révèlent comme suit : $V_c = 628$ m / min, $f = 0,097$ mm / tr et $ap = 1,80$ mm. La rugosité de surface optimisée et le débit du copeau enlevé sont les suivants ($Ra = 0,731$ μ m, $F_z = 21,49$ N, $P_c = 218,58$ W et $MRR = 107,394$ cm³ / min) avec une désirabilité combinée = 0,917.

12- La comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimés par les modèles RSM et ANN montre clairement que, les modèles issus par la méthode des réseaux de neurones donnent des résultats excellents ($R^2_{(Ra)} = 97,29$ % et $R^2_{(F_z)} = 99,48\%$) par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse ($R^2_{(Ra)} = 96,59\%$ et $R^2_{(F_z)} = 98,15\%$).

13- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de :

- ✓ Méthode de Taguchi est : une vitesse de coupe de $V_c = 310$ m/min, une avance de $f = 0,08$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap = 1,5$ mm pour une rugosité minimale et $V_c = 500$ m/min, $f = 0,2$ mm/tr et $ap = 2$ mm pour un MRR maximale.
 - ✓ L'Analyse Relationnelle Grise est (GRA) : vitesse de coupe de $V_c = 440$ m/min, avance $f = 0,12$ mm/tr, et une profondeur de passe $ap = 2$ mm, pour une rugosité de surface et un débit de copeau enlevé optimaux
- La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse. Par contre l'Analyse Relationnelle Grise est le meilleur pour l'optimisation multi-objectif.
- L'optimisation par RSM en utilisant la fonction de désirabilité (DF) des conditions de coupe les mieux adaptées pour la rugosité de surface ($Ra = 1,24$ μ m) et un débit de copeau élevé ($MRR = 105600$ mm³/min) nous a donné : la vitesse de coupe ($V_c =$

452.343 m/min), l'avance par tour ($f= 0.119$ mm/tr) et la profondeur de passe ($ap= 2$ mm).

- Les régimes optimaux proposés par les méthodes de l'Analyse Relationnelle Grise (GRA) et la fonction de désirabilité (DF) sont très proches.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

- Une étude comparative avec le Polyoxyméthylène renforcé avec des fibres de verre (POMGF25).
- Application d'autres méthodes d'optimisation telle que (La logique floue et les algorithmes génétiques ...etc).

Références bibliographiques

- [1] **J. L. Halary, F. Lauprêtre and L. Monnerie**, Mécanique des matériaux polymères. Belin Échelles, (2008).
- [2] **J. M. Cowies**, Polymer Chemistry and physics of modern Material. Blackie, (1991).
- [3] **MATECHPLAST**, Usinage des thermoplastiques standards .<http://www.usinage-plastique.com/thermoplastiques-usuels.html>, (13/02/2013).
- [4] **S. Berkani**, Comportement des carbures métalliques lors de l'usinage des aciers inoxydables : Application aux austénitiques et martensitiques. Thèse de doctorat de Mécanique et Productique. Université 8 Mai 1945 Guelma, (2015).
- [5] **A. Czaplicki**, L'usinabilité et la coupe des métaux : revue de la Société Royale Belge des Ingénieurs et des Industries, 12, 708 – 736, (1962).
- [6] **B. Gruber**, Outillage et mesure. Dunod 2^{ème} Edition, Lausanne, 51-63, (1981).
- [7] **Alexandre Toumine**, Cours d'usinage, Groupe Conception Production. INSA de Lyon, France.
- [8] **T. B. Bouchnak**, Etude de comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de Titane aéronautique. Thèse de doctorat en Mécanique, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. ParisTech, (2010).
- [9] **Y. Schoefs, S. Fournier, and J. C. Leon**, Productique mécanique. Edition Delagrave. France, (1994).
- [10] **R. Berghida**, Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la géométrie des pièces mécaniques, Mémoire de magister, Département de génie Mécanique. Université de Constantine, (2006).
- [11] **CETIM**, Etude de l'usinage à grande vitesse, 72-7-0669, (1979).
- [12] **D. Gelin and M. Vincent**, Eléments de fabrication. Les Editions Foucher, (1995).
- [13] Groupe Kisler France, Mesure des efforts de coupe, www.kisler.com

- [14] **B. Fnides, M.A. Yallese and T. Mabrouki**, Surface roughness model in turning hardened hot work steel using mixed ceramic tool, *Mechanics. Kaunas University of Tehnology*, 3(77) 68–73, (2009).
- [15] **J. P. Davim**, *Machining of hard materials*. (Ed). Springer Science & Business Media, (2011).
- [16] **J. Baroth, F. Schoefs and D. Breyse**, *Fiabilité des ouvrages : Sûreté, variabilité, maintenance, sécurité*. 1ère Edition. Paris Lavoisier, (2011).
- [17] **G. Derringer and R. Suich**, Simultaneous optimization of several response variables, *J. Qual. Technol*, 12(4), 214-219, (1980).
- [18] **L. Bouzid, M. A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki and L. Boulanouar**, Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 229(1), 45-61, (2015).
- [19] **M.S. Safarzadeh, D. Moradkhani, M.O. Ilkhchi and N.H. Golshan**, Determination of the optimum conditions for the leaching of Cd–Ni residues from electrolytic zinc plant using statistical design of experiments, *Separation and Purification Technology*, 58(3), 367-376, (2008).
- [20] **M. Hvalec, A. Goršek and P. Glavič**, Experimental design of crystallization processes using Taguchi method, *Acta Chim. Slovenia*, 51(2), 245-256, (2004).
- [21] **B.M. Gopalsamy, B. Mondal and S. Ghosh**, Taguchi method and ANOVA: an approach for process parameters optimizing of hard machining while machining hardened steel, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 68(08), 686-695, (2009).
- [22] **S. Ilyas, H.N. Bhatti, I.A, M.A, Sheikh and M.A. Ghauri**, Bioleaching of metal ions from low-grade sulphide ore: Process optimization by using orthogonal experimental array design, *African Journal of Biotechnology*, 9(19), 2801-2810, (2010).
- [23] **M.S. Phadke**, *Introduction to robust design (Taguchi Method)*, (2008). <http://www.isixsigma>.

- [24] **A. I. Gusri, C.H. Che Hassan, A.G. Jaharah, B. Yanuar, A. Yasir and A. Nagi**, Application of taguchi method in optimizing turning parameters of titanium alloy, Engineering Mathematics Group. Malaysia, 57-63, (2008).
- [25] **P.S. Georgilakis**, Taguchi method for the optimization of transformer cores annealing process, Journal of optoelectronics and advanced materials,10(5),1169-1177, (2008).
- [26] **B. Eyup and A.A. Eref**, Study of Taguchi Optimization Method for identifying optimum surface roughness in CNC face milling of cobalt-based alloy (stellite 6), Int J. Advanced manufacture Technology, 29(9-10), 940–947, (2006).
- [27] Réseaux de neurons. <http://slideplayer.fr/slide/3308076/>
- [28] MANUEL COMPLET GARANT, Réf : 11 0950DE, P78.
- [29] **K. Van de Velde and P. Kiekens**, Overview of several properties and their consequences in flax fibre reinforced composites Polymer Testing, 20(8), 885-893, (2001).
- [30] **M. Boulkra**, Détermination de la loi de comportement effective du polyéthylène téréphtalate par les algorithmes génétiques. Thèse de magister. Université d'Annaba, (2008).
- [31] <http://www.bloomoon.eu/fr/actualites/archives/lettres-de-veille-et-white-papers> (31/03/2018).
- [32] **J.P. Mercier and E Maréchal**, Chimie des polymères. Synthèses, réactions, dégradations, Presses polytechniques et universitaires romandes ,16 (1993).
- [33] **M. Reyne**, Technologie des plastiques. HERMES, Paris, (1998).
- [34] **W. Gottfried and F. B. Ehvenstein**, Matériaux polymères, Structure, propriétés et application. Hermès, Paris, (2000).
- [35] **H. H. Kausch, N. Heymans, C. J. Plummer and P. Decroly**, Matériaux polymères : Propriétés mécaniques et physiques Principe de mise en œuvre. Lausanne (2001).
- [36] **R. Perrin and J. P. Scharff**, Chimie industrielle. Dunod, 571, (1995).

- [37] **M .Carrega**, les polymères de la molécule à l'objet, EDP Science. Cedex, France, (1999).
- [38] **M. Reyne**, Technologie des plastiques. HERMES, Paris, (1998).
- [39] **J. W.Carr and C.Feger**, Ultraprecision machining of polymers, Precision Engineering, 15(4), 221-237, (1993).
- [40] **Alain Dessarthe**, Usinage des polymères. Ed .Technique de l'ingénieur, (2000).
- [41] **AGORA**, Conditions de coupe des polymères, réf : IT-conditions de coupe polymère.
- [42] **G.W. Ehrenstein and F. Montagne**, Matériaux polymères. Structure, propriétés et applications. Hermès, Paris, (2000).
- [43] **J .Bost**, Matières plastiques I. Chimie Applications. 2ème édition, Technique et Documentation (Lavoisier). Paris, (1985).
- [44] Les polymères : <http://slideplayer.fr/slide/3706383/>
- [45] **F. Pardos**, Polyacétals (POM). Aspects économiques. Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites, 3(AM3385), AM3385-1, (2002).
- [46] <http://www.resinex.fr/types-de-polymeres/pom.html>, (09/02/2017).
- [47] **M. Bestared**, Etude de la durabilité de pièces thermoplastiques. Application au Polyoxyméthylène. Thèse de doctorat à l'E.N.S.A.M, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Centre de Paris, (2006).
- [48] **Michaud Chailly**, plastiques techniques POM C Polyacétal https://www.michaud-chailly.fr/custom/images/rtf/pom-c-polyacetal-pdf-pom_c-lmod1.pdf
- [49] **M. Moțoi**, Studies on the main cutting force in turning polyamide PA66, annals of the oradea university, fascicle of management and technological engineering, 9(2), 3-162, (2010).
- [49] **J. P. Davim and F. Mata**, A comparative evaluation of the turning of reinforced and unreinforced polyamide, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 33(9-10), 911-914, (2007).

- [50] **Keresztes, Kalacska, Zsidai and Dobrocsi**, Machinability of engineering polymers, *Sustainable Construction and Design*, 2(1), 106, (2011).
- [51] **M. Kaddeche, K. Chaoui and M. A. Yallese**, Cutting parameters effects on the machining of two high-density polyethylene pipes resins. *Mechanics & Industry*, 13(05), 307-316, (2012).
- [52] **T. U. Jagtap and A. M. Hemant**, Machining of plastics: a review. *International Journal of Engineering and General Science*, 3, 2091-2730, (2015).
- [53] **M. R. Panda, S. K. Biswal and Y.K. Sharma**, Experimental analysis on the effect of process parameters during CNC turning on nylon-6/6 using tungsten carbide tool, *International journal of engineering sciences & research technology*, 5(4), 2277-9655, (2016).
- [54] **H. Oktem, T. Erzurumlu and F. Erzincanli**, Prediction of minimum surface roughness in end milling mold parts using neural network and genetic algorithm, *Materials & design*, (2006).
- [55] **V. N. Gaitonde, S.R. Karnik, F. Mata and J. Paulo Davim**, Modeling and analysis of machinability characteristics in PA6 and PA66GF30 polyamides through artificial neural network, *Journal of thermoplastic Composite materials*, (2010).
- [56] **D. Lazarevic, M. Madic, Jankovic and P.A. Lazarevic**, Surface roughness minimization of Polyamide PA-6 turning by Taguchi method, *Journal of Production Engineering*, 15(1), 29, (2012).
- [57] **M. Madic, V. Marinkovic and M. Radovanovic**, Mathematical modeling and optimization of surface roughness in turning of Polyamide based on artificial neural network, ISSN 1392-1207. *Mechanika*, 18(5), 574-581, (2012).
- [58] **S. Yilmaz, A. A. Arici, and E. Feyzullahoglu**, Surface roughness prediction in machining of cast polyamide using neural network. *Neural Computing and Applications*, 20(8), 1249-1254, (2011).
- [59] **L. R. Silva, M. Abrao and J. P. Davim**, The Effect of Tool Geometry on the Machinability of Polyamide During Precision Turning. *Journal of Composite Materials*, 43(23), 2793–2803, (2009).

- [60] Technique d'ingénieur f1005. Planification expérimentale en agroalimentaire, (2006).
- [61] **I. Asiltürk and H. Akkus**, Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, *Measurement*, 44(9), 1697-1704, (2011).
- [62] **S. Neseli, S. Yaldiz and E. Türkes**, Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology, *Measurement*, 44(3), 580-587, (2011).
- [63] **L. Bouzid, S. Boutabba, M.A. Yallese, S. Belhadi and F. Girardin**, Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 74(5-8), 879-891, (2014).
- [64] **I. Meddour, M.A. Yallese, R. Khattabi, M. Elbah and L. Boulanouar**, Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting condition optimization, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 77(5-8), 1387-1399, (2014).
- [65] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lubrification>
- [68] **L. Bouzid, M. A. Yallese, K. Chaoui, T. Mabrouki and L. Boulanouar**, Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 229(1), 45-61, (2015).
- [69] **H. Aouici, H. Bouchelaghem, M. A. Yallese, M. Elbah and B. Fnides**, Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12), 1775-1788, (2014).
- [70] <http://www.agro-montpellier.fr/cnam-lr/statnet/tables.htm>
- [71] **M. S. Ansari, D. Sharma and S. Nikam**, Study of Cutting Forces and Surface Roughness in Turning of Bronze Filled Polytetrafluoroethylene, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering* 4(2), 151-160, (2014).

- [72] **E.C. Harrington**, The desirability function, *Ind. Qual. Contr.* 21 (10) 494–498, (1965).
- [73] **M. D. Kiran, A. S. Shrikant and S. S. Parag , S.S. Lele and S. S. Rekha**, Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in fermentation media optimization: Case study of fermentative production of scleroglucan, *Biochemical Engineering Journal*, 41(3), 266-273, (2008).
- [74] **Y. B. Koffi**, Etude du calage, de la validation et des performances des réseaux de neurones formels à partir des données hydro-climatiques du bassin versant du Bandama blanc en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat. Université de Cocody Abidjan, (2007).
- [75] <http://tpe1-intelligence-artificielle.e-monsite.com/pages/les-neurones-artificielles/histoire-des-neurones-artificielles.html>.
- [76] **K. L. Fox, R. R. Henning and J. H. Reed**, A Neural Network Approach Towards Intrusion Detection. In *Proceedings of the 13th National Computer Security Conference*, (1990).
- [77] **D. Hammerstrom**, Neural Networks At Work. *IEEE Spectrum*, 30(7), 46-53, (1993).
- [78] <https://intelligence-artificielle-robotique.weebly.com/theacuteurie.html>
- [79] <http://informatique.coursgratuits.net/methodes-numeriques/reseaux-de-neurones-formels.php>
- [80] **W. Patrice**, Réseaux de neurones artificiels : architectures et applications, Université de Haute Alsace Laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus, Systèmes), (2009).
- [81] **I. Meddour**, Prédiction de la rugosité de surface, des efforts de coupe et des vibrations de l'outil en tournage dur par les méthodes RSM et ANN - application au couple : AL₂O₃+TiC/ 100Cr6 -. Thèse de doctorat de Génie mécanique et Productique. Université du 8 Mai 45 Guelma, (2015).
- [82] **A. A. Selaimia**, Etude de l'usinage des aciers inoxydables lors du fraisage de face. Thèse de doctorat de Génie Mécanique et Productique. Université du 8 Mai 45 Guelma, (2017).

- [83] **P. WIRA**, Réseaux de neurones artificiels -architectures et applications-. Cours en ligne, Université de Haute-Alsace, (2009).
- [84] **L. Bouzid**, Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13-. Thèse de doctorat de Génie Mécanique option Mécanique Appliquée. Université du 8 Mai 45 Guelma, (2015).
- [85] Technique d'ingénieur f1006. Plans d'expériences méthode de Taguchi, (2007).
- [86] **S. Balasubramanian and S. Ganapathy**, Grey Relational Analysis to determine optimum process parameters for Wire Electro Discharge Machining (WEDM),. International journal of engineering Science and Technology, 3(1), 95-101, (2011).
- [87] **H. A. Noorul, P. Marimuthu and R. Jeyapaul**, Multi response optimization of machining parameters of drilling Al/SiC metal matrix composite using grey relational analysis in the Taguchi method. Int J Advanced Manufacturing Technology, 37(3-4), 250-255, (2008).
- [88] L. C. Lin, Use of the Taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics. Materials and manufacturing processes, 19(2), 209-220, (2004).
- [89] **N. Tosun**. Determination of optimum parameters for multiperformance characteristics in drilling by using grey relational analysis. Int J Advanced Manufacturing Technology, 28(5-6), 450-455, (2006).
- [90] **M. Chahal, V. Singh and R. Garg**, Optimum surface roughness evaluation of dies steel H-11 with CNC milling using RSM with desirability function, International Journal of System Assurance E ngeering and Management, 1-13, (2016).