

Université 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : MEKNASSI RAID FEKHREDDINE

=====

**Etude de l'impact des conditions de coupe lors du
tournage des polyamides avec renfort en fibre de verre
(PA66/GF30) en utilisant les méthodes RSM et ANN**

=====

Sous la Direction de :

Pr. YALLESE Mohamed Athmane

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Je saisis cette occasion pour remercier mon encadreur le professeur **YALLESE MOHAMMED ATHMANE** qui tout au long de ce mémoire, ses conseils pertinents avec écoute, amabilité et patience ont permis à mon travail d'aboutir et de voir le jour.

Que toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail trouvent ici ma reconnaissance la plus sincère à M^{elle} : **Djouambi Nahla** et **MM Mebarki**.

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

J'exprime ma profonde gratitude à toute ma famille pour son soutien.

ملخص

تلعب الخواص الفيزيائية للبوليمرات دورًا مهمًا في قدرتها على التشكيل. من بين هذه البوليمرات، البولياميد المعززة بنسبة 30% بالمئة من الألياف الزجاجية PA66GF30. هذه الأخيرة تظهر صعوبات أثناء التصنيع بسبب خصائصها الميكانيكية والفيزيائية. من أجل هذا، من المثير للاهتمام للغاية إيجاد شروط نظام القطع التي يمكن اعتمادها بشكل إنتاجي وفعال لتصنيع هذا البولياميد المقوى. وعملنا يكمن في هذا الإطار، وينقسم إلى قسمين.

يتناول الجزء الأول تأثير شروط القطع (سرعة القطع، التغذية وعمق التمريرة) على قوى القطع، خشونة السطح، قوة القطع، ضغط القطع وتدفق القاطع المزال MRR . باستخدام أداة القطع من الكربيد المعدني أثناء تشغيل البولياميد المقوى. يليه نمذجة خشونة السطح، وقوى القطع، وتدفق القاطعة التي تمت إزالتها باستخدام الطرق (ANOVA) و (RSM) باستخدام Taguchi (L27). تُستخدم النماذج الموجودة لتحسين ظروف القطع عن طريق استخدام التحليل التحسيني (DF) وفقًا لعدة أهداف (جودة السطح واستهلاك الطاقة والهدفين معا). الجزء الثاني مخصص لتطبيق الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) في نموذج خشونة السطح وقوى القطع وفقًا لمعايير نظام القطع المختلفة. تتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها للتمييز بين الطريقة الأكثر فعالية ودقة.

كلمات البحث :

الخرطة, PA66GF30, تصميم التجارب, ANOVA, العملية التحسينية, Taguchi, RSM, ANN, DF.

Résumé

Les propriétés physiques des polymères jouent un rôle important sur leur aptitude à être usinés. Parmi ces polymères, les polyamides renforcés par des fibres de verre 30% (PA6.6 GF30). Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques physiques et mécaniques. De là, il est très intéressant de trouver des conditions du régime de coupe qui peuvent productivement et efficacement être adoptés pour usiner ce polyamides renforcés. Notre travail rentre dans ce cadre, il est divisé en deux parties.

La première partie traite l'influence des paramètres d'usinage (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe) sur les efforts de coupe, la rugosité de surface, la puissance de coupe, pression de coupe et le débit du copeau enlevé lors de tournage du PA66-GF30, avec un outil de coupe en carbure métallique. Suivie par une modélisation de la rugosité de surface, des efforts de coupe, de la puissance de coupe et le débit du copeau enlevé en utilisant les méthodes (ANOVA) et (RSM) suivant un plan Taguchi (L27). Les modèles trouvés sont exploités pour faire une optimisation des conditions de coupe en utilisant la fonction de désirabilité (DF) suivants plusieurs objectifs (qualité de surface, consommation d'énergie et combiné). La deuxième partie est réservée à l'application de l'approche ANN (réseaux de neurones artificielles) pour modéliser la rugosité de la surface et les efforts de coupe en fonction de différents paramètres de régime de coupe. Les résultats obtenus relatifs aux deux techniques de modélisations sont comparés afin de discerner la méthode la plus efficace et précise.

Mots clés : Tournage, PA6.6 GF30, Plans d'expérience, ANOVA, optimisation, Taguchi, RSM, ANN, DF.

Index des figures

Figure I.1.	Morphologies des copeaux collectés lors de la coupe à 90° par rapport à l'orientation des fibres.	22
Figure I.2.	Composantes de l'effort de coupe.	24
Figure I.3.	Les critères de rugosité.	28
Figure I.4.	Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur.	29
Figure I.5.	Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.	30
Figure I.6.	Forme linéaires des polymères thermoplastiques.	31
Figure I.7.	Forme réticulés des polymères thermodurcissables.	32
Figure I.8.	Forme réticulés des élastomères.	32
Figure I.9.	Principaux matériaux de renfort.	35
Figure I.10.	Valeurs des forces de coupe (F_c et F_t) en fonction de paramètres de coupe pour le PA6 et le PA66 GF30.	39
Figure I.11.	Comparaison de K_s des matériaux PA6 et PA66 GF30.	40
Figure I.12.	Comparaison de la puissance des matériaux PA6 et PA66 GF30.	40
Figure I.13.	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.	42
Figure I.14.	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).	42
Figure I.15.	Exemples d'évolution d'efforts de coupe pour la PA66GF ($V_c=100$ m/min $f=0.1$ mm/rev) :(a) outil de PCD ; (b) K10 et (c) outil de diamant CVD.	43
Figure I.16.	Représentation de rapport F_f/F_c pour plusieurs types d'outil et les deux des matériaux ($V_c=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev).	44
Figure I.17.	Evolution de la rugosité en fonction de V_c , pour l'ébauchage.	45
Figure I.18.	Evolution de la rugosité en fonction de V_c , pour tournage de finition.	45
Figure I.19.	Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la force de coupe.	46
Figure I.20.	Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la rugosité de la surface.	47
Figure I.21.	Effet de l'avance et la vitesse de coupe sur l'effort de coupe spécifique.	47

Figure I.22.	Variation de la rugosité de la surface avec la vitesse de coupe pour différentes (a) profondeur de coupe (b) d'angle d'orientation (c) avances.	48
Figure I.23.	Variation de la rugosité de la surface avec f pour différents angles d'orientation des fibres aux valeurs centrales de V_c et de a_p .	49
Figure II.1.	Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.	51
Figure II.2.	Variateur de fréquence ABB ACS355.	52
Figure II.3.	Capteur de vitesse.	52
Figure II.4.	Eprouvette utilisée pour les essais.	54
Figure II.5.	Plaquette et porte outil utilisée.	54
Figure II.6.	Chaîne de mesure des efforts de coupe.	55
Figure II.7.	Montage du dynamomètre sur la table de la machine.	56
Figure II.8.	Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».	57
Figure II.9.	Rugosimètre 2D.	58
Figure II.10.	Plate-forme 3D de métrologie optique modulaire Altisurf 500.	58
Figure III.1a.	Effet de vitesse de coupe sur la rugosité de surface.	66
Figure III.1b.	Effet de profondeur de passe sur la rugosité de surface.	66
Figure III.1c.	Effet de l'avance sur la rugosité de surface.	67
Figure III.2a.	L'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe.	68
Figure III.2b.	L'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe.	69
Figure III.2c.	L'évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance.	69
Figure III.3a.	Effet de la vitesse de coupe sur l'effort spécifique (K_s).	70
Figure III.3b.	Effet de l'avance sur l'effort spécifique (K_s).	71
Figure III.3c.	Effet de la profondeur de passe sur l'effort spécifique (K_s).	71
Figure III.4a.	Influence de vitesse de coupe sur la puissance de coupe.	72
Figure III.4b.	Influence de l'avance sur la puissance de coupe.	72
Figure III.4c.	Influence de la profondeur de passe sur la puissance de coupe.	73
Figure III.5.	Graphique des effets principaux F_x .	78
Figure III.6.	Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour F_x .	79
Figure III.7.	Les valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour F_x .	80
Figure III.8.	Surface de réponse pour l'effort F_x en fonction de (V_c, f, a_p).	80

Figure III.9.	Effet de conditions de coupe sur l'effort F_y .	82
Figure III.10.	Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour F_y .	83
Figure III.11.	Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour F_y .	83
Figure III.12.	Surface de réponse et pour l'effort F_y en fonction de (V_c, f, ap) .	84
Figure III.13.	Effet de conditions de coupe sur l'effort F_z .	85
Figure III.14.	Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour F_z .	86
Figure III.15.	Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour F_z .	87
Figure III.16.	Surface de réponse pour l'effort F_z en fonction de $(V_c, f et ap)$.	88
Figure III.17.	Effet de conditions de coupe sur la rugosité R_a .	89
Figure III.18.	Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour R_a .	90
Figure III.19.	Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour R_a .	91
Figure III.20.	Surface de réponse pour la rugosité R_a .	92
Figure III.21.	Effet de conditions de coupe sur la rugosité R_z .	93
Figure III.22.	Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour R_z .	94
Figure III.23.	Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour R_z .	95
Figure III.24a	Surface de réponse de la rugosité R_z en fonction de (V_c, f, ap) .	95
Figure III.24b	Topographié d'une surface usinée avec trois avances.	96
Figure III.25.	Effet de conditions de coupe sur la puissance de coupe P_c .	98
Figure III.26.	Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour P_c .	99
Figure III.27.	Valeurs prévues en fonction des valeurs expérimentales pour P_c .	99
Figure III.28.	Surface de réponse pour P_c en fonction de $(V_c, f et ap)$.	100
Figure III.29.	Graphique de l'optimisation de la rugosité de surface.	103
Figure III.30.	Graphique de l'optimisation d'efforts de coupe.	104
Figure III.31.	Graphique de contour de désirabilité.	105
Figure III.32.	Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses.	106
Figure IV.1.	Analogie entre neurone formel et neurone biologique.	108
Figure IV.2.	Schéma d'un neurone formel.	109
Figure IV.3.	Fonction de transfert : (a) du neurone «seuil» ; (b) du neurone «linéaire », et (c) du neurone «sigmoïde».	110

Figure IV.4.	Perceptron multi-couches.	111
Figure IV.5.	Système d'apprentissage du réseau de neurone.	112
Figure IV.6.	Architecture neurale choisie pour l'effort (F_x).	114
Figure IV.7.	Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour (F_x).	115
Figure IV.8.	Architecture neurale choisie pour l'effort (F_y).	116
Figure IV.9.	Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour (F_y).	117
Figure IV.10.	Architecture neurale choisie pour l'effort (F_z).	118
Figure IV.11.	Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour l'effort F_z .	119
Figure IV.12.	Architecture neurale choisie pour la rugosité (R_a).	120
Figure IV.13.	Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (R_a).	121
Figure IV.14.	Architecture neurale choisie pour la rugosité (R_z).	122
Figure IV.15.	Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (R_z).	123
Figure IV.16.	Comparaison entre les valeurs expérimentales, prédites par RSM et ANN : a) R_a , b) R_z .	125
Figure IV.17.	Comparaison entre les valeurs expérimentales, prédites par RSM et ANN : a) Effort axial (F_x), b) Effort radial (F_y) et c) Effort tangentiel (F_z).	126

Index des tableaux

Tableau I.1.	Céramiques utilisées pour les outils de coupe.	21
Tableau I.2.	Caractéristiques mécaniques des fibres de base.	35
Tableau I.3.	Caractéristiques générales et mécaniques de différents types de polyamides.	38
Tableau.II.1.	Propriétés mécaniques de PA66 GF30.	53
Tableau.II.2.	Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L27).	61
Tableau II.3.	Table orthogonale de Taguchi pour un plan de 27.	65
Tableau III.1.	Evolution des conditions en fonction des paramètres de sortie.	65
Tableau III.2.	Résultats des conditions de coupe en fonction des paramètres du de coupe.	77
Tableau III.3.	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_x .	78
Tableau III.4.	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_y .	81
Tableau III.5.	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_z .	85
Tableau III.6.	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité R_a .	89
Tableau III.7.	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité R_z .	93
Tableau III.8.	Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe P_c .	97
Tableau III.9.	Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de copeau MMR.	101
Tableau III.10.	Conditions d'optimisations.	102
Tableau III.11.	Solutions pour l'optimisation de la qualité de surface.	103
Tableau III.12.	Solutions pour l'optimisation de l'effort de coupe.	104
Tableau III.13.	Solutions pour l'optimisation combinée.	105
Tableau IV.1.	Fonctions de transfert $a = f(n)$.	110
Tableau IV.2.	Résultats expérimentaux des paramètres de performance.	113
Tableau IV.3.	Conditions de la modélisation de l'effort de coupe (F_x) par les ANN.	115
Tableau IV.4.	Conditions de la modélisation de l'effort de coupe (F_y) par les ANN.	117
Tableau IV.5.	Conditions de la modélisation de l'effort (F_z) par les ANN.	119
Tableau IV.6.	Conditions de la modélisation de la rugosité de surface (R_a) par les ANN.	121
Tableau IV.7.	Conditions de la modélisation de la rugosité de surface(R_a) par les ANN.	123
Tableau IV.8.	Coefficients de corrélation pour RSM et ANN.	124

Nomenclature

<i>f</i>	Avance (tr/min)
Vc	Vitesse de coupe (m/min)
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
Ks	Effort spécifique de coupe (N/mm ²)
RSM	Méthodologie de surface de réponse
Ra	Rugosité moyenne arithmétique (μm)
Rz	Profondeur moyenne de la rugosité (μm)
Rq	Moyenne quadratique (μm)
R²	Coefficient de détermination
Cont%	Pourcentage de contribution (%)
Pc	Puissance de coupe (W)
MRR	Débit du copeau enlevé (m ³ /min)

Sommaire

Introduction générale.....	14
----------------------------	----

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Introduction.....	17
I.2. Généralité sur la coupe des métaux.....	17
I.2.1. Définition de l'usinabilité.....	18
I.2.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité	18
I.2.3. Les matériaux de coupe	19
I.2.3.1. Carbures.....	19
I.2.3.2. Cermets.....	20
I.2.3.3. Céramiques.....	21
I.2.3.4. Nitrure de Bore Cubique (CBN).....	21
I.3. Formation du copeau.....	22
I.4. Paramètres technologiques d'usinage.....	23
I.4.1. Efforts de coupe.....	23
I.4.2. La puissance de coupe.....	25
I.4.3. Effort spécifique de coupe (pression de coupe).....	26
I.4.4. Définition des critères de Rugosité.....	27
I.4.5. Température de coupe.....	28
I.5. Les matériaux polymères.....	29
I.5.1. Définition des polymères.....	29
I.5.2. Classement des polymères.....	30
I.6. Les polymères composites.....	33
I.6.1. Définition d'un composite	34
I.6.2. Le renforts	34
I.6.3. Les fibres de verre	34
I.6.4. Matrice.....	35
I.6.5. Polyamides aliphatiques	36
I.6.6. Les polyamides renforcés (PA6.6 GF30)	37
I.6.7. Les applications pour le Polyamide.....	37
I.7. Travaux de recherches concernant l'usinage des polymères	38
Conclusion.....	49

Chapitre II : Procédures expérimentales

II.1. Introduction.....	51
II.2. Matériels utilisé.....	51
II.2.1. Machine-outil.....	51
II.2.2. Matériau à usiné.....	52
II.2.3. Plaquette et porte outils utilisés.....	54
II.2.4. Chaîne de mesure utilisée.....	55

II.2.4.1. Dynamomètre.....	57
II.2.4.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité.....	57
II.3. Autres équipements.....	59
II.4. Planification des expériences.....	59
II.5. Méthodologie de recherche.....	59
II.6. Méthode de planification des expériences.....	60
II.7. Conclusion.....	62

Chapitre III : Résultats des essais paramétriques et modélisation et optimisation des conditions de coupe

III.1. Introduction.....	64
III.2. Essais paramétriques.....	64
III.2.1. Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface.....	65
a. Effet de la vitesse de coupe.....	65
b. Effet de la profondeur de passe.....	66
c. Effet de l'avance.....	67
III.2.2. Effet des conditions de coupe sur les efforts de coupe.....	67
a. Effet de la vitesse de coupe.....	67
b. Effet de la profondeur de passe.....	68
c. Effet de l'avance.....	68
III.2.3. Effet des conditions de coupe sur l'effort spécifique de coupe (Ks).....	70
a. Effet de la vitesse de coupe.....	70
b. Effet de l'avance.....	70
c. Effet de la profondeur de passe.....	71
III.2.4. Effet des conditions de coupe sur la puissance de coupe (Pc).....	71
a. Effet de la vitesse de coupe.....	71
b. Effet de l'avance.....	71
c. Effet de la profondeur de passe.....	71
III.3.1. Analyse de variance (ANOVA).....	73
III.3.2. Méthodologie des surfaces de réponses.....	73
III.4. Résultats et discussions.....	76
III.4.1. L'effort axial F_x	77
III.4.1.1. Analyse de variance ANOVA pour F_x	77
III.4.1.2. Les effets principaux pour F_x	78
III.4.1.3. Analyse de régression pour F_x	79
III.4.1.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et Estimées.....	79

III.4.1.5. Analyse de surface de réponse pour F_x.....	80
III.4.2. Modélisation de l'effort radiale F_y.....	81
III.4.2.1. Analyse de variance ANOVA pour F_y.....	81
III.4.2.2. Effets principaux pour F_y.....	81
III.4.2.3. Analyse de régression pour F_y.....	82
III.4.2.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et Estimées.....	82
III.4.2.5. Analyse de surface de réponse pour F_y.....	84
III.4.3. Modélisation de l'effort tangentiel F_z.....	84
III.4.3.1. Analyse de variance ANOVA pour F_z.....	84
III.4.3.2. Effets principaux pour F_z.....	85
III.4.3.3. Analyse de régression pour F_z.....	86
III.4.3.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et Estimées.....	86
III.4.3.5. Analyse de surface de réponse pour F_z.....	87
III.4.4. Modélisation de la rugosité de surface R_a.....	88
III.4.4.1. Analyse de variance ANOVA pour R_a.....	88
III.4.4.2. Effets principaux pour R_a.....	89
III.4.4.3. Analyse de régression pour R_a.....	89
III.4.4.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et Estimées.....	90
III.4.4.5. Analyse de surface de réponse pour R_a.....	91
III.4.5. Analyse de la rugosité de surface R_z.....	92
III.4.5.1. Analyse de variance ANOVA pour R_z.....	92
III.4.5.1. Effets principaux pour R_z.....	93
III.4.5.2. Analyse de régression pour R_z.....	94
III.4.5.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et Estimées.....	94
III.4.5.4. Analyse de surface de réponse pour R_z.....	95
III.4.6. Modélisation de la puissance de coupe.....	97
III.4.6.1. Analyse de variance ANOVA pour P_c.....	97
III.4.6.2. Effets principaux pour la puissance P_c.....	97
III.4.6.3. Analyse de régression pour la puissance de coupe P_c.....	99
III.4.6.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées...	98
III.4.6.5. Analyse de surface de réponse pour P_c.....	100
III.4.7. Modélisation de débit de copeau MMR.....	101
III.4.7.1. Analyse de variance ANOVA pour MMR.....	101
III.5.3. Optimisation des conditions de coupe.....	101
III.6. Conclusion.....	106

Chapitre IV : Application des (ANN) pour modéliser les paramètres de performance lors de l'usinage du polyamide PA6.6 GF30

IV.1. Introduction.....	108
IV.2. Les réseaux de neurones artificiels.....	108
IV.2.1. Définition.....	108
IV.2.2. Neurone formel.....	109
IV.2.3. Fonctions de transfert.....	109
IV.2.4. Perceptron	111
IV.2.4.1. Perceptron simple.....	111
IV.2.4.2. Perceptron multicouches.....	111
IV.2.5. Algorithme de rétro-propagation.....	112
IV.2.6. Apprentissage.....	112
IV.3. Modélisation des paramètres de performance par réseaux de neurones artificiels.....	112
IV.3.1. Modélisation de l'effort axial de coupe (Fx) par ANN.....	113
IV.3.2. Modélisation de l'effort radial de coupe (Fy) par ANN	115
IV.3.3. Modélisation de l'effort tangentiel de coupe (Fz) par ANN.....	117
IV.3.4. Modélisation de la rugosité de surface (Ra) par ANN.....	119
IV.3.5. Modélisation de la rugosité de surface (Rz) par ANN.....	121
IV.4. Comparaison des résultats obtenus par les ANN et la méthodologie de surface des réponses RSM.....	124
IV.5. Conclusion.....	127
Conclusion générale.....	128
Références bibliographiques.....	131

Introduction générale

Le progrès de l'industrie mécanique connaît une grande concurrence entre les producteurs dans ce domaine, car la valeur d'une pièce produite en mécanique est définie par la quantité et la qualité du produit durant un temps bien précis. Ces facteurs ne se maîtrisent que par l'application d'une méthodologie permettant d'optimiser les conditions de travail. Aussi l'usinage par enlèvement de matière se classe parmi les procédés les plus utilisés comparativement à ceux par déformations ou autres, l'étude et l'analyse des phénomènes qui accompagnent l'usinage demeurent un domaine inévitable pour comprendre le mécanisme de la coupe et particulièrement lors de l'usinage des nouveaux matériaux comme les polymères.

Les polyamides appelés Nylons, sont des matériaux techniques utilisés dans des domaines de plus en plus variés, tels que l'automobile, l'électronique, l'industrie des sports et des loisirs...etc. Les polyamides renforcés (30%) par des fibres de verre PA6.6GF30 s'utilisent pour une grande diversité de pièces dans la construction de machines et d'appareils ainsi que dans l'entretien industriel. Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques et leurs renforcements.

Toutefois les spécialistes de l'usinage des PA6.6GF30 sont très peu nombreux car les polyamides sont complexes à usiner, ils sont sujets à des déformations compliquées à gérer et les copeaux sont difficiles à maîtriser. Aussi la nécessité de pouvoir produire plus rapidement et en plus grande quantité pousse les industriels à se questionner sur la modélisation et l'optimisation de l'usinage.

Notre sujet rentre dans ce cadre, il a pour but la modélisation en utilisant deux méthodes à savoir, la méthodologie de surface de réponse et les réseaux de neurones artificiels lors de l'usinage du PA6.6 GF30. Aussi, la fonction de désirabilité (DF) a été utilisé afin d'optimiser les conditions de coupe suivant plusieurs objectifs. Notre mémoire de fin d'étude est organisé aux quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique, au premier lieu on présente des notions sur la coupe des métaux tels que la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité, les paramètres régissant le processus de coupe. En deuxième lieu, nous présentons, une étude sur les polymères et particulièrement le polyamide PA6.6GF30. Finalement, une présentation des travaux de recherche relatifs au tournage des différents types des polymères renforcés est réalisée.

Le deuxième chapitre, est dédié à la présentation des équipements nécessaires à la réalisation des essais, 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'usinage du PA6.6GF30 avec un outil en carbure métallique lors du à sec. D'abord, on a présenté les résultats des essais paramétriques sur l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface, les efforts de coupe, l'effort spécifique et la puissance de coupe. Le but est d'étudier l'évolution des paramètres de sortie et de déterminer la plage de fonctionnement correcte du couple outil-matière. Ensuite, nous exposant les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) suivant un plan Taguchi (L27), l'objective est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres technologiques d'usinage étudiés. Cette étude a abouti à la détermination des modèles mathématiques exprimant la relation entre les paramètres de sortie (F_x , F_y , F_z , R_a , R_z , P_c et MRR) et les paramètres d'entrée (V_c , f et a_p) en se basant sur la méthodologie de surface de réponse (RSM). Finalement, nous présentons l'optimisation des conditions de coupes pour déterminer les conditions sur les variables indépendantes qui conduisent à des valeurs optimales suivants plusieurs objectifs.

Dans le quatrième chapitre, est destiné à l'approche ANN (réseaux de neurones) pour modéliser la rugosité de la surface et les efforts de coupe en fonction de différents paramètres de régime de coupe. Finalement et pour vérifier l'efficacité et la robustesse de la méthode des ANN, nous avons fait une comparaison entre cette dernière et la méthode de la surface de réponse.

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

Chapitre I

Recherche 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. Parmi ces matériaux, les polyamides renforcés. Leurs applications vont des matériels de bureautique, de l'agroalimentaire, l'automobile, les machines de textiles et autres.

Dans ce chapitre, nous présentons une revue bibliographique qui est divisée en trois parties. La première est consacrée aux définitions de quelques rappels des bases scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux, la seconde partie est dédiée aux matériaux polymères renforcés et les polyamides renforcés. On présente aussi dans cette partie les matériaux composites à matrice polymères. La troisième partie porte sur les différents travaux de recherche sur l'usinage des polymères.

I.2. Généralité sur la coupe des métaux

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

La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, etc...) sur le comportement d'un matériau en utilisant des outils différents dans la composition et la géométrie (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN). Au contraire, L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème et l'autre part l'aspect mécanique du problème [1].

I.2.1. Définition de l'usinabilité

L'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité plus au moins grande d'un matériau à être amené par enlèvement de copeau, à une forme et à des côtes fixées. Cette faculté étant caractérisée par la vie de l'outil, définie par les critères d'usure dans les conditions d'un type d'usinage. L'aptitude à l'usinage dépend des caractéristiques mécaniques du matériau mis en œuvre, de sa structure micrographique et des phases dispersées dans la matrice dont l'action peut être bénéfique ou néfaste. Ces caractéristiques sont déterminées, dans l'état liquide au cours de l'élaboration du métal de compositions donné, des conditions de sa solidification, de sa forme sous des efforts mécaniques et des cycles thermiques subis. On distingue aujourd'hui les aciers de décolletage pour lesquels l'usinabilité maximale est recherchée même au détriment des caractéristiques mécaniques (pièce peut sollicitées) et les aciers à usinabilités améliorés qui doivent avoir de hautes caractéristiques après traitement (pièce fortement sollicitées). Les inclusions qui jouent un très grand rôle dans l'usinabilité peuvent être présentes involontairement ou provoqués. Leur morphologie et localisation ont une grande importance. Il semble que l'on puisse dire que toutes choses étant égales par ailleurs, la meilleure usinabilité est obtenue par la combinaison des éléments présents conduisant à la fois des niveaux de dureté et fragilité convenable. Dans le domaine des aciers spéciaux il y a lieu de distinguer les éléments formant des carbures (vanadium, tungstène...), ceux entrant en solution solide dans la matière (nickel, silicium...) et ceux présentant les des caractéristiques (manganèse, chrome...).

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

Étant donné que l'usinabilité a été définie de différentes façons cependant les critères de son évaluation se diffèrent aussi d'un chercheur à l'autre. Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent du type d'opération et de l'usineur.

Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont [2] :

- ✓ La durée de vie de l'outil.
- ✓ La température de coupe.
- ✓ La rugosité de la surface usinée
- ✓ 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.

I.2.3. Matériaux de coupe

Dans l'industrie manufacturière, le choix d'un outil de coupe approprié est l'activité la plus critique pour obtenir une meilleure qualité de produit et pour contrôler le coût global de fabrication. Les matériaux de l'outil doivent posséder un certain nombre de propriétés importantes pour éviter une usure excessive, une défaillance de rupture et des températures élevées lors de la coupe :

- ✓ Leur dureté
- ✓ Leur résistance à l'abrasion
- ✓ Leur ténacité et leur inertie chimique à haute température.

Les principaux matériaux de coupe utilisés en tournage sont : les carbures, les céramiques, les cermets et le nitrure de bore cubique.

I.2.3.1. Carbures

Les outils carbures sont les plus utilisés actuellement. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil. Le remplacement de la plaquette est

donc très rapide. Ils sont souvent revêtus d'un carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure.

a) Carbures métalliques sans revêtement

La dureté des carbures métalliques (environ 1500 à 2500 HV), jointe à une résistance importante (résistance à la flexion de 800 à 2200 MPa) rend ces aciers plus utilisés. Leur dureté à chaud permet l'usinage jusqu'à une température de 1000 °C. La symbolisation des carbures a fait l'objet de la recommandation NF E 66-304 (ISO 513), les nuances y sont divisées en trois grandes catégories :

- P : pour métaux ferreux à copeaux longs ;
- M : pour métaux ferreux à copeaux longs, à copeaux courts et métaux non ferreux ;
- K : pour métaux ferreux à copeaux courts, métaux non ferreux et matières non métalliques.

b) Carbures métalliques avec revêtement

Le carbure revêtu est constitué par une plaquette en carbure métallique recouvert par un film mince (3 à 10 µm) d'un matériau plus dur. Les couches les plus usuelles sont le carbure de titane, le nitrure de titane, le carbonitrure de titane et l'alumine.

I.2.3.2. Cermets

Ce nom vient de céramique-métal car il représente les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitrure de Titane ou de nitrure de Titane. Ces outils doivent être alliés à du carbure de Molybdène pour augmenter leur ténacité. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige.

I.2.3.3. Céramiques

Ce sont, pour les outils de coupe, les oxydes et les nitrures : oxyde d'aluminium et nitrure de silicium. Ils sont Stable, pas trop cher. Chimiquement inertes et extrêmement résistants à la chaleur, les céramiques sont habituellement souhaitables dans les applications à grande vitesse, le seul inconvénient étant leur grande fragilité. Leurs Dureté jusqu'à environ HRC 93. Les arêtes tranchantes et les angles de râteau positifs doivent être évités.

Les céramiques permettent un grand débit de matière, mais nécessitent une grande stabilité de la machine, un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage adaptée (approche de l'outil).

Tableau I.1. Céramiques utilisées pour les outils de coupe.

Céramiques oxydées	Céramiques mixtes		Céramiques non oxydées
Céramiques blanches	Céramiques mixtes noires	Céramiques renforcées vertes (whiskers)	Sailon gris
Au début : Al_2O_3	Al_2O_3-TiC (30%)		Base Si_3N_4
Actuellement : $Al_2O_3 + ZrO_2$	$Al_2O_3-TiN-TiC$ Al_2O_3-WC, TaC	$Al_2O_3-fibres SiC$	
← Dureté			Ténacité →

I.2.3.4. Nitrure de Bore Cubique (CBN)

Le CBN offre une très grande dureté, c'est le matériau le plus dur après le diamant. Il comporte l'avantage par rapport au diamant de ne pas s'oxyder à haute température. Elle est aussi la deuxième plus fragile. Il offre une résistance extrêmement élevée à l'abrasion aux dépens de beaucoup de ténacité, Utilisé presque exclusivement sur les outils de tournage. Dureté supérieure à HRC95. Les arêtes vives ne sont généralement pas recommandées. Son utilisation requiert :

- Une machine stable.
- Une grande rigidité de la pièce et du porte pièce.
- Un arrosage.

I.3. Formation du copeau

La formation du copeau résulte d'actions mécaniques complexes. Pour simplifier, on peut dire que l'arête de coupe pénètre dans la matière et provoque la formation du copeau. Le frottement du copeau sur la face de coupe et celui de la pièce sur la face de dépouille provoquent une élévation importante de la température qui peut entraîner une fusion locale du copeau. Ce phénomène peut conduire à l'adhérence du copeau sur la face de coupe (copeau adhérent). Les principaux facteurs influençant la formation du copeau sont :

- 1- La vitesse de coupe (V_c)
- 2- La profondeur de passe (a)
- 2- La vitesse d'avance (V_f)
- 4- La géométrie de l'outil ;
- 5- Les matériaux de l'outil et de la pièce
- 6- La lubrification.

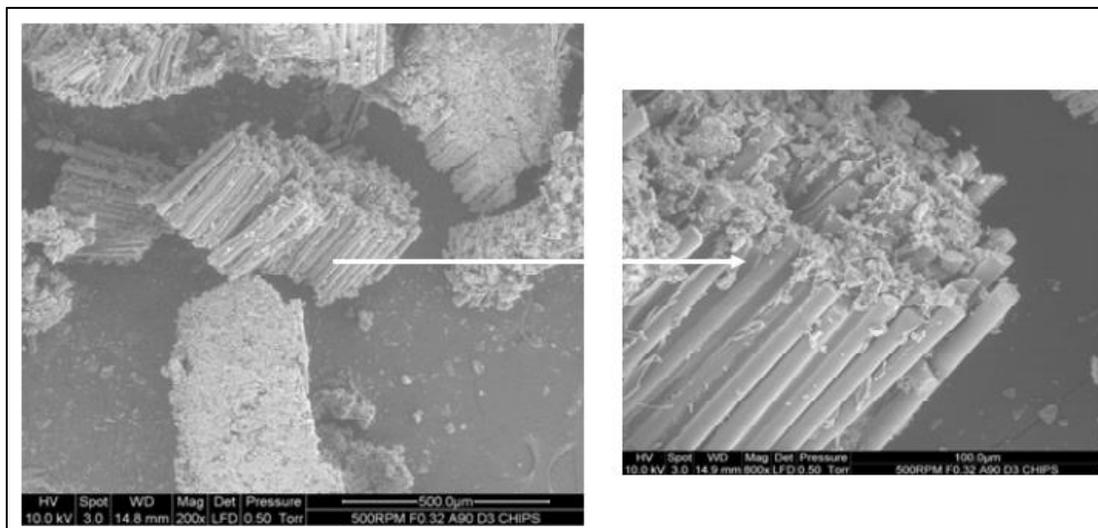


Figure I.1. Morphologies des copeaux collectés lors de la coupe à 90° par rapport à l'orientation des fibres [3].

La Figure I.1 représente un copeau en cours de formation d'un polymère renforcé On observe que [3] :

- Une ductilité insuffisante et des propriétés non homogènes des composites GFRP ont produit des copeaux discontinus et à fracturation au cours de l'opération d'usinage.
- Les morphologies des copeaux collectés et de la surface usinée ont révélé la flexion, le flambement, la fracture, le délaminage et la compression par écrasement du renforcement des fibres et du matériau de la matrice.
- Les divers modes de défaillance ou de fracture des matériaux semblent se produire de manière aléatoire le long de la surface usinée.
- Sous la vitesse de coupe la plus légère testée, une couche de copeaux délaminés s'est vue pelée le long de la face de coupe de l'outil de coupe. Cependant, une vitesse de coupe accrue a abouti à des segmentations de copeaux plus petites. Ceci était principalement dû à la contrainte accrue sur la surface de la puce et à la faible adhérence adhésive entre les fibres et la résine époxy matrice.

I.4. Paramètres technologiques d'usinage

I.4.1. Efforts de coupe

De tous les procédés d'usinage, la coupe est la méthode la plus fréquemment utilisée pour Le façonnage des matériaux. L'étude et l'approximation des efforts de coupe sont nécessaires pour choisir les outils et dimensionner le porte-pièce ; leurs directions permettent de déterminer le sens de déplacement des outils afin que les appuis du montage s'opposent à ces efforts.

- **Dans le cas du tournage**

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour

toutes les opérations d'usinage. Grâce à la platine Kistler, on peut obtenir les différentes composantes (F_z , F_a et F_r) de l'effort global de coupe (**Figure I.2**).

- **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_x)** 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_y)** 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.

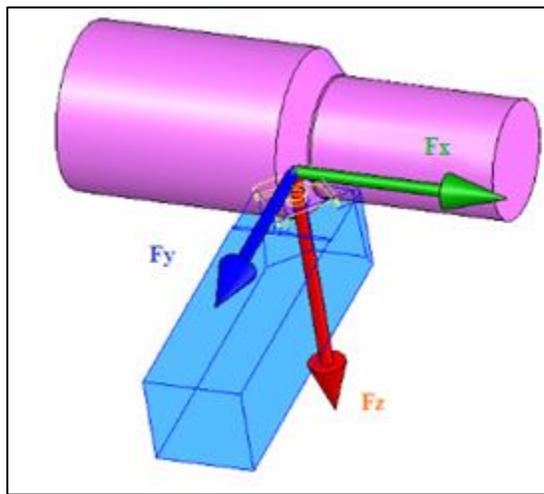


Figure I.2. Composantes de l'effort de coupe [4].

- **Rapport des composantes**

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

$$F_{rés} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (I.1)$$

I.4.2. Puissance de coupe

On distingue généralement deux puissances :

- la puissance de coupe (P_c) qui dépend principalement de la vitesse de coupe (V_c) et de l'effort tangentiel de coupe (F_c).
- la puissance au moteur (P_m), absorbée par la machine. Elle est fonction du rendement de la chaîne cinématique :

$$P_m = P_c / \eta \quad (\text{I.2})$$

Elle varie également en fonction de l'angle de coupe et de la direction de l'arête.

- **Cas du tournage**

On a défini la puissance dans le cas générale comme un le produit scalaire du Vecteur d'effort et vitesse :

$$\begin{aligned}
 P &= \vec{F} \cdot \vec{V} \\
 P &= \begin{vmatrix} F_a & V_a \\ F_f & V_f \\ F_c & V_c \end{vmatrix} \\
 P &= F_a \cdot V_a + F_f \cdot V_f + F_c \cdot V_c \quad (\text{I.3})
 \end{aligned}$$

En chariotage nous négligeons l'effort d'avancement et l'effort radial Donc :

$$P = (F_z \times V_c) / 60 \quad (\text{I.4})$$

- V_c : vitesse de coupe (m/s) ;
- F_z : force de coupe (N) ;
- P_c : puissance de coupe (W).

Mais, d'après l'expression de la force de coupe, on peut utiliser la formule suivante :

$$P = (K_s \times f \times a_p \times V_c) / 60 \quad (\text{I.5})$$

- **P_c** : puissance de coupe (W) ;
- **K_s** : pression de coupe (N/mm²) ;
- **a_p** : profondeur de passe (mm) ;
- **f** : avance (mm/tr) ;
- **V_c** : vitesse de coupe (m/s).

I.4.3. Effort spécifique de coupe (pression de coupe)

L'effort spécifique de coupe, aussi appelé pression de coupe, est également à déterminer. Cette grandeur est définie comme étant l'effort de coupe ramené à la section du copeau non déformé.

$$K_z = F_z / S \quad (\text{I.6})$$

- **F_z** : effort de coupe (N) ;
- **K_z** : pression de coupe (N/mm²) ;
- **S** : section du copeau (mm²).

$$S = a_p \times f \quad (\text{I.7})$$

- **f** : avance (mm/tr) ;
- **a_p** : profondeur de passe (mm) ;

L'effort spécifique varie en fonction de :

- Matériau usiné ;
- Epaisseur de coupe ;
- Angle de coupe ;

- Usure de l'outil.

I.4.4. Définition des critères de Rugosité

L'aptitude d'une pièce à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions notamment des caractéristiques de ses états de surface. Les paramètres de la rugosité définissent seulement les caractéristiques micro-géométriques de la surface. La caractérisation de la qualité de la surface usinée a été limitée aux trois critères de rugosité (R_a , R_t ou R_c et R_z ou R_p). Sont définis comme suit :

- **La hauteur des irrégularités sur dix points R_z** : R_z représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

$$R_z = 1/5 [(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})] \quad (I.8)$$

- **La hauteur maximale du profil R_t** : R_t représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.
- **L'écart quadratique de rugosité R_q** est la moyenne quadratique de toutes les ordonnées du profil à l'intérieur de la longueur de base.
- **L'écart moyen arithmétique du profil R_a** : Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil dans les limites de la longueur de base.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (I.9)$$

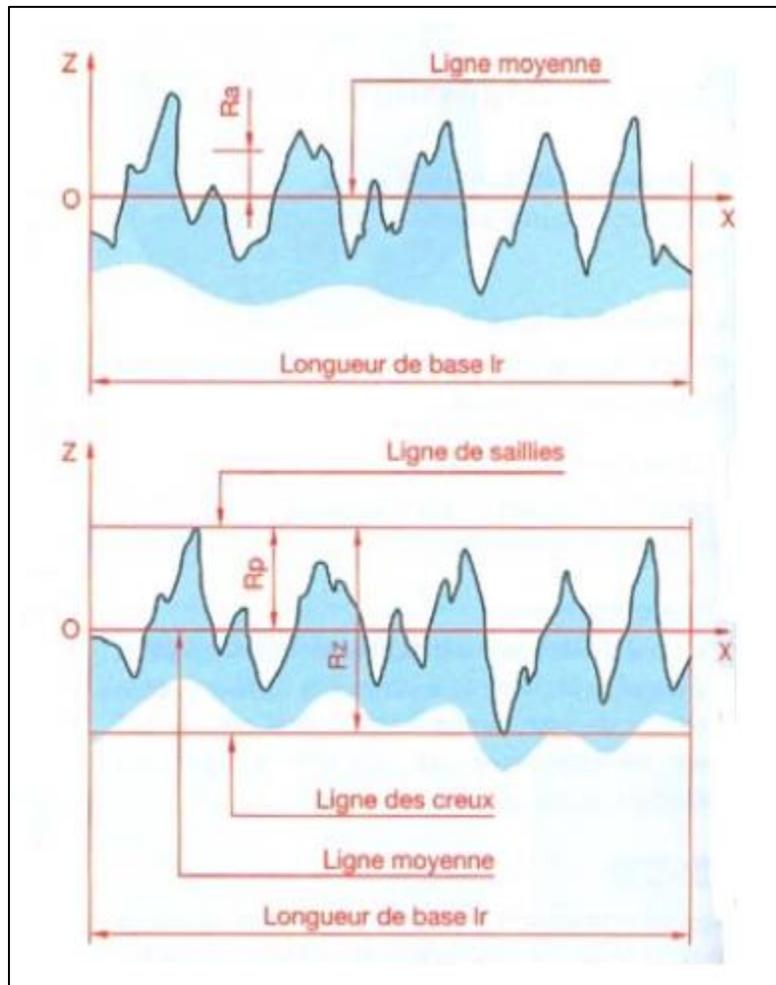


Figure I.3. Critères de rugosité [5].

I.4.5. Température de coupe

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

- des déformations plastiques des zones de cisaillement primaire et secondaire.
- de la dissipation du frottement générée à l'interface outil-copeau et entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée de la pièce. La chaleur ainsi créée va se répartir dans les différentes parties de l'outil, de la pièce et du copeau (**Figure I.4**). Le transfert de chaleur dans le copeau et dans la pièce s'effectue majoritairement par transport alors que dans l'outil le transfert s'effectue principalement par diffusion. De fait, la répartition des flux ne se fait pas de manière équivalente et dépend bien sûr des conditions de coupe et des propriétés thermiques des matériaux. Seul un faible pourcentage de la chaleur générée est transmis à l'outil et la pièce, la majorité étant évacuée par le copeau [6].

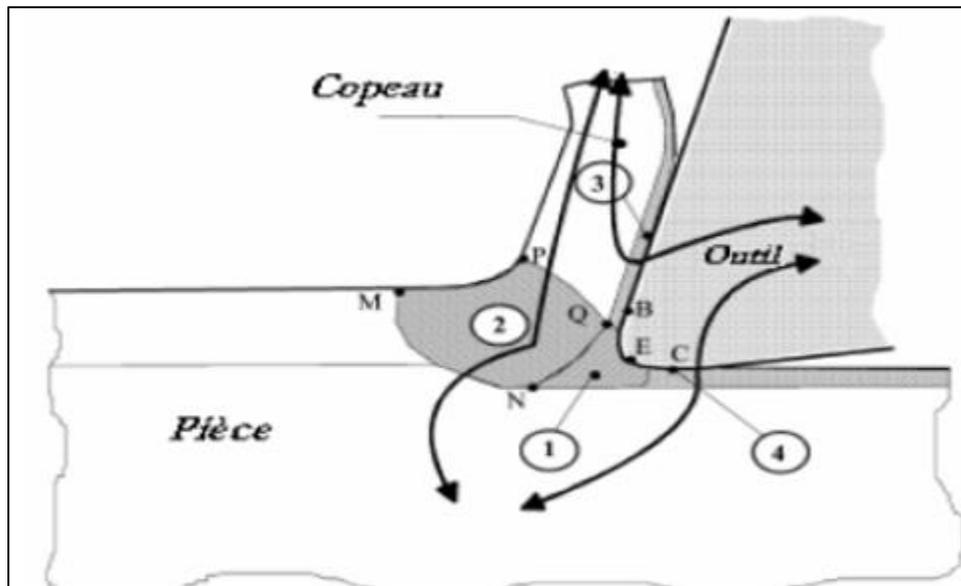


Figure I.4. Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur [6].

I.5. Matériaux polymères

I.5.1. Définition des polymères

Un polymère est une substance chimique produite par assemblage de petites molécules semblables qu'on appelle monomères. La réaction au cours de laquelle se réalise cet assemblage est une polymérisation. Les matières plastiques ainsi que de nombreuses

fibres textiles sont des polymères artificiels. Les polymères naturels (ou bio-polymères) sont très importants : protéines, acides nucléiques (ARN et ADN) et polysaccharides (glucides comme l'amidon, le glycogène ou la cellulose).

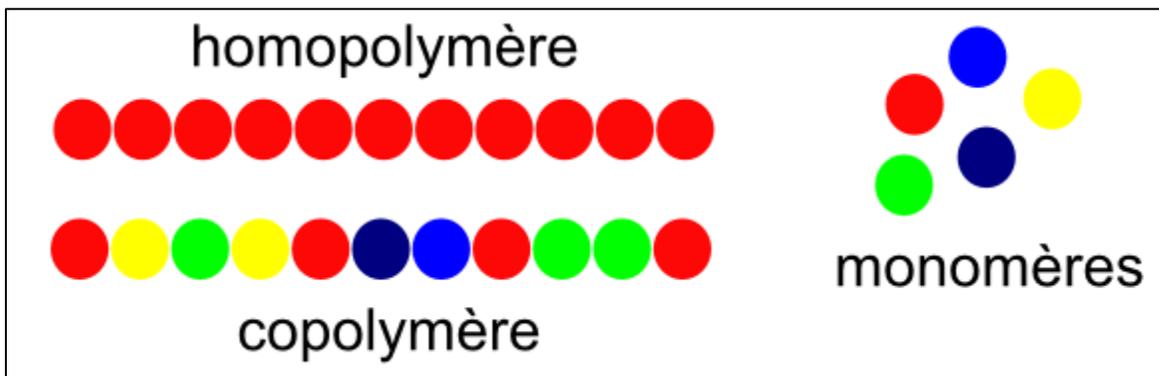


Figure I.5. Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.

On distingue deux grandes catégories de réactions permettant la préparation des polymères :

- La polymérisation en chaîne.
- La polycondensation.

Les polymères sont utilisés essentiellement pour :

- Leur souplesse : textiles, joints, flexibles, élastiques, films plastiques (emballage, sacs) ;
- Leur facilité de mise en forme : moulage d'objets de forme parfois complexe, contenants (flacons, bouteilles, bidons, cuves) ;
- Leur légèreté (faible masse volumique, certains flottent dans l'eau) : matrices de matériaux composites (construction navale, aviation), objets du quotidien ;
- Leurs propriétés de surface : anti-adhérence (Téflon) ou au contraire forte adhérence (pneu, peinture, colle) ;
- Leurs propriétés isolantes, thermiques et électriques ;
- Leur résistance à divers environnement chimiques : alimentaire, acides, ...
- Les limites d'utilisation sont :

- La température ;
- La dégradation sous l'effet des rayons ultraviolets, de l'air (dioxygène, ozone) et de l'eau ;
- Leur faible dureté ;
- Leur faible résistance à la traction (sauf les fibres) ;
- Leur faible résistance à l'érosion.

I.5.2. Classement des polymères

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

❖ Selon les propriétés

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

▪ Les thermoplastiques

Ils acquièrent par chauffage une fluidité suffisante pour être transformés sans modification de leur structure chimique (**Figure I.6**), et donc a priori de façon réversible, aux phénomènes de dégradation près. Parmi les principaux thermoplastiques, on peut citer le PE, le PP, le PS, le PVC, les polyamides, le PET ;

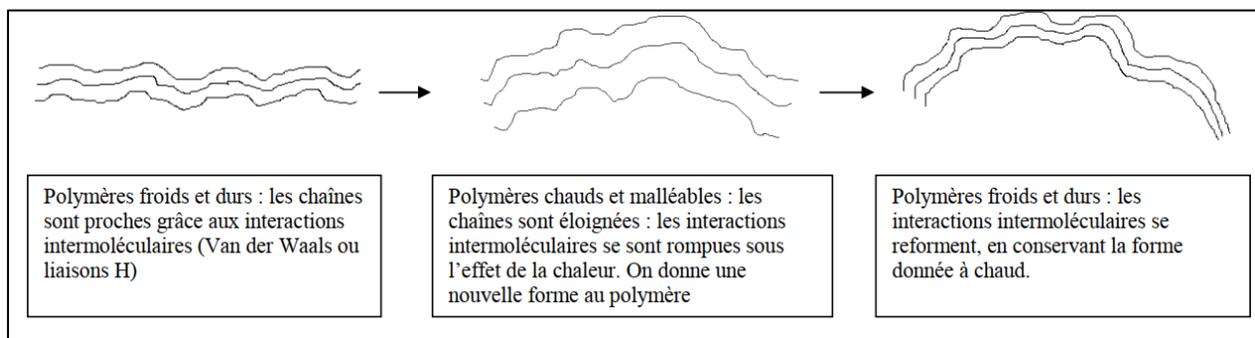


Figure I.6. Forme linéaires des polymères thermoplastiques.

▪ Les thermodurcissables

Une élévation de température provoque le durcissement du matériau, en lui conférant sa structure définitive, de façon irréversible. Par extension, on inclut dans cette famille tout polymère qui subit une transformation irréversible, même si la chaleur n'est pas indispensable. Ils sont obtenus par réaction chimique : les réticulations (liaisons covalentes) sont formées au cours du chauffage et ne peuvent ensuite plus être rompues (**Figure I.7**).

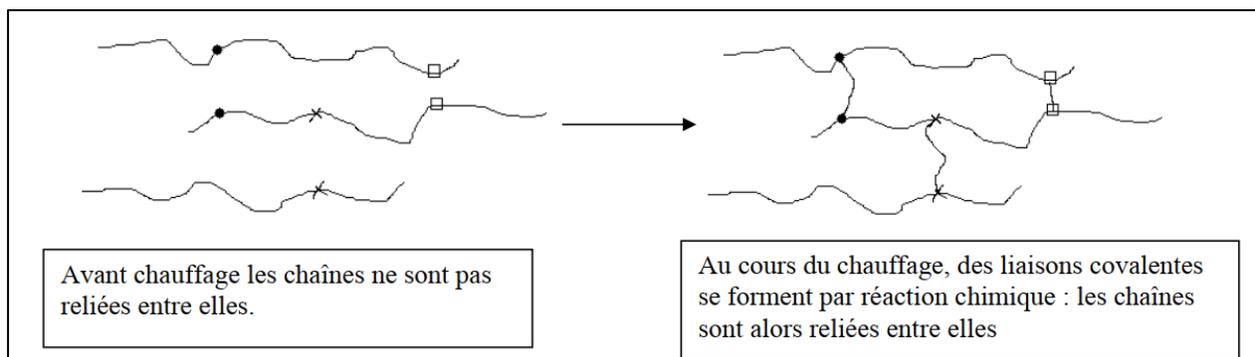


Figure I.7. Forme réticulés des polymères thermodurcissables.

▪ Les élastomères

Sont par définition des polymères ayant des propriétés élastiques réversibles .Exemple : caoutchouc naturel, polybutadiène, poly-isoprène.

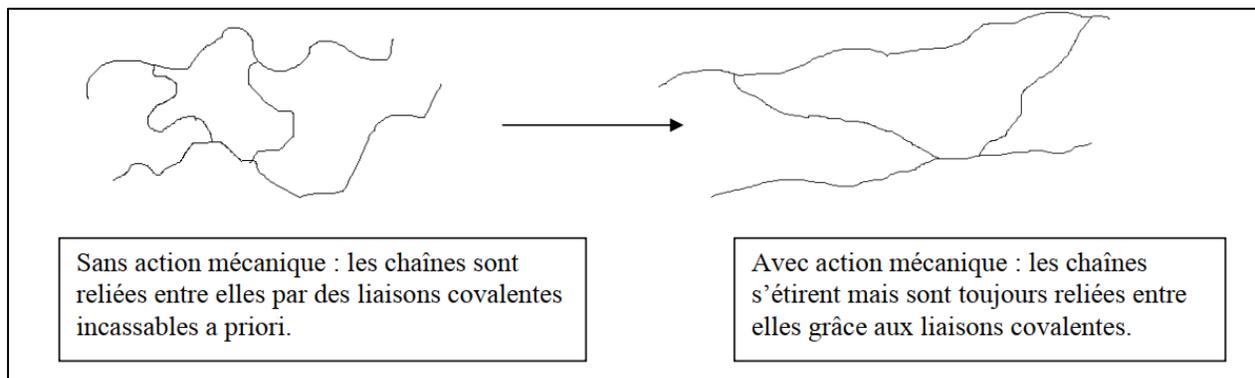


Figure I.8. Chaines des élastomères avec une action mécanique.

❖ Selon la structure chimique

On distingue :

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

On distingue les polymères :

- Linéaires
- Ramifiés
- Réticulés

❖ Selon l'origine

On peut classer les polymères en trois groupes :

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

I.6. Polymères composites

I.6.1. Définition d'un composite

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

Les composites présente les avantages suivantes :

- Grande résistance à la fatigue ;
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur ;

- Insensibles aux produits chimiques ;
- Bonne résistance à la corrosion ;
- Vitesse de fissuration faible et constante ;
- Meilleure répartition des contraintes ;
- Meilleure résistance au niveau des points d'assemblage ;
- Meilleure résistance aux impacts ;
- Poids moins élevé.

I.6.2. Renforts

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

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

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

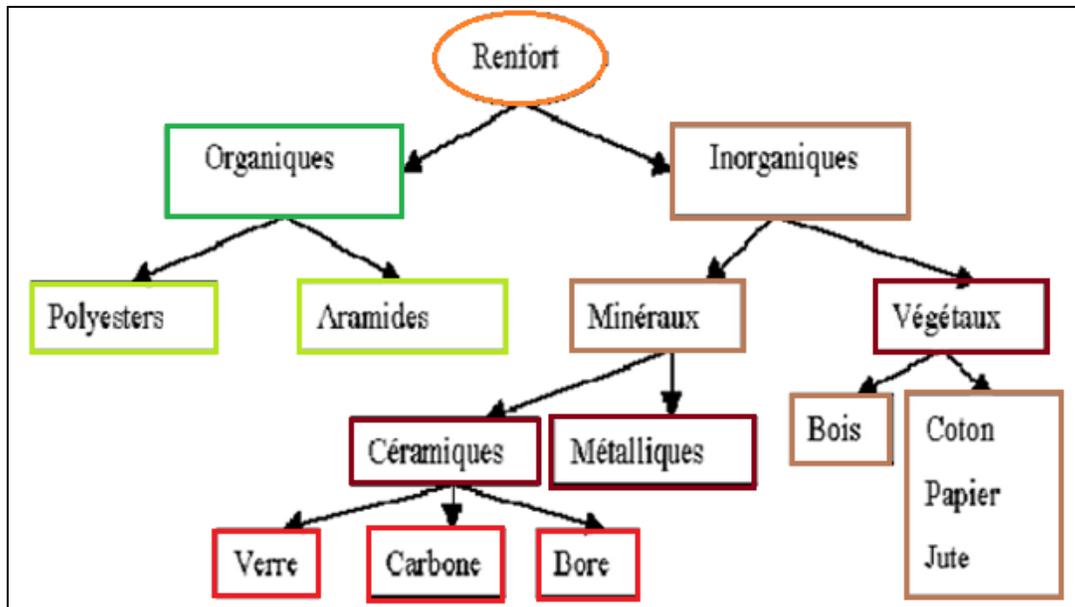


Figure I.9. Principaux matériaux de renfort.

I.6.3. Fibres de verre

Tableau I.2. Caractéristiques mécaniques des fibres de base.

Fibre	Densité	Charge de rupture en traction en MPa	Charge de rupture en compression MPa	Allongement à la rupture en %	Module d'élasticité longitudinal en MPa	Diamètre du filament élémentaire en μm
Verre E	2,54	3400	1200	4,8	73000	3 - 30
Verre R	2,48	4400	1300	5,4	86000	3 - 30
Aramide bas module	1,45	3100	500	2	70000	12
Aramide haut module	1,45	3100	500	1	130000	12
Carbone haute ténacité	1,78	2800	1800	0,5	200000	8
Carbone haut module	1,8	2200	1300	-	400000	8
Bore	2,63	3500	3500	0,8	400000	100 - 200
Acier XC10	7,85	1000	-	-	210000	-
Aluminium	2,63	358	-	-	69800	-

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

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

I.6.4. Matrice

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

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

I.6.5. Polyamides aliphatiques

Les polyamides aliphatiques (PA) sont désignés par un (ou plusieurs) chiffres relatifs au nombre d'atomes de carbone contenus dans le motif de répétition :

- les polyamides désignés par un seul chiffre (PA 6 par exemple) sont généralement obtenus par polymérisation en chaîne d'un lactame.
- les polyamides désignés par deux chiffres (PA 6.6 par exemple) sont en général obtenus par polycondensation entre un diacide carboxylique et une diamine. Les valeurs correspondent au nombre d'atomes de carbone composant un motif de la chaîne dont respectivement, le nombre d'atomes de carbone de la diamine et du diacide.

I.6.6. Polyamides renforcés (PA6.6 GF30)

Les polyamides sont une famille de polymères thermoplastiques techniques très fréquemment utilisés. Ils forment un réseau linéaire de fonctions amide. En plus des plusieurs familles de polyamides plusieurs copolymères et mélanges sont utilisés. Les performances des polyamides peuvent également être modifiées par des additifs et par un renfort fibreux.

Le PA66 GF30 noir est un PA66 renforcé de 30 % de fibres de verre (GF30). Ce nylon présente des propriétés mécaniques exceptionnelles avec une résistance mécanique, une rigidité, une tenue au fluage et une stabilité dimensionnelle plus élevées. Par rapport au PA66 non renforcé, les propriétés de ce PA66 GF30 chargé en verre rendent ce matériau adapté à des applications dans lesquelles les pièces sont soumises à des charges statiques élevées, pendant de longues durées et dans des conditions de température élevée. Les fibres de verre ayant tendance, dans certains cas, à avoir un effet abrasif marqué, le Nylon 66 GF30 est moins adapté aux applications de glissement. Grâce à ses additifs de couleur noire, le Nylon 66 GF30 noir présente une meilleure protection contre les UV dans les applications extérieures et résiste mieux aux intempéries.

I.6.7. Applications pour le Polyamide

La flexibilité du polyamide et ses grandes propriétés physiques et mécaniques permettent aux résines d'être utilisées dans divers champs d'applications tels que : industrie automobile (pour les mécanismes, ventilateurs, etc.), le textile, les industries mécaniques et électriques pour les appareils électroménagers, les meubles et l'agriculture.

Tableau I.3. Caractéristiques générales et mécaniques de différents types de polyamides [8].

Méthode de test		Densité	Absorption d'humidité	Résistance en traction	Allongement à la rupture	Module d'élasticité en traction	Résistance au choc ⁽⁴⁾	Dureté à la bille	Dureté shore D
DIN EN ISO 1183-1		DIN EN ISO 62	DIN EN ISO 527	DIN EN ISO 527	DIN EN ISO 527	DIN EN ISO 527	DIN EN ISO 179	DIN EN ISO 2039-1	DIN EN ISO 868
Matières \ Unités	Page	g/cm ³	%	MPa	%	MPa	kJ/m ²	MPa	Echelle D
PA6	20	1,14	3	80	≥50	3200	≥3	170	82
PA6G	28	1,15	2,5	75	≥45	3400	≥3	180	83
PA6.6	36	1,15	2,8	85	50	3300	≥3	180	83
PA6.6 GF30	40	1,32	1,7	100	5	5000	6	210	86

I.7. Travaux de recherches concernant l'usinage des polymères

Cette partie récapitule la recherche dans la littérature existante reliée à l'usinage des polyamides renforcé PA66 (GF30). L'objectif est de faire une étude à partir de ces articles publiés et de comprendre les travaux accomplis concernant l'usinage des PA66 GF30.

Durant la recherche bibliographique on a trouvé que beaucoup d'auteurs qui 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 des polymères renforcés. Plusieurs articles ont été publiés dans ce domaine, parmi eux on cite :

Davim et Mata [9] ont évalué l'influence du renforcement des fibres de verre lors de tournage des polymères PA6 et PA66 (GF30). Les expériences ont été effectuées sur des pièces extrudées d'un diamètre de 50 mm et d'une longueur de 100 mm avec un outil de coupe en carbure cémenté (K15), avec un outil au carbure cémenté (K15) (DCMW 11T3 04 H13A) de la géométrie suivante : angle de coupe 7°, angle de dépouille 0°, angle d'arête de coupe 93° et angle d'inclinaison de l'arête de coupe 0° et un porte-outil du type SDJCL 2020 K11. 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 (Figure I.10).

V (m/min)	f (mm/rev)	PA 6		PA 66 GF30	
		F_c (N)	F_t (N)	F_c (N)	F_t (N)
200	0.05	25.07	11.11	31.9	15.36
200	0.1	44.94	11.57	40.75	15.17
200	0.15	71.81	13.37	71.38	16.47
200	0.2	80.02	13.96	92	17.63
100	0.05	24.42	11.87	32.19	16.13
100	0.1	44.37	12.6	53.33	18.5
100	0.15	62.84	13.76	75.62	20.86
100	0.2	78.89	15.12	97.29	22.99
50	0.05	25.91	12.89	33.56	17.84
50	0.1	45.5	13.69	55.15	22.33
50	0.15	72.68	15.56	78.03	26
50	0.2	81.14	16.31	101.31	30.45

Figure I.10. Valeurs des forces de coupe (F_c et F_t) en fonction de paramètres de coupe pour le PA6 et le PA66 GF30 [9].

Gaitond et autres [10] ont fait une analyse des effets des paramètres de coupe pendant le micro-usinage du polyamide renforcé de 30% de fibres (PA66 GF30) avec deux outils de coupe en diamant poly-cristallines (PCD) et l'autre carbure cémenté (K10), 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 (R_a), l'effort de coupe spécifique (K_s) et la puissance de coupe (P). 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 (R_a) a été adoptée.

Ils ont trouvé les résultats démontrés que la meilleure usinabilité peut être obtenue avec l'outil PCD pour le polyamide PA66 GF30 et qu'elle est indépendante de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance (**Figure I.11**). D'autre part, le choix de l'outil de coupe pour le matériau PA6 est influencé par la vitesse de coupe et le taux d'alimentation (**Figure I.12**). Par conséquent, le renforcement améliore bien les propriétés mécaniques et thermiques mais au prix de l'usinabilité.

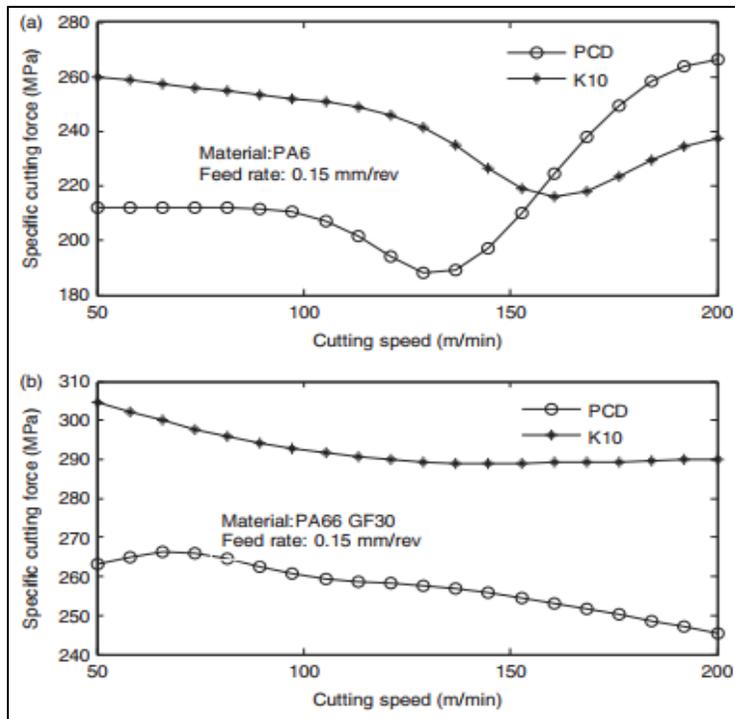


Figure I.11. Comparaison de la force de coupe spécifique des matériaux PA6 et PA66 GF30 [10].

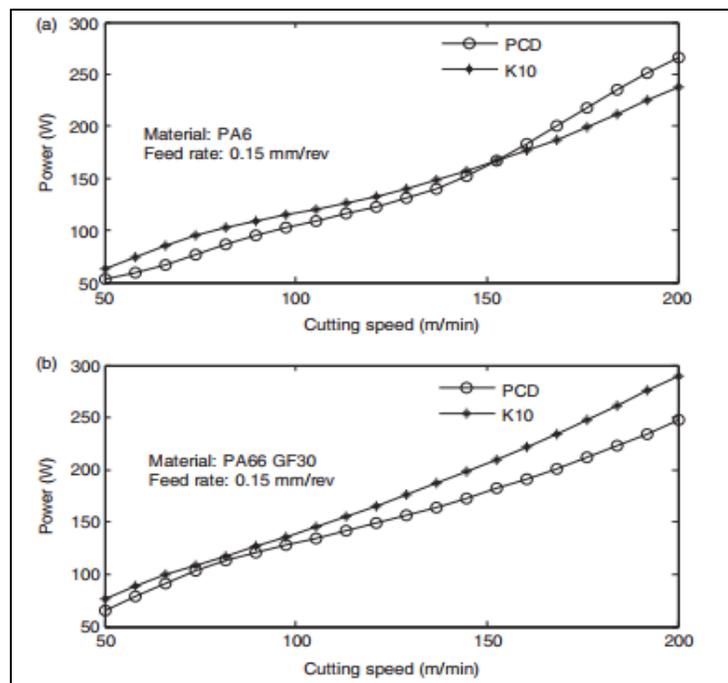


Figure I.12. Comparaison de la puissance des matériaux PA6 et PA66 GF30 [10].

L. R. Silva et autres [11] a présenté 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 $r_{\epsilon} = 0,4$ mm, l'effort radial a présenté des valeurs plus élevées suivies 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.13**).

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.14**).

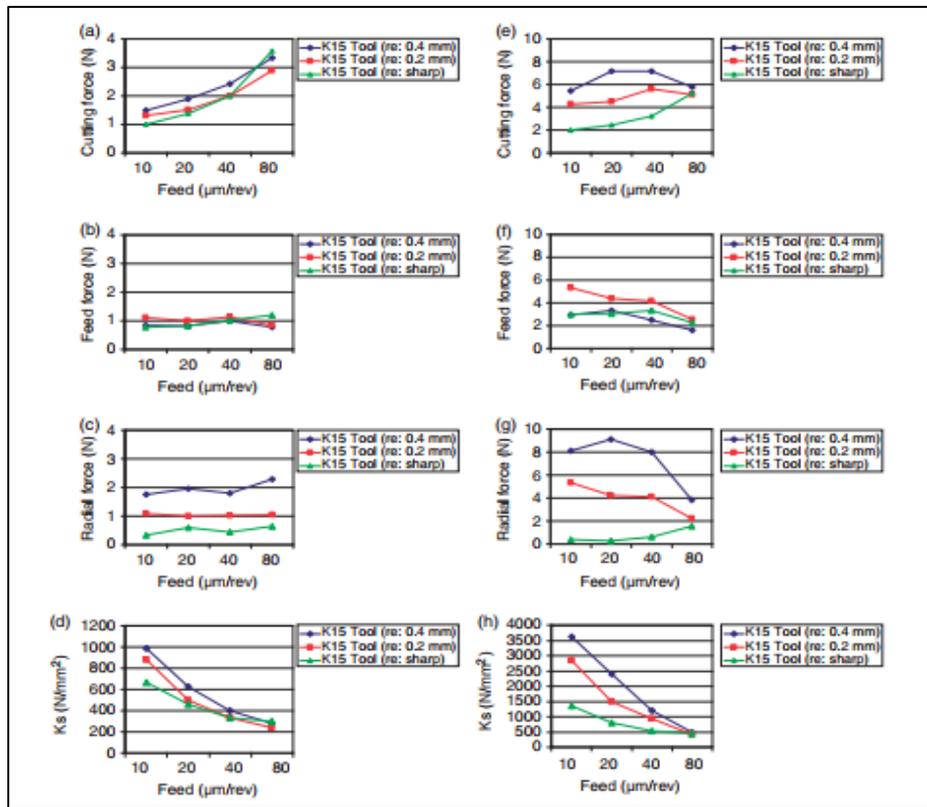


Figure I.13. Effet de l'avance sur (Ks) lors de l'usinage du composite PA66-GF30 et du polyamide PA66 à $V_c = 70 \text{ m/min}$ et $a_p = 150 \text{ mm}$: (a- d) pour le polymère PA66-GF30 et (e- h) pour le Polyamide PA66 [11].

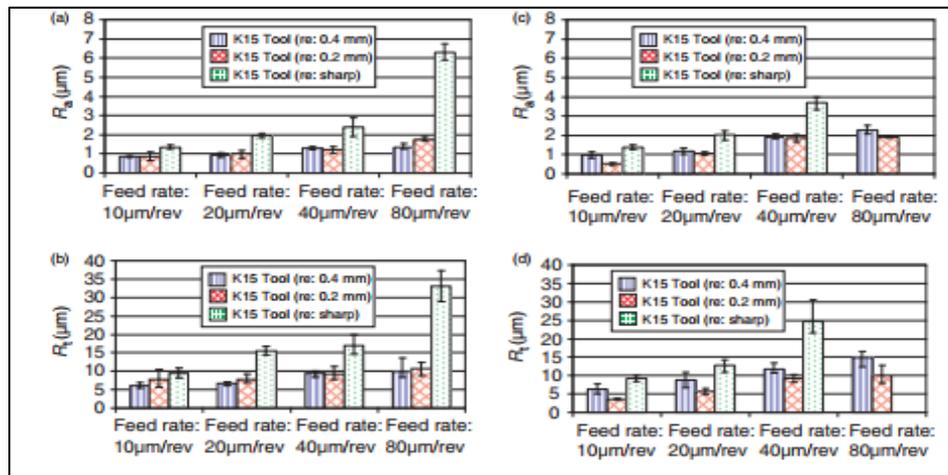


Figure I.14. Effet de l'avance et du rayon du bec de l'outil sur la rugosité de surface du composite PA66-GF30 (a et b) et du polyamide PA66 (c et d) [11].

F. Mata et J. Paulo Davim [12], ont étudié les performances des outils de coupe en diamant revêtu (CVD) avec des outils en diamant polycristallin (PCD) et (K10), lors de l'usinage de matériau composite en polyamides PA6 et les polyamides renforcés par 30% des fibres de verre (PA66GF). Selon les auteurs, le diamant revêtu (CVD) présente une faible consommation d'énergie par rapport aux autres outils en raison de leur dureté et bonne propriétés physiques et de la présence de la brise copeaux, qui jouent un rôle très important en comparaison avec le PCD (coûts de production). **Figure I.15**, et aussi la **figure I.16** illustre le rapport F_x/F_z pendant l'usinage deux polyamides, L'outil revêtu (CVD) présente les valeurs mineures du rapport. Ce qu'il indique une efficacité importante lors de l'usinage.

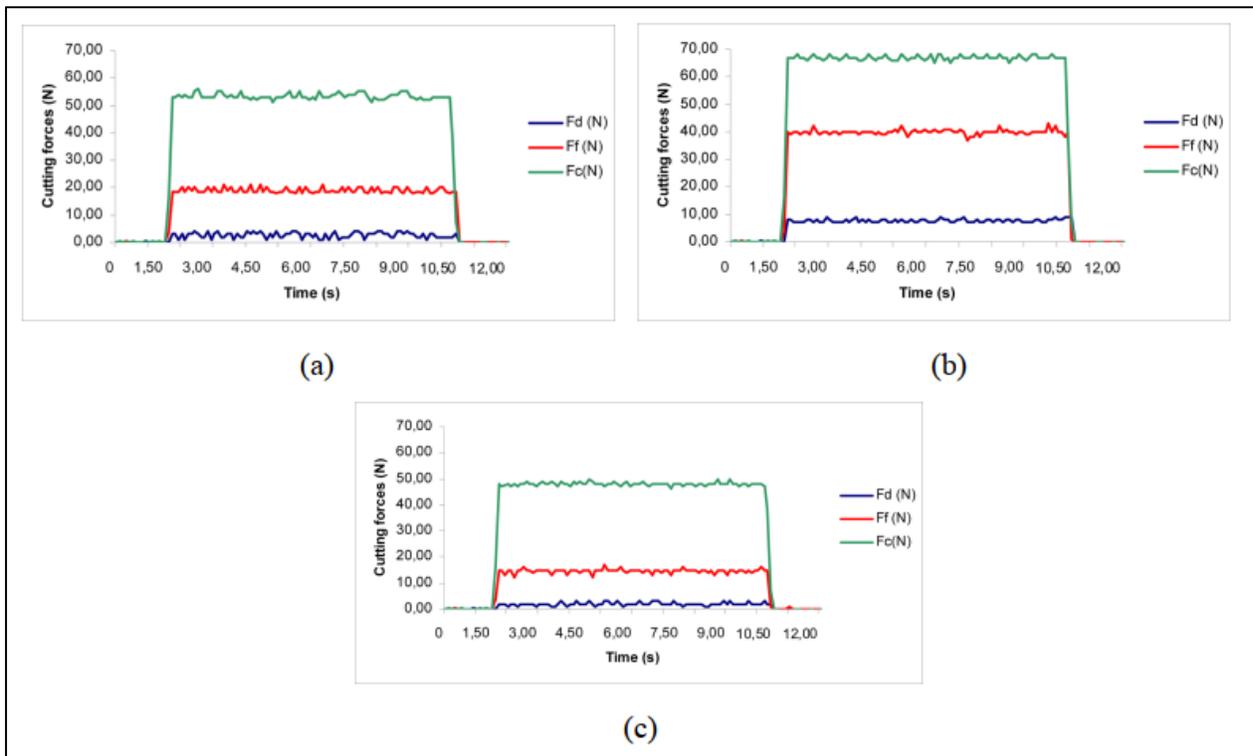


Figure I.15. Exemples d'évolution d'efforts de coupe pour la PA66GF ($V_c=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev) : (a) outil de PCD ; (b) K10 et (c) outil de diamant CVD [12].

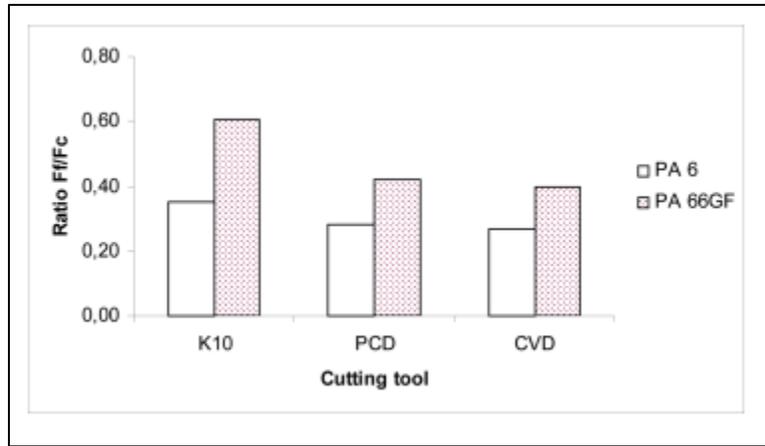


Figure I.16. Représentation de rapport F_f/F_c pour plusieurs types d'outil et les deux des matériaux ($V_c=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev) [12].

Marin MOÏTOI [13], a présenté une étude sur l'influence des éléments d'additions sur la rugosité de la surface usinée lors du chariotage longitudinal des certaines polyamides. Les types de polyamide étudiés sont : PA66, PA66–GF30 et PA66MoS2 (PA avec MoS2). Il a observé que le polyamide PA66 donne des bons résultats en tournage longitudinal, ainsi les éléments d'additions supplémentaires à ce polyamide influencent négativement sur la qualité de surface dans le cas d'ébauchage (**Figure I.17**), Par contre dans le cas de finition en tournage des pièces en PA66 les éléments d'addition jouent un rôle significatif sur la qualité de surface (**Figure I.18**).

Pour obtenir un meilleur état de surface des polyamides l'utilisation des adjuvants comme le molybdène et phosphore sont conseillées. Si la qualité de surface réalisée n'est pas importante, il est préférable d'utiliser le PA66 GF30.

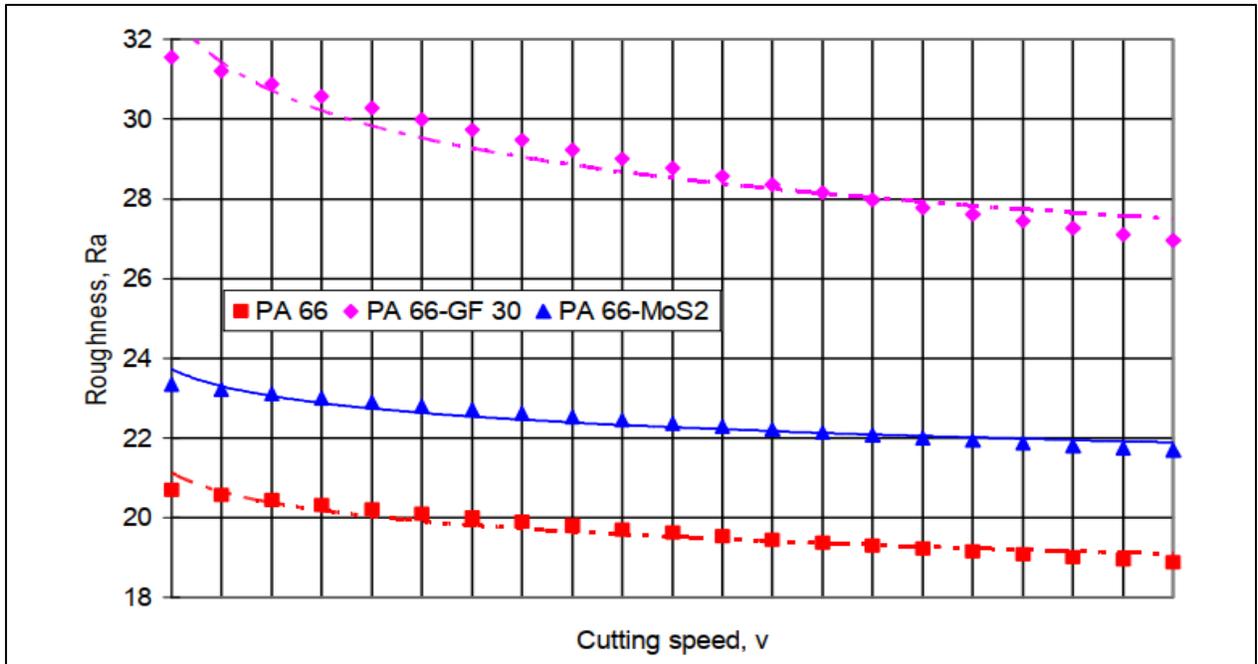


Figure I.17. Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe, pour l'ébauchage [13]

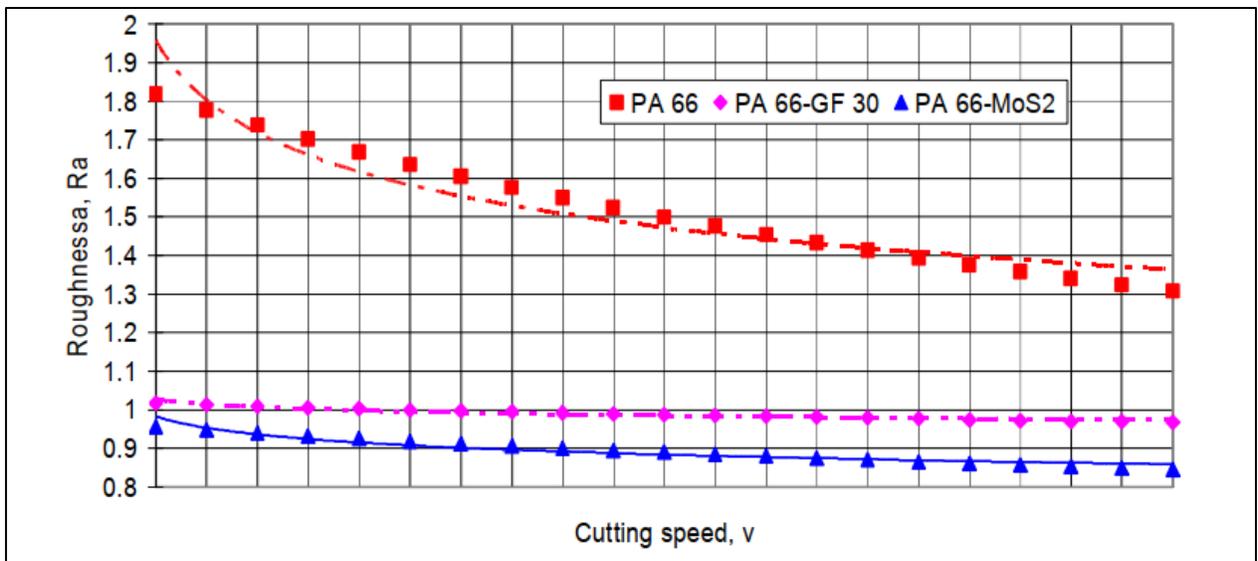


Figure I.18. Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe, pour tournage de finition [13].

V. N. Gait et autres [14] ont fait une analyse des effets des paramètres de coupe, la vitesse de coupe (v) et l'avance par tour (f) sur des aspects d'usinabilité, tels que l'effort de coupe (F_c), rugosité de la surface (R_a), effort de coupe spécifique (K_s), et puissance (p) pendant le micro-usinage du polyamide avec 30% des fibres (PA66 GF30) avec l'outil de PCD, la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été employée.

Les résultats des expériences de micro-usinage trouvés par les auteurs montrent que l'effort de coupe augmente avec l'avance par tour pour une vitesse de coupe fixe. De plus, l'effort de coupe diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. L'effort de coupe est sensible à des valeurs plus élevées d'avance par tour par rapport à des valeurs plus basses de vitesse de coupe (**Figure I.19**).

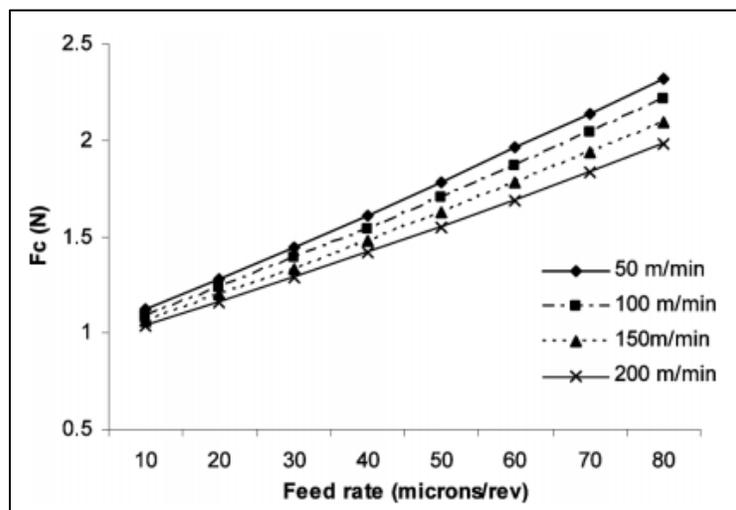


Figure I.19. Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la force de coupe [14].

La rugosité de la surface diminue avec des valeurs plus basses d'avance et des valeurs plus élevées de vitesse de coupe (**Figure I.20**).

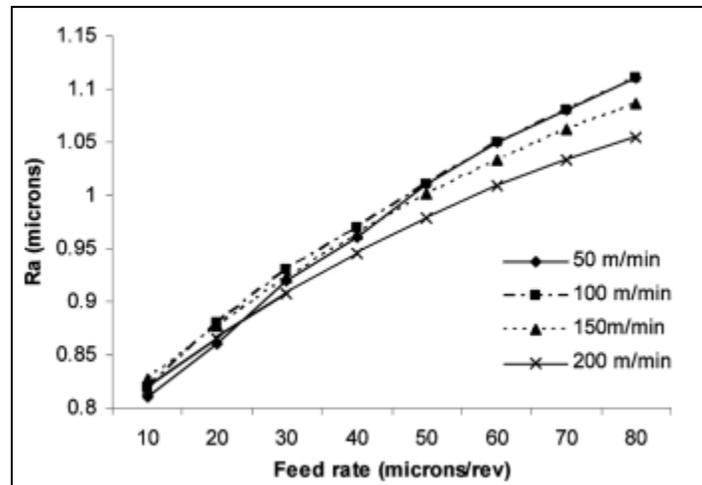


Figure I.20. Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la rugosité de la surface [14].

L'effort de coupe spécifique est minimal à une avance de 60 microns/rev et d'une vitesse de coupe de 200 m/min (**Figure I.21**).

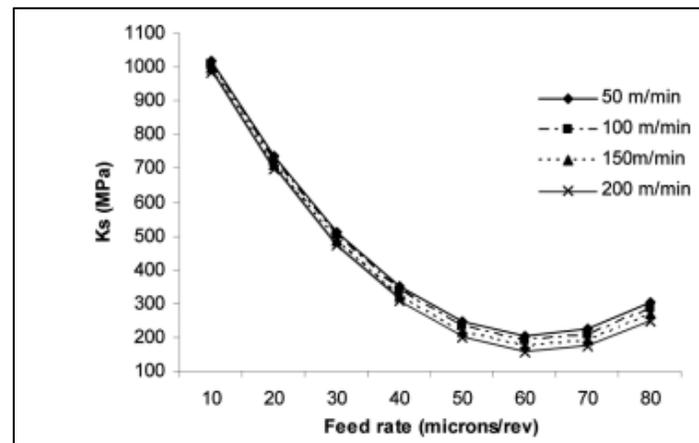


Figure I.21. Effet de l'avance et la vitesse de coupe sur l'effort de coupe spécifique [14].

Syed A. H. et autres [15] ont étudié l'évolution d'orientation des fibres sur la rugosité de surface lors de l'usinage d'un plastique renforcé en fibres de verre GFRP par l'outil du carbure K20. Les auteurs ont élaboré des modèles de second ordre de la rugosité en fonction de paramètres de coupe (V_c , f , a_p) et l'angle orientation des fibres (Φ) basé sur la méthode de (RSM). Les résultats des expériences trouvés par les auteurs montrent :

- 1) Une vitesse de coupe modérée, une faible avance, un faible angle d'orientation des fibres et une profondeur de coupe modérée sont préférables pour l'usinage des composites en fibres de verre (**Figure I.22**).

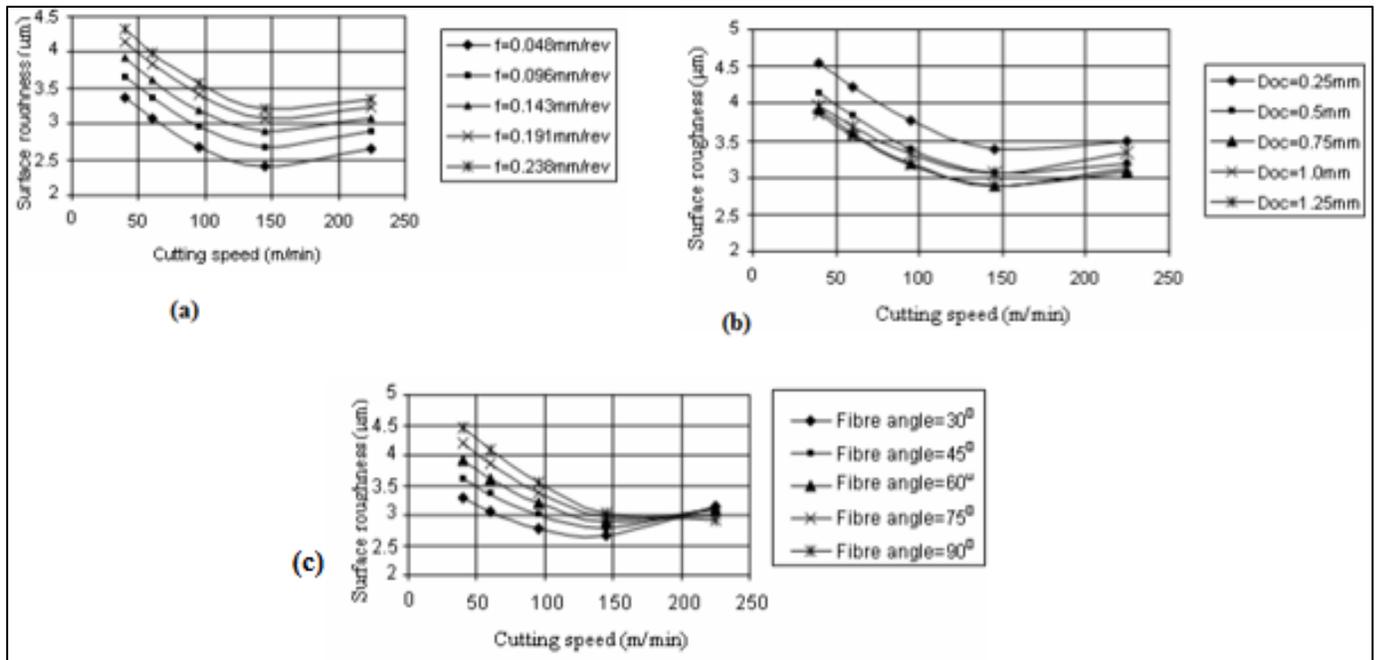


Figure I.22. Variation de la rugosité de la surface avec la vitesse de coupe pour différentes (a) profondeur de coupe (b) d'angle d'orientation (c) avances [15].

- 2) L'avance est le paramètre dominant qui affecte la rugosité de la surface des composites de GFRP, suivie de vitesse de coupe, angle d'orientation de fibre. La profondeur de passe montre un effet minimal sur la rugosité de la surface comparée à d'autres paramètres (**Figure I.23**).

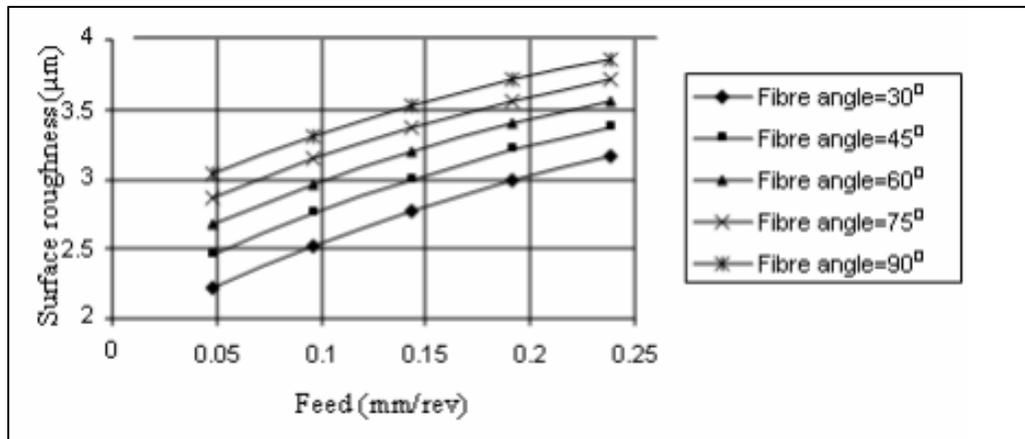


Figure I.23. Variation de la rugosité de la surface avec l'avance pour différents angles d'orientation des fibres aux valeurs centrales de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe [15].

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. La seconde partie définit les matériaux polymères renforcés, leurs classifications selon plusieurs critères. La troisième partie traite l'état de l'art sur l'usinabilité des polyamides et polymères renforcés.

En se basant sur l'étude bibliographique, nous pouvons conclure que les polyamides renforcés sont classés parmi les matériaux difficiles à usiner à cause de leurs caractéristiques physico-mécaniques. Le prochain chapitre présente l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1. Introduction

Cette étude expérimentale est conçue dans le but de présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, qui a servi à l'étude de l'évolution des différents paramètres technologiques d'usinage, tels qu'un banc d'essais comportant un tour, une plateforme pour l'acquisition des efforts de coupe (F_x , F_y , F_z), un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée (R_a), Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification des expériences et les conditions de réalisation des essais.

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

II.2. Matériels utilisé

II.2.1. Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de marque TOS TRENCIN modèle SN40C de puissance sur la broche égale à 6.6KW (Figure II.1).

Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont comme suit : (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min. Les avances disponibles sont: (0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24...0,8) mm/tr. Afin de travailler avec des vitesses de coupe constantes, notre tour est équipé d'un variateur de fréquence modèle ABB série ACS355 (**Figure II.2**). **La figure II.3** montre le capteur de vitesse qui permet le control du nombre de tour.



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



Figure II.2. Variateur de fréquence ABB ACS355.



Figure II.3. Capteur de vitesse.

II.2.2. Matériau à usiné

Le matériau utilisé dans cette étude est un polyamide PA6.6 GF30, c'est un polymère composite constitué d'une matrice polymère (appelée résine) renforcée par des fibres de verre (30%). Le matériau est en général anisotrope. Ses propriétés de résistance et sa densité sont très favorables, comparé aux métaux (**le tableau II.1**).

Apparus récemment, ces matériaux trouvent un usage dans de nombreux secteurs : automobile, Marine, matériaux de construction, aéronautique, aérospatiale, équipements résistant à la corrosion.

Tableau.II.1. Propriétés mécaniques de PA66 GF30 [16].

	<i>VALEUR</i>	<i>UNITÉ</i>	<i>PARAMÈTRE</i>	<i>NORME</i>
Module d'élasticité (test de traction)	5500	MPa	1mm/min	DIN EN ISO 527-2
Résistance à la traction	91	MPa	50mm/min	DIN EN ISO 527-2
Résistance à la traction au seuil d'écoulement	91	MPa	50mm/min	DIN EN ISO 527-2
Elongation au seuil d'écoulement	8	%	50mm/min	DIN EN ISO 527-2
Allongement à la rupture	14	%	50mm/min	DIN EN ISO 527-2
Effort de flexion	135	MPa	2mm/min, 10 N	DIN EN ISO 178
Module d'élasticité (test de flexion)	4700	MPa	2mm/min, 10 N	DIN EN ISO 178
Résistance à la compression	25/46/104	MPa	1% / 2% / 5%	EN ISO 604
Module de compression	4100	MPa	5mm/min, 10 N	EN ISO 604
Résistance au choc (Charpy)	97	kJ/m ²	Max. 7,5J	DIN EN ISO 179-1eU
Dureté (bille)	216	MPa		ISO 2039-1

Les éprouvettes utilisées pour les essais de rugosité de surface et des efforts de coupe sont coupées sur des barres plaines en polyamide renforcé de 30 % de fibres de verre (PA6.6 GF30) qui possède un diamètre $d = 80$ mm et une longueur $l = 250$ mm avec plusieurs paliers de 20 mm de longueurs séparées par des gorges de 5 mm (**Figure II.4**).

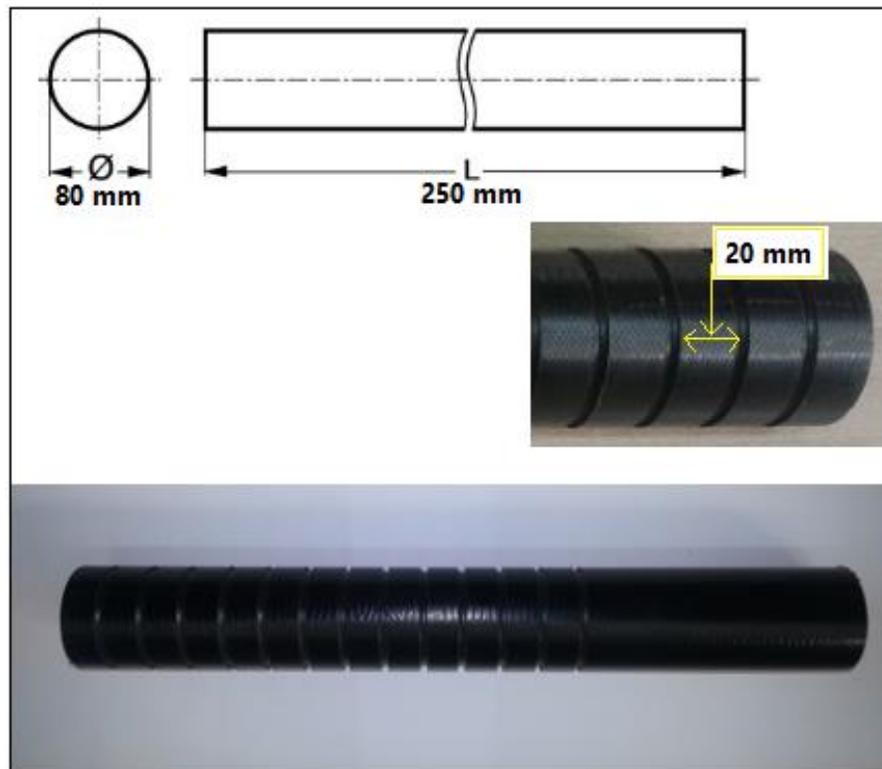


Figure II.4. Eprouvette utilisée pour les essais.

II.2.3. Plaquette et porte outils utilisés

Les opérations de tournage ont été effectuées par une plaquette revêtue en carbure métallique type SPGR T20-308 fixée par bride sur un porte outil SDPN 25 25 M12 avec l'angle de direction principale de 45° (**Figure II.5**).



Figure II.5. Plaquette et porte outil utilisée.

II.2.4. Chaîne de mesure utilisée

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 critères de la rugosité de surface.
- Un rugosimètre 3D pour voir la topographie de la surface.

II.2.4.1. Dynamomètre

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. Ce dispositif comporte plusieurs éléments (**Figure II.6**) :

- La plateforme ;
- L'amplificateur ;
- Le PC avec le logiciel ((DYNOWARE)) ;
- Imprimante pour tracer les courbes.

La **figure II.6** illustre l'enchaînement des équipements et la méthode utilisée pour la mesure des efforts de coupe :

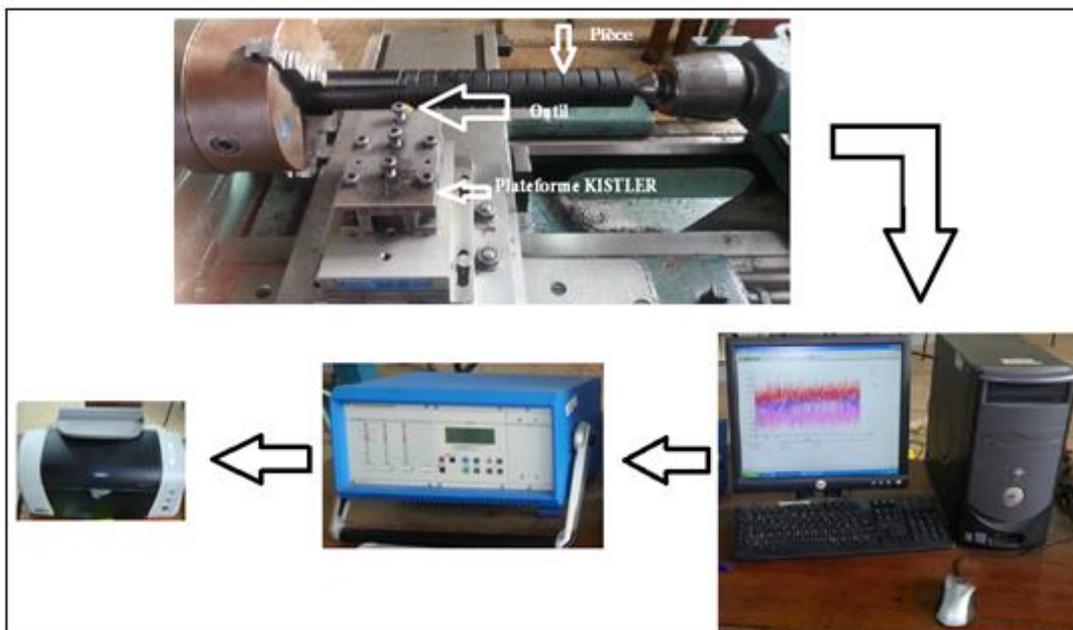


Figure II.6. Chaîne de mesure des efforts de coupe.

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

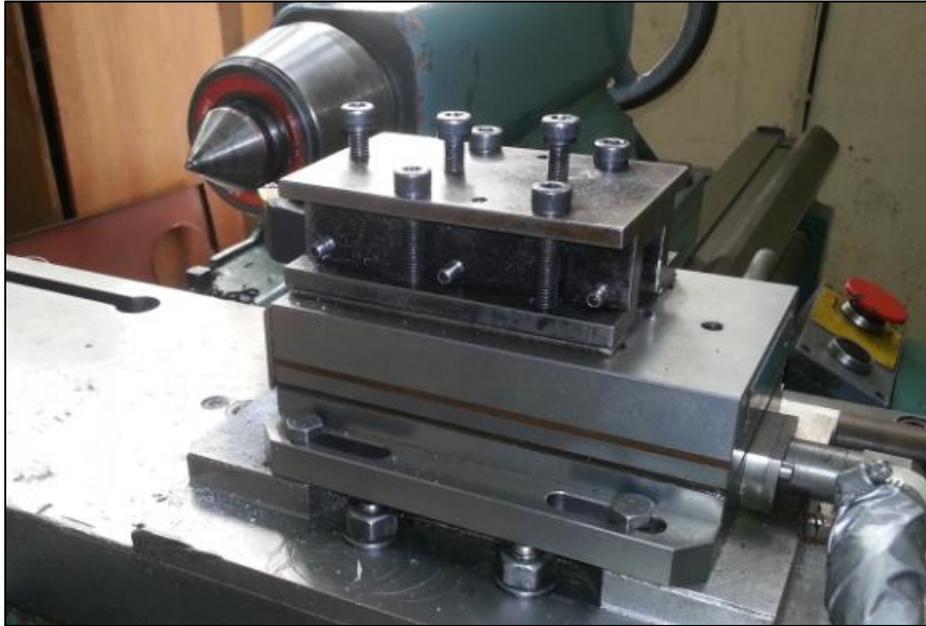


Figure II.7. Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques 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.

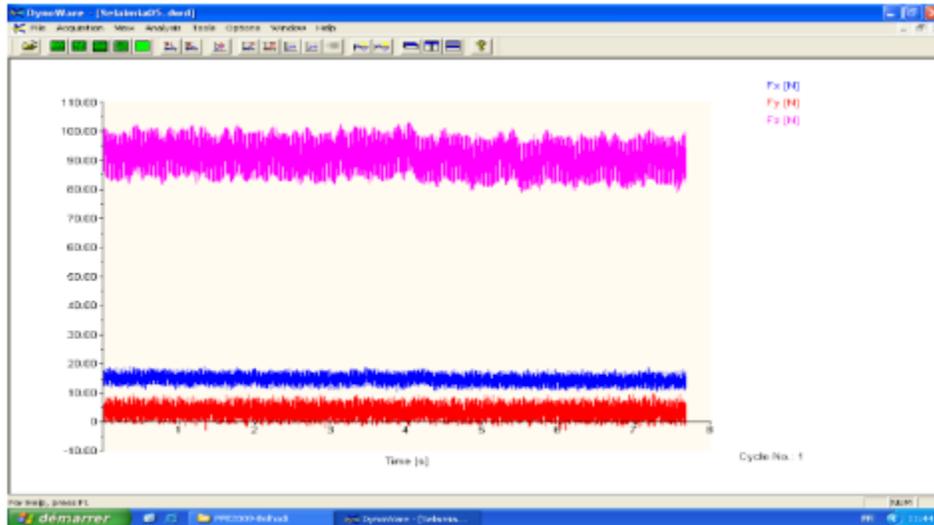


Figure II.8. Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

II.2.4.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

a. Rugosimètre 2D

Le rugosimètre utilisé est du type MITUTOYO modèle SJ-210, il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Les différents critères de la rugosité de surface (R_a , R_q et R_z) ont été obtenus instantanément après chaque passage de l'outil. Les mesures ont été répétées trois fois sur trois lignes de cylindre axial séparées à 120° et la moyenne de la mesure a été retenue (**Figure II.9**).

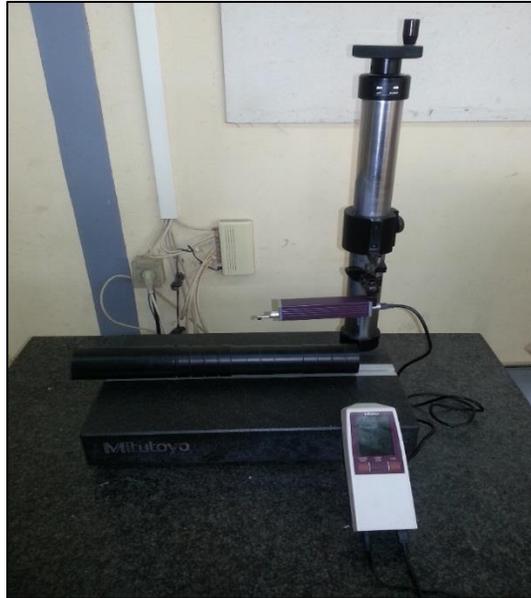


Figure II.9. Rugosimètre 2D.

b. Rugosimètre 3D

Pour caractériser correctement la rugosité de surface 3D de la pièce à usinée, 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.10**).

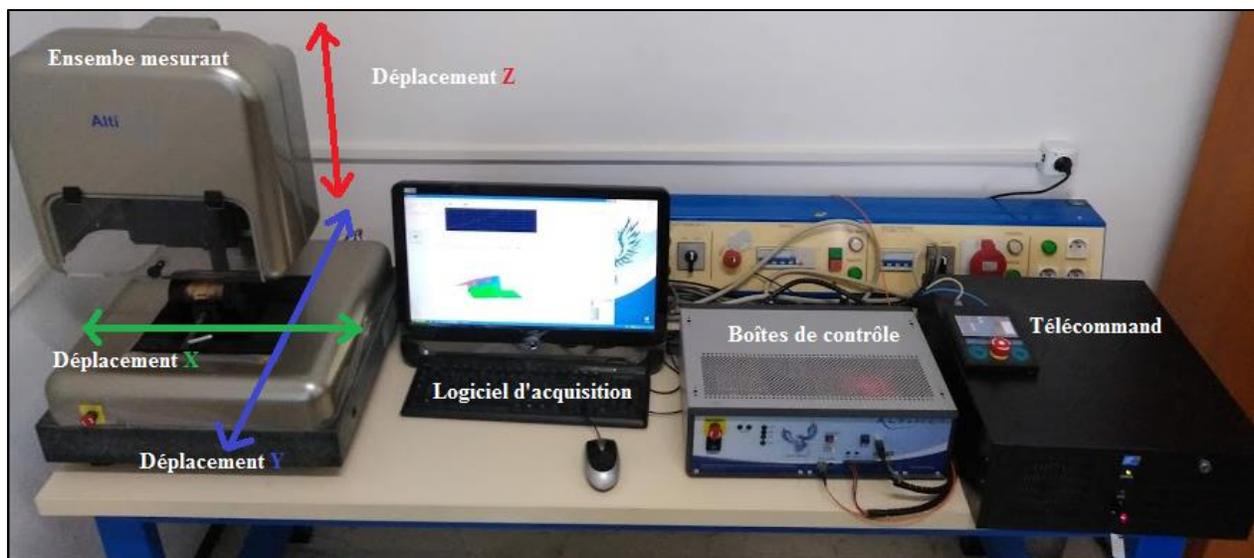


Figure II.10. Plate-forme 3D de métrologie optique modulaire Altisurf 500.

L'appareil AltiSurf ®500 standard est composé [17] :

- ✓ Une base en granite ;
- ✓ 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).

II.3. 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.4. Planification des expériences

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

II.5. Méthodologie de recherche

Un très grand nombre de facteurs agit sur les paramètres de sortie dans un processus de coupe, tels que les paramètres du régime de coupe (V_c , a_p , f), la géométrie de l'outil (α , β , γ , ϵ , χ , ..., etc.), les caractéristiques du matériau usiné (dureté, (Rr), le pourcentage de carbone % C, le pourcentage des éléments d'addition, etc.) et les conditions de travail, etc.

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

II.6. Méthode de planification des expériences

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

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs (**équation II.1**).

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

$$N=q^k \quad (\text{II. 1})$$

Où :

N : Nombre d'essais

q : Nombre de niveaux de variations des facteurs de base

k : Nombre de facteurs de base

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ($k = 3$) et chaque facteur à trois niveaux de variation, Nous avons alors :

$$N = 3^3 = 27$$

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe. La matrice de planification, ainsi que les valeurs des facteurs réels sont illustrées dans le **tableau.II.2**. Selon le plan de Taguchi, tel que la table orthogonale standard L27 (3^{13}) de Taguchi (**Tableau II.3**) est adoptée comme plan expérimental. La première colonne est réservée à la vitesse de coupe, la deuxième à l'avance et le cinquième à la profondeur de passe.

Tableau.II.2. Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L27).

<i>N° d'essais</i>	<i>Paramètres d'usinage</i>		
	<i>Vc (m/min)</i>	<i>f (mm/tr)</i>	<i>ap (mm)</i>
1	80	0.08	0.5
2	80	0.08	1
3	80	0.08	2
4	80	0.12	0.5
5	80	0.12	1
6	80	0.12	2
7	80	0.16	0.5
8	80	0.16	1
9	80	0.16	2
10	115	0.08	0.5
11	115	0.08	1
12	115	0.08	2
13	115	0.12	0.5
14	115	0.12	1
15	115	0.12	2
16	115	0.16	0.5
17	115	0.16	1
18	115	0.16	2
19	206	0.08	0.5
20	206	0.08	1
21	206	0.08	2
22	206	0.12	0.5
23	206	0.12	1
24	206	0.12	2
25	206	0.16	0.5
26	206	0.16	1
27	206	0.16	2

Tableau II.3. Table orthogonale de Taguchi pour un plan de 27 [18].

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

II.7. 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, la planification des expériences et les conditions de coupe ont été désignées. Dans le chapitre III qui suit, nous allons présenter les différents résultats des essais réalisés.

Chapitre III

Résultats des essais paramétriques et modélisation et optimisation des conditions de coupe

III.1. Introduction

Les polyamides renforcés par des fibres de verre jouent un rôle extrêmement important dans l'industrie d'aujourd'hui, ils sont présents dans de nombreux secteurs industriels. Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques physiques et mécaniques.

Ce chapitre est divisé en trois parties. La première partie est consacrée à la présentation des résultats des essais paramétriques. L'intérêt de ces essais est d'étudier et comprendre l'effet des conditions de coupe sur les paramètres de performance lors de l'usinage du polyamide renforcé (PA66 GF30). Dans la deuxième partie nous présentons les résultats de 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. Nous avons utilisé deux logiciels de statistique appelés «MINITAB16» et «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 étudiés. En dernier lieu, nous présentons dans la troisième partie, l'optimisation des conditions de coupes pour déterminer les conditions sur les variables indépendantes qui conduisent à des valeurs optimales suivant plusieurs objectifs.

III.2. Essais paramétriques

Le **tableau III.1** présente les résultats de l'évolution des composantes de l'effort de coupe, la pression de coupe, les critères de la rugosité de surface des éprouvettes usinées et la puissance de coupe en fonction des trois paramètres principaux de coupe (V_c , f et a_p) lors de tournages de polyamide PA66 GF30.

Tableau III.1. Evolution des conditions en fonction des paramètres de sortie.

N°	V_c	f	ap	F_x	F_y	F_z	R_a	R_q	R_z	P_c	K_s
1	80	0.08	1	14,19	16,63	20,54	1,44	1,93	7,85	27,38	256,75
2	120	0.08	1	12,58	16,25	19,21	1,31	1,68	7,18	38,42	240,12
3	160	0.08	1	11,62	15,18	16,68	1,18	1,47	7,15	44,48	208,5
4	200	0.08	1	11,58	14,04	16,50	1,12	1,38	7,11	55	206,25
5	230	0.08	1	10,80	12,70	14,39	1,03	1,08	7,08	55,16	179,87
1	200	0.08	1	12,22	12,70	20,75	1,23	1,60	9,34	69,16	259,37
2	200	0.12	1	13,02	15,09	23,70	1,54	1,97	10,44	79	197,5
3	200	0.14	1	14,42	17,62	24,80	1,78	2,14	11,14	82,66	177,14
4	200	0.16	1	15,96	20,36	26,02	1,89	2,56	12,50	86,73	162,62
5	200	0.20	1	17,89	24,14	29,67	2,32	2,81	13,54	98,9	148,35
1	200	0.08	0.5	10,07	12,97	16,62	1,52	1,81	9,66	55,4	415,5
2	200	0.08	1	11,96	12,09	18,62	1,32	1,67	9,31	62,06	232,75
3	200	0.08	1.5	14,80	13,62	18,39	1,35	1,69	9,11	61,3	153,25
4	200	0.08	2	15,65	15,16	19,25	1,48	1,88	10,87	64,16	120,31
5	200	0.08	2.5	17,78	17,43	32,65	1,53	1,75	11,46	108,83	163,25

III.2.1. 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 (V_c). Les essais ont été réalisés avec une avance (f) et une profondeur de passe (ap) constantes ($f=0.08$ mm/tr et $ap=1$ mm). Nous remarquons que l'augmentation de V_c de 80 à 230 (m/min) diminue les différents critères de rugosité (R_a , R_q , R_z) respectivement de 28,47 % ; 44,04 % et 9,80 %, avec des valeurs minimales $R_a=1,04$ (μm), $R_z=1,33$ (μm) et $R_q=7,3$ (μm). Donc, Il y a une légère diminution des différents critères de rugosité lorsque V_c augmente. Ce qui prouve que dans cet intervalle, la vitesse de coupe a un effet bénéfique sur la rugosité de surface.

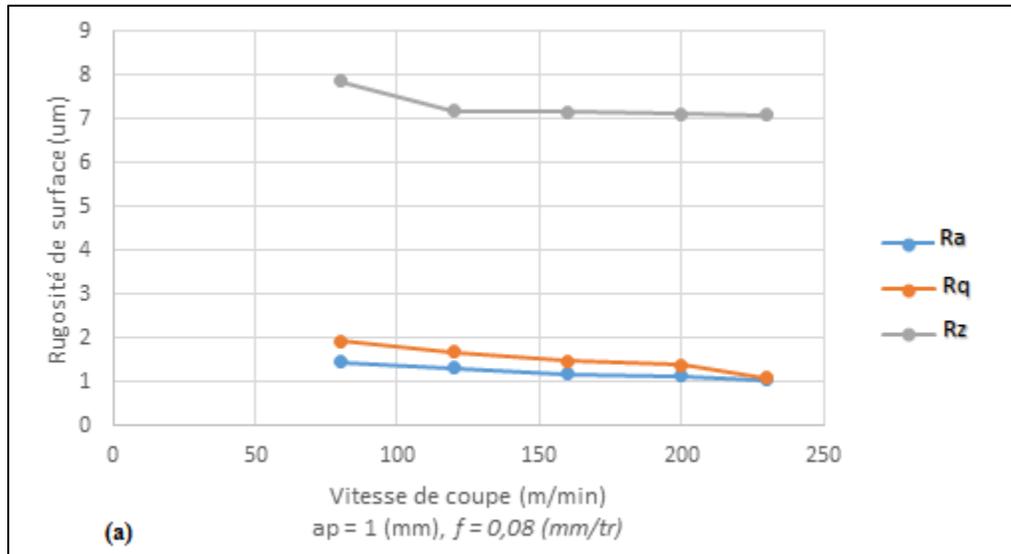


Figure III.1(a). Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface.

b. Effet de la profondeur de passe

La figure III.1 (b) illustre l'effet de (a_p) sur la rugosité de surface. On peut dire que l'augmentation de (a_p) de 0,5 à 2,5 (mm) fait augmenté les différents critères de rugosité Ra, Rz, Rq de (13,72% ; 3,31% et 18,63%) respectivement. Donc, la profondeur de passe (a_p) ne joue pas un rôle déterminant sur la qualité des surfaces usinées.

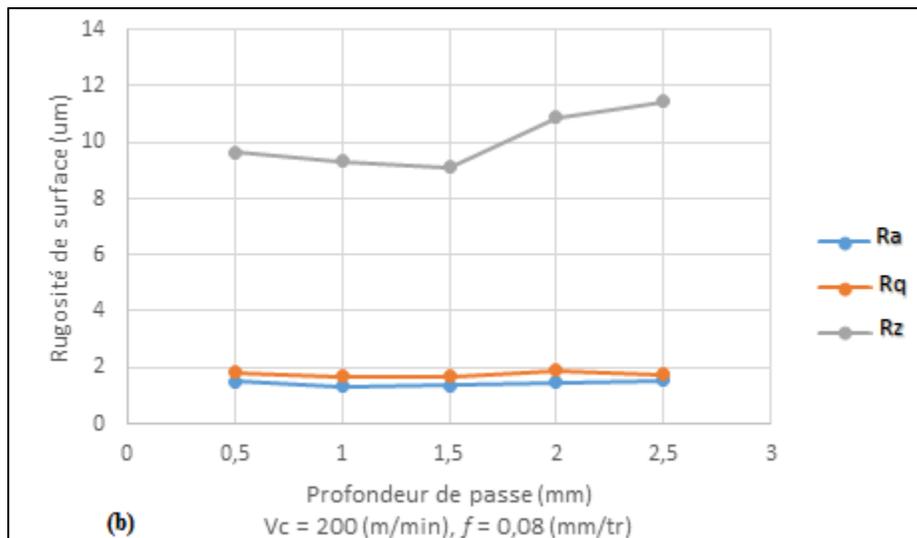


Figure III.1(b). Effet de profondeur de passe sur la rugosité de surface.

c. Effet de l'avance

La **figure III.1(c)** montre que l'état de la surface se détériore avec l'augmentation de (f). Nous remarquons que les critères de rugosité (R_a , R_z et R_q) augmentent avec (46,98% ; 43,06% et 31,01%) respectivement. On peut expliquer cette dégradation de l'état de surface avec l'augmentation de (f) 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 [14].

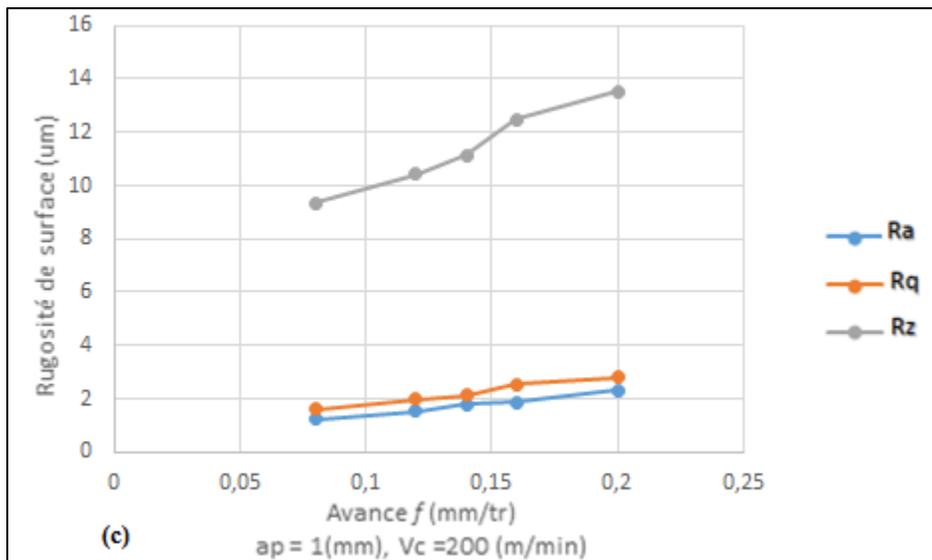


Figure III.1(c). Effet de l'avance sur la rugosité de surface.

III.2.2. 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 (V_c), pour $a_p=1$ (mm) et $f=0,08$ (mm/tr). L'analyse des résultats montre une diminution des trois composantes de 23,89% ; 23,63% et 29,94% lorsque (V_c) passe de 80 à 230 m/min. 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.

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 (a_p). On note que lorsque (a_p) augmente, les trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) augmentent aussi de 43,36% ; 25,58% et 43,09% respectivement lorsque (a_p) passe de 0,5 à 2,5 mm. Parce que l'augmentation d'épaisseur de copeaux enlevée nécessite des efforts de coupe importantes.

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 (f) à $V_c=200$ (m/min) et $a_p=1$ (mm). On remarque que les efforts de coupe sont influencés par l'avance avec 30,06% pour la composante tangentielle de l'effort de coupe F_z et les deux autres composant (F_x) et (F_y) de (31,69% et 47,39%) successivement lorsque (f) passe de 0,08 à 0,20 mm/tr. Ceci est dû à l'augmentation de la section du copeau.

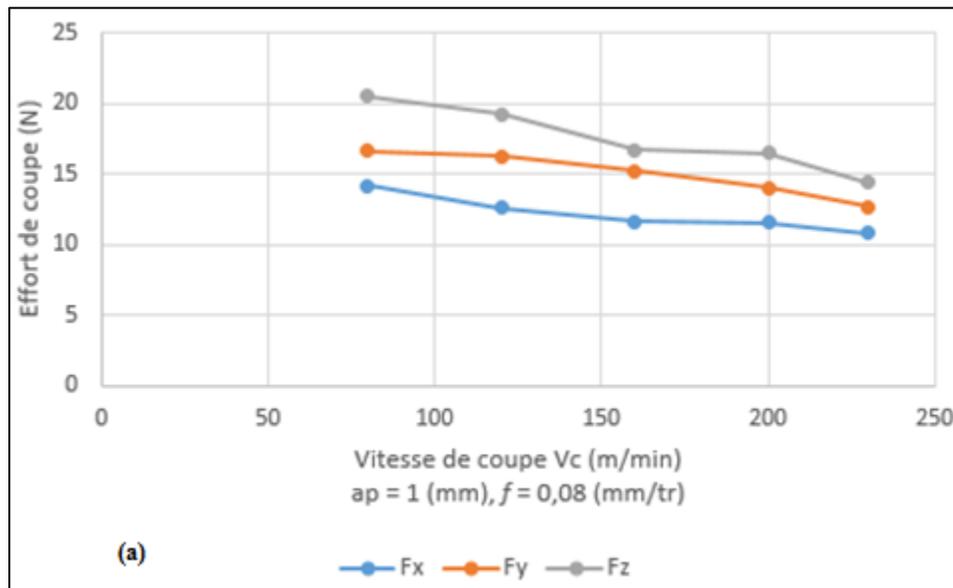


Figure III.2(a). Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe.

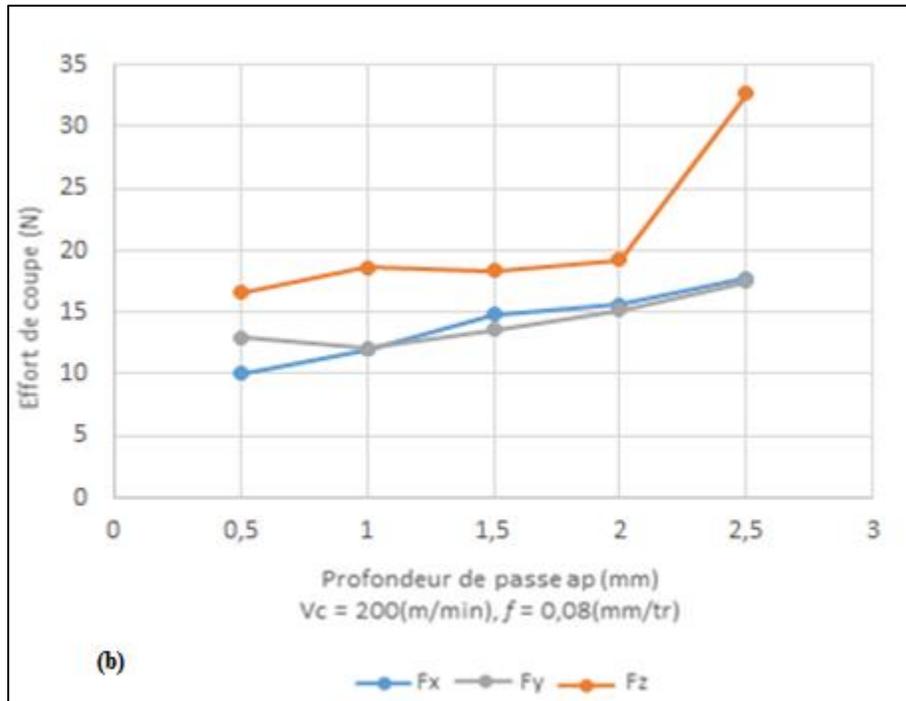


Figure III.2(b). Evolution des efforts de coupe en fonction de (a_p).

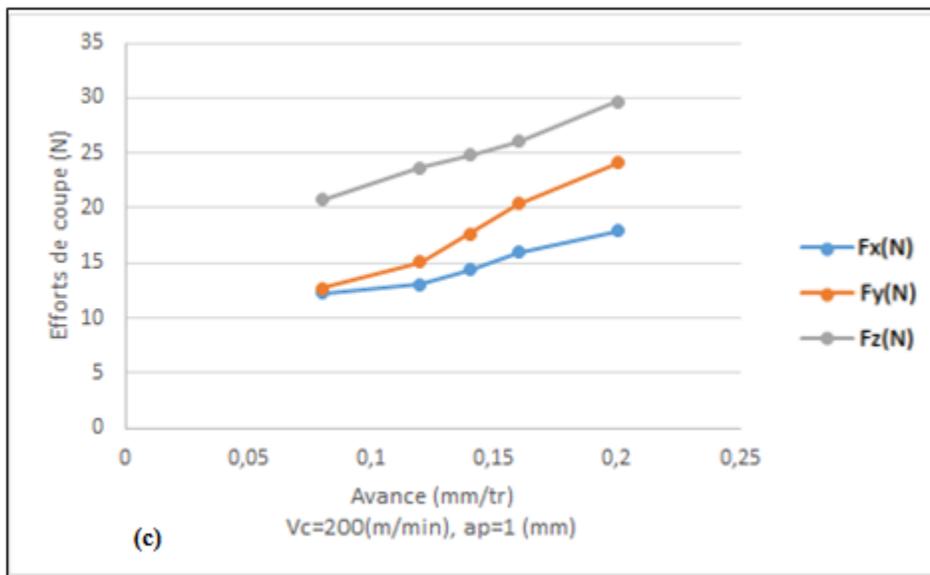


Figure III.2(c). Evolution des efforts de coupe en fonction de (f).

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

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 de (29,94%) lorsque (V_c) passe de 80 à 230 m/min. Cela est expliqué par les hautes températures générées pendant l'opération de l'usinage et qui entraînent un ramollissement de la matière.

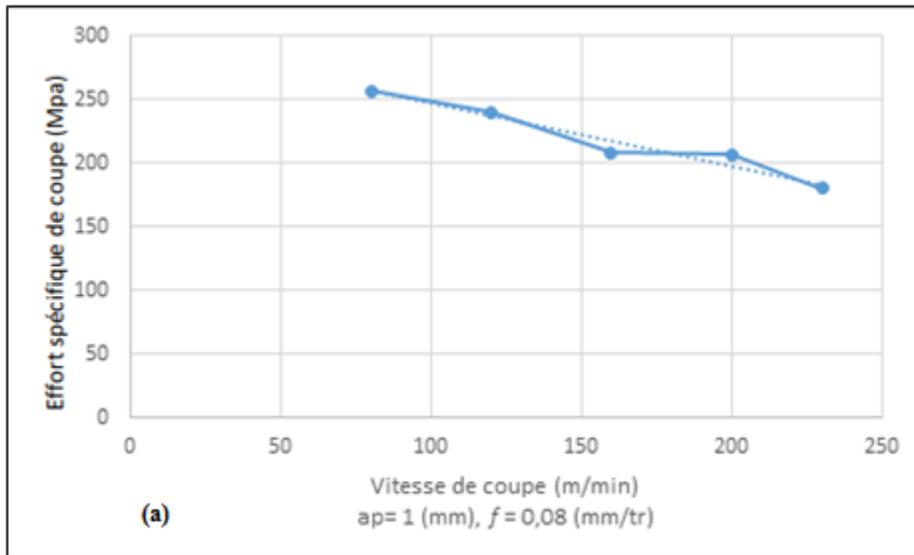


Figure III.3(a). Effet de la vitesse de coupe sur l'effort spécifique (K_s).

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 0,20 (mm/tr) induit une diminution de l'effort spécifique de coupe de (42,80%). 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 PA6.6GF30.

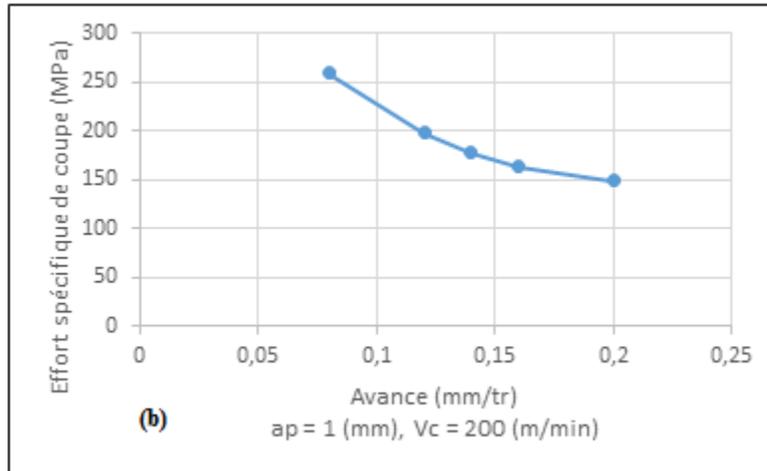


Figure III.3(b). Effet de l'avance sur l'effort spécifique (Ks).

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 (60,70%), lorsque la profondeur de passe (a_p) passe de 0.5 à 2.5 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.

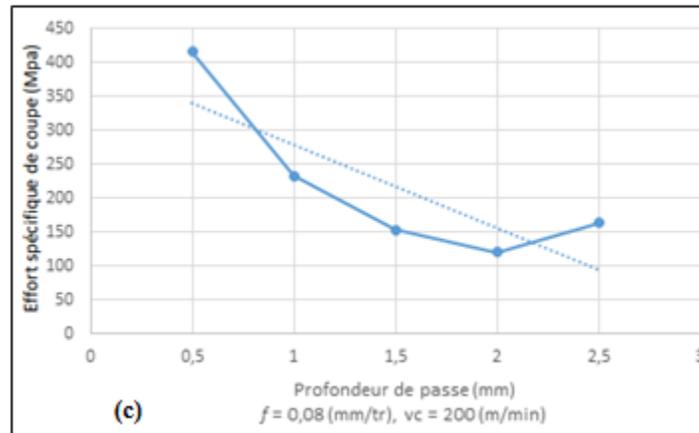


Figure III.3(c). Effet de la profondeur de passe sur l'effort spécifique (Ks).

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

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 a_p) conduit à une augmentation de la puissance de coupe (P_c). Une augmentation de la vitesse de coupe de 80 à 230 (m/min) fait augmenter la puissance de coupe de 50.30% jusqu'au 55,16 W (**figure III.4.a**).

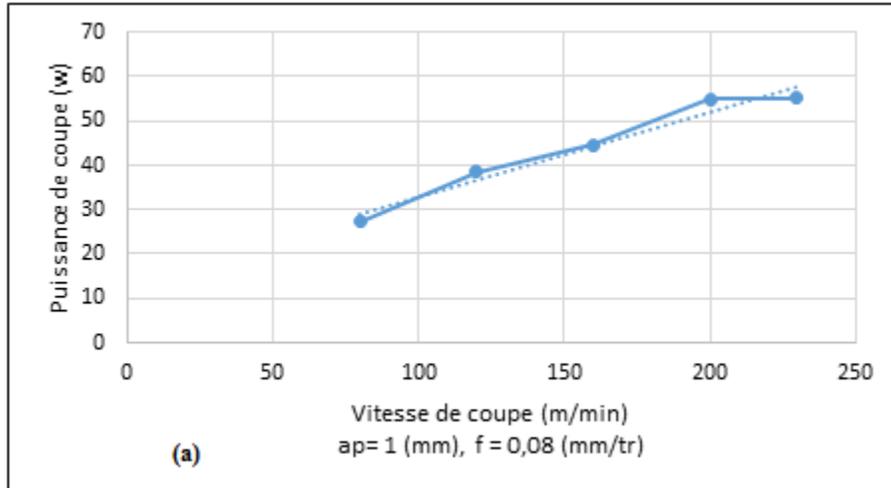


Figure III.4(a). Influence de vitesse de coupe sur la puissance de coupe.

D'autre part l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,20 (mm/tr) (**figure III.4.b**), fait augmenter la puissance de coupe de 30,01% jusqu'au 98,9 W, cela est dû à l'augmentation de la résistance à la rupture de la section du copeau. On remarque que la courbe de la puissance en fonction de l'avance (f) est presque linéaire ce qui implique que l'avance influe d'une manière significative sur la puissance de coupe (P_c).

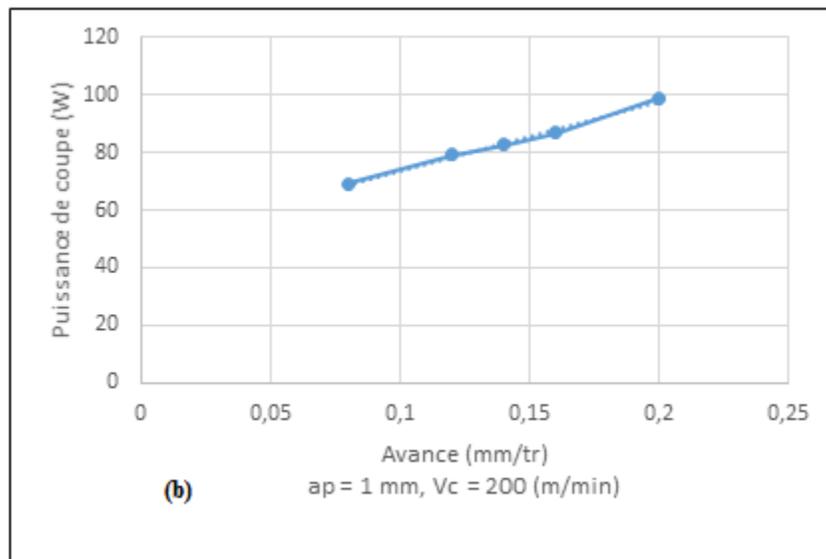


Figure III.4(b). Influence de l'avance sur la puissance de coupe.

La (**figure III.3.c**) indique qu'une croissance de la profondeur de passe de 0,5 à 2.5 (mm) conduit à une augmentation de puissance de coupe de 49,15% d'une valeur maximum de 108,83 W.

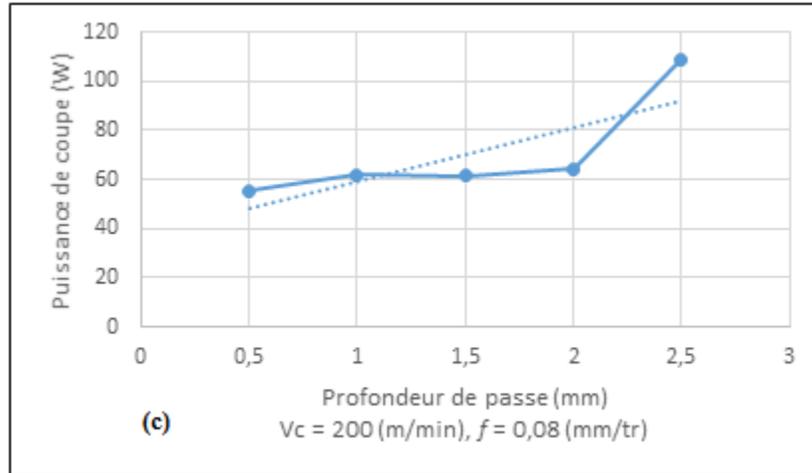


Figure III.4(c). Influence de la profondeur de passe sur la puissance de coupe.

III.3. Analyse de variance (ANOVA) et Modélisation

III.3.1 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) [19]. Le (SC) est utilisé pour estimer le carré de l'écart par rapport à la moyenne. Il est exprimé par l'équation :

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

Ou : $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ la moyenne des réponses,

- y_i la réponse moyenne observée dans les expériences,
- N : nombre total d'expériences,
- N_{nf} : niveau de chaque facteur f .

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

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

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

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

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

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

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

III.3.2. Méthodologie des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponse est un ensemble de techniques mathématiques qui se base sur la conception expérimentale pour déterminer la portée des variables d'entrée indépendantes. Cette méthode permet, grâce à des modèles mathématiques empiriques, de déterminer une relation d'approximation entre les réponses de sortie (Y), et les variables d'entrée (vitesse de coupe (V_c), l'avance 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 [19] :

$$Y = \varphi(V_c, f, ap) \quad \text{(III.5)}$$

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

- ✚ Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées ;
- ✚ Adopter un plan de conception expérimentale ;

- ✚ Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de RSM ;
- ✚ Analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- ✚ Déterminer la situation du modèle quadratique de RSM et de décider si le modèle de RSM à besoin des variables de dépistage ou non et enfin ;
- ✚ Optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédite.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Y , dite variable de réponse (rugosité de la surface, effort de coupe tangentiel, effort spécifique tangentiel et puissance de coupe), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X_1, X_2, \dots, X_k (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1} a_i X_i + \sum_{i=1} a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j \quad \text{(III.6)}$$

- ✓ Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- ✓ X_i représente le niveau attribué au facteur i . C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- ✓ a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences. Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (III.5).

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

Avec :

- Y_i : valeur de la réponse calculée à la $i^{ème}$ expérience ;
- \bar{Y}_i : valeur mesurée à la $i^{ème}$ expérience ;
- \bar{Y} : valeur moyenne des réponses mesurées.

L'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour tester la validité du modèle, ainsi qu'examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérés statistiquement significatifs. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réelles [20,21].

III.4. Résultats et discussions

Le **tableau III.2** présente les résultats expérimentaux obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe lors de tournage de polyamide PA6.6GF30. L'analyse des résultats de ce tableau montre que les valeurs maximales correspondent aux efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) ont été trouvées suivant les conditions des essais N°09 de (80 m/min ; 0,16 mm/tr et 2 mm), et pour Les valeurs minimales de la rugosité de surface (R_a , R_z) sont observées lors de l'essai N°19 (206 m/min ; 0,08 mm/tr et 0.5 mm).

Les valeurs minimales des efforts (F_x , F_y et F_z) ont été observées à l'essai N° 19 de (206 m/min ; 0,08 mm/tr et 0.5 mm). Les maximums de valeurs pour la rugosité de surface (R_a et R_z) ont été observées à l'essai N°09 c.-à-d. (80 m/min ; 0,16 mm/tr et 2 mm).

Tableau III.2. Résultats des conditions de coupe en fonction des paramètres du de coupe.

N° d'essai	Vc [m/min]	f [mm/ tr]	ap [mm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Ra [µm]	Rz [µm]	Pc [W]	MRR [cm ³ /min]
1	80	0,08	0,5	10,11	17,69	19,96	1,35	8,50	26.61	3.2
2	80	0,08	1,0	16,97	22,97	34,40	1,42	8,52	45.86	6.4
3	80	0,08	2,0	30,82	38,74	47,60	1,47	9,10	63.46	12.8
4	80	0,12	0,5	19,20	20,80	39,80	1,43	9,65	53.06	4.8
5	80	0,12	1,0	16,07	27,43	36,64	1,47	9,67	48.85	9.6
6	80	0,12	2,0	33,80	45,60	55,51	1,67	9,91	74.01	19.2
7	80	0,16	0,5	21,30	27,70	32,06	1,57	9,75	42.74	6.4
8	80	0,16	1,0	19,25	30,06	35,41	1,58	9,68	47.21	12.8
9	80	0,16	2,0	44,08	50,02	86,20	1,74	10,30	114.93	25.6
10	115	0,08	0,5	7,77	14,45	18,64	1,31	8,33	35.72	4.6
11	115	0,08	1,0	11,66	21,67	32,86	1,40	8,49	62.98	9.2
12	115	0,08	2,0	27,60	31,21	43,78	1,45	9,03	83.91	18.4
13	115	0,12	0,5	11,43	22,20	35,70	1,42	9,30	68.42	4.6
14	115	0,12	1,0	15,39	23,15	33,46	1,43	9,42	64.13	13.8
15	115	0,12	2,0	23,74	35,01	50,01	1,56	9,30	95.85	27.6
16	115	0,16	0,5	13,35	25,00	31,08	1,55	9,10	59.57	9.2
17	115	0,16	1,0	14,67	27,79	34,32	1,57	9,16	65.78	18.4
18	115	0,16	2,0	41,03	43,71	80,98	1,72	9,49	155.21	36.8
19	206	0,08	0,5	5,60	12,50	16,30	1,27	8,23	55.96	8.24
20	206	0,08	1,0	10,90	19,80	29,96	1,35	8,28	102.86	16.48
21	206	0,08	2,0	22,08	29,08	35,37	1,36	9,01	121.43	32.96
22	206	0,12	0,5	6,09	21,98	23,97	1,30	9,24	82.297	12.36
23	206	0,12	1,0	10,88	20,80	25,97	1,40	9,25	89.16	24.72
24	206	0,12	2,0	21,00	29,55	44,03	1,52	9,29	151.16	49.44
25	206	0,16	0,5	10,80	22,30	29,43	1,53	9,09	101.04	16.48
26	206	0,16	1,0	11,04	23,17	30,32	1,55	9,15	104.09	32.96
27	206	0.16	2	39.93	40.48	74.3	1.69	9.25	255.09	65.92

III.4.1. Modélisation de l'effort axial Fx

III.4.1.1. Analyse de variance ANOVA pour Fx

L'analyse ANOVA de **tableau III.3**, montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important qui affecte (Fx), sa contribution est 66,37 %, suivie par l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc) avec un pourcentage de contribution de (9.43, 8.85) % respectivement. Les interactions (Vc x f, Vc x ap, f x ap) et le produit (ap², Vc², ap²) n'ont pas d'effets significatifs sur l'effort (Fx).

Tableau III.3. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort Fx.

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Modèle	2788.10	9	2788.10	24.29	< 0,0001	92.78	Signifiant
Vc	265.98	1	297.60	23.33	< 0,0001	8.85	Signifiant
F	283.22	1	299.88	23.51	< 0,0001	9.43	Signifiant
ap	1994.43	1	1707.69	133.90	< 0,0001	66.37	Signifiant
Vc ²	41.56	1	41.56	3.26	0.014	1.38	Signifiant
f x f	34.59	1	34.59	2.71	0,089	1.15	Non Signifiant
ap x ap	103.78	1	103.78	1.69	0.118	3.45	Non Signifiant
Vc x f	0.85	1	0.85	0.07	0.80	0.03	Non Signifiant
Vc x ap	0.00	1	0.00	0.00	0.992	0.00	Non Signifiant
f x ap	63.69	1	63.69	4.99	0.039	2.12	Signifiant
Erreur	216.81	17	12.75			7.22	
Total	3004.91	26				100.00	

III.4.1.2. Les effets principaux pour Fx

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la **figure III.5**. 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 la profondeur de passe (ap) affecte fortement l'effort (Fx) que les autres facteurs.

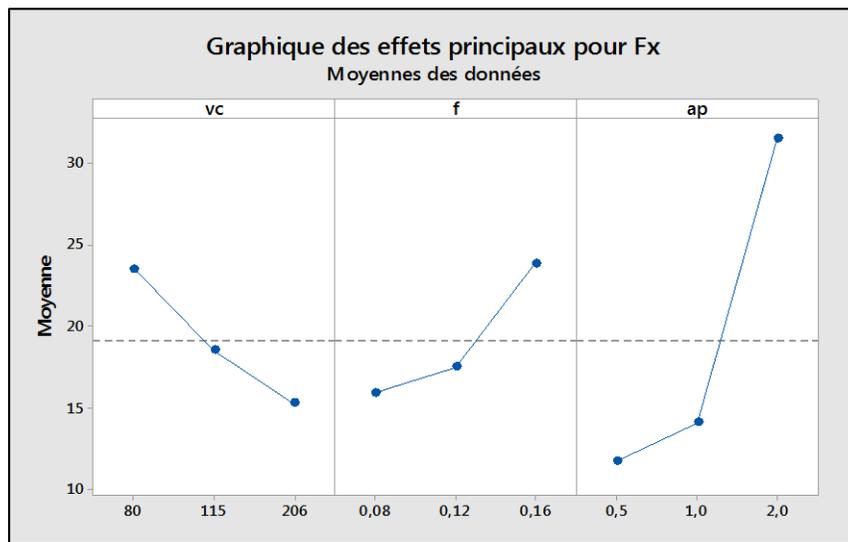


Figure III.5. Graphique des effets principaux Fx.

III.4.1.3. Analyse de régression pour Fx

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 (III.8) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 92.78\%$.

$$F_x = 54,3 - 0,297 \times V_c - 335 \times f - 17,08 \times a_p + 0,000853 \times V_c \times V_c + 1501 \times f \times f + 8,47 \times a_p \times a_p - 0,102 \times V_c \times f + 0,0002 \times V_c \times a_p + 75,4 \times f \times a_p \quad (III.8)$$

III.4.1.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédits pour l'effort (F_x) est présentée dans la figure III.6 et la figure III.7. L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision de modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

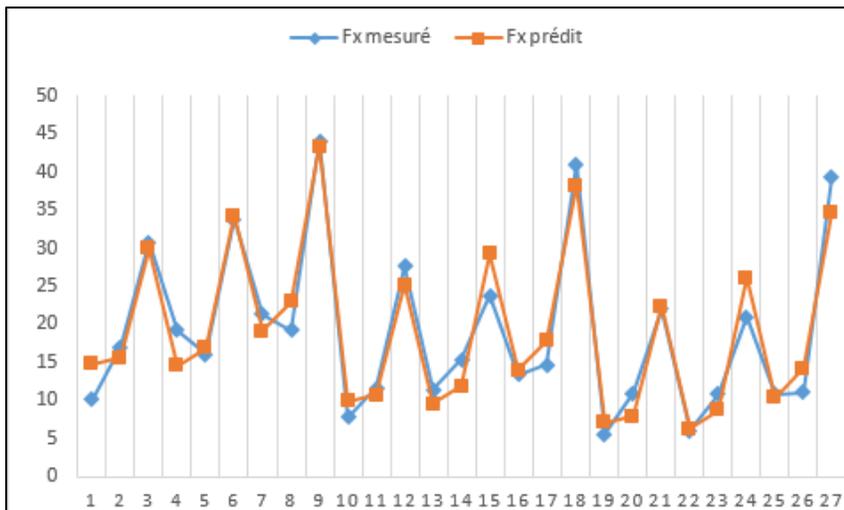


Figure III.6. Courbe de comparaison entre les valeurs mesurées et estimées pour l'effort F_x .

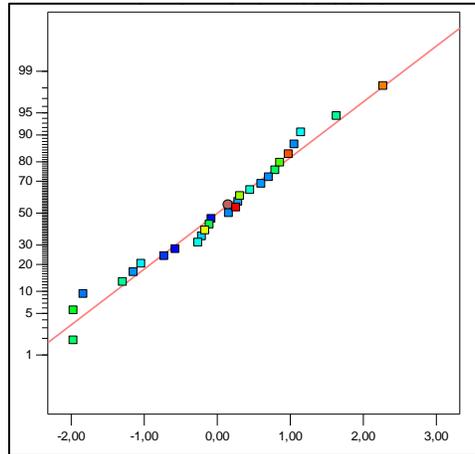


Figure III.7. Les valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour F_x .

III.4.1.5. Analyse de surface de réponse pour F_x

Le graphe de surface de réponse (Figure III.8.) représente les résultats de la surface de réponse (3D) de l'effort (F_x), en fonction des paramètres de coupe (V_c, f, ap). L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la pente de la profondeur de passe (ap) est importante, donc ce facteur (ap) possède l'effet le plus significatif sur la composante (F_x).

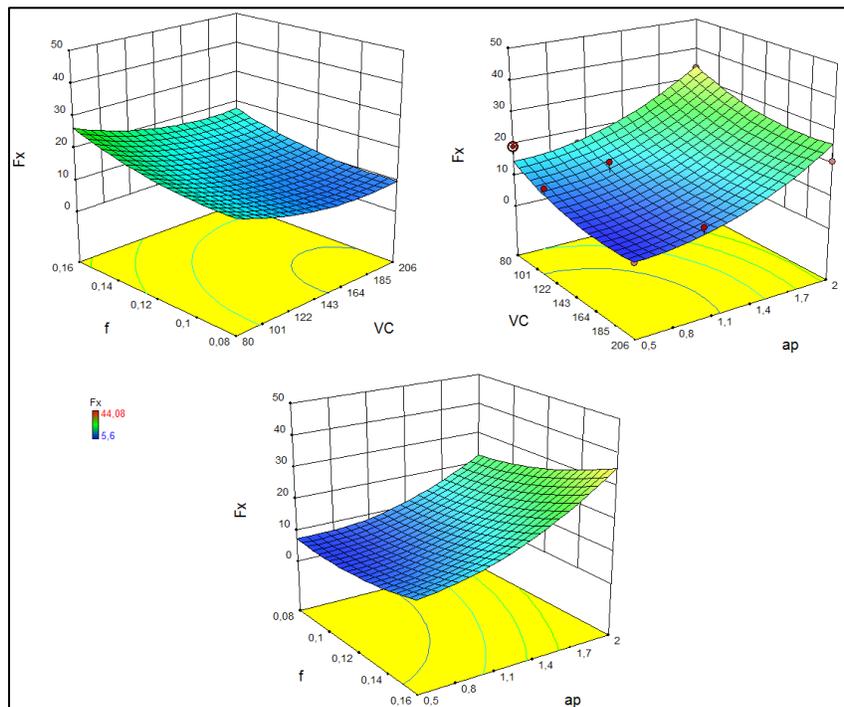


Figure III.8. Surface de réponse pour l'effort F_x en fonction de (V_c, f, ap).

III.4.2. Modélisation de l'effort radial F_y

III.4.2.1. Analyse de variance ANOVA pour F_y

L'analyse ANOVA présentée dans le **tableau III.4** montre que la profondeur de passe (ap), est le facteur le plus important qui affecte (F_y). Sa contribution est 66.72 %, suivie par l'avance (f) ont 16.29%, la vitesse de coupe (V_c) ont 8.03% puis le produit ap^2 ont 1,33 % suivie par le produit (f^2) et ($f \times ap$), mais l'interaction ($V_c \times ap$) et les produits (ap^2 et V_c^2) n'ont pas d'influence significative sur l'effort (F_y).

Tableau III.4. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_y .

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Modèle	2206,14	9	245,13	44,24	< 0.0001	95,91	Significant
V_c	231,47	1	231,47	41,78	< 0.0001	8,03	Significant
f	360,65	1	360,65	65,10	< 0.0001	16,29	Significant
ap	1276,10	1	1276,10	230,33	< 0.0001	66,72	Significant
V_c^2	1,66	1	1,66	0,30	0,5912	1,19	Non Significant
$f \times f$	46,28	1	46,28	8,35	0,0102	0,02	Significant
$ap \times ap$	5,69	1	5,69	1,03	0,3249	1,33	Non Significant
$V_c \times f$	27,19	1	27,19	4,91	0,0407	0,07	Significant
$V_c \times ap$	0,52	1	0,52	0,094	0,7630	2,01	Non significant
$f \times ap$	30,63	1	30,63	5,53	0,0310	0,25	Significant
Erreur	94,18	17	5,54			4,09	
Total	2300,32	26				100	

III.4.2.2. Effets principaux pour F_y

La **figure III.9** expose les graphiques des effets principaux pour l'effort (F_y), il est clair que l'influence de la profondeur de passe (ap) est plus grande que la vitesse de coupe (V_c), suivie par l'avance (f).

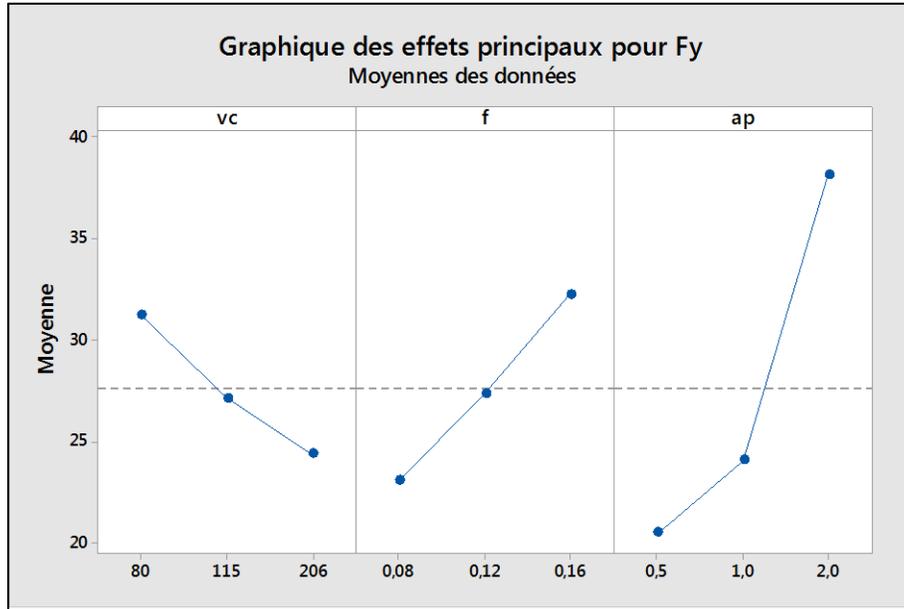


Figure III.9. Effet de conditions de coupe sur l'effort F_y .

III.4.2.3. Analyse de régression pour F_y

La relation fonctionnelle entre la variable dépendante pour la composante dans le sens perpendiculaire ou l'effort de refoulement (F_y) et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et ap) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 95,91\%$) correspondant à la précision de régression avec Le modèle quadratique obtenu il présenté par l'équation (III.9).

$$F_y = 22,0 - 0,1882 \times V_c + 63 \times f + 2,84 \times ap + 0,000690 \times V_c \times V_c + 184 \times f \times f + 4,60 \times ap \times ap - 0,143 \times V_c \times f - 0,0395 \times V_c \times ap + 22,5 \times f \times ap \quad (III.9)$$

III.4.2.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La **figure III.10** et **figure III.11** illustre les différences entre les valeurs mesurées et prédites de l'effort (F_y). 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.

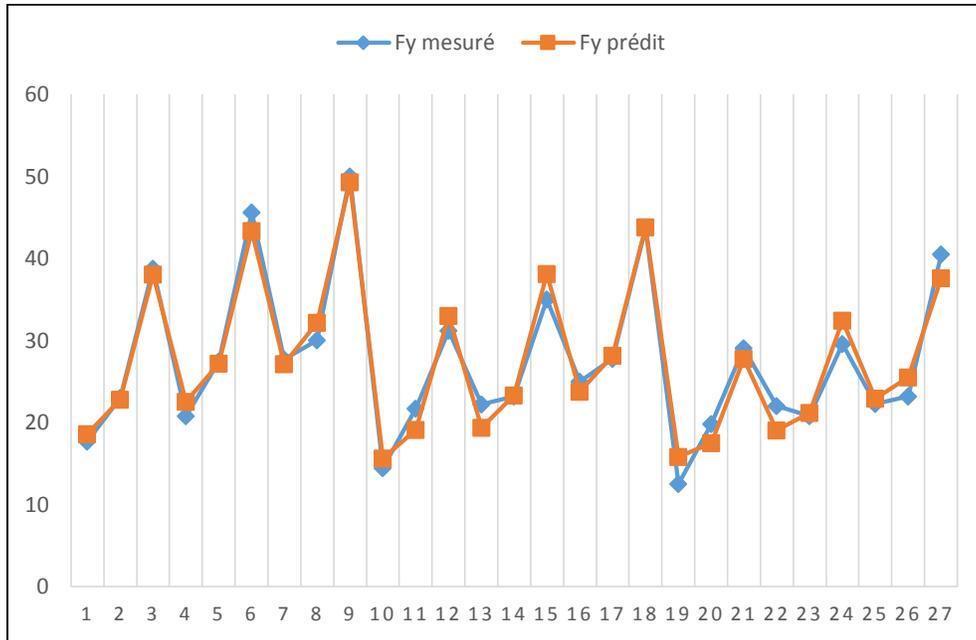


Figure III.10. Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour l'effort F_y .

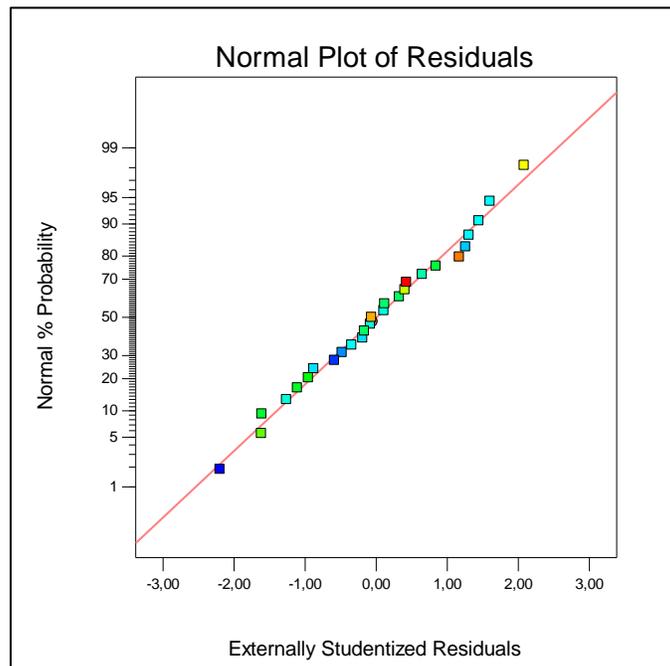


Figure III.11. Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour l'effort F_y .

III.4.2.5. Analyse de surface de réponse pour F_y

L'analyse des graphes de surface de réponse **figure III.12** ce qui représente les résultats de la surface de réponse (3D) de l'effort (F_y) confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la pente de la profondeur de passe (ap) est importante, donc ce facteur (ap) possède l'effet le plus significatif sur la composante (F_y).

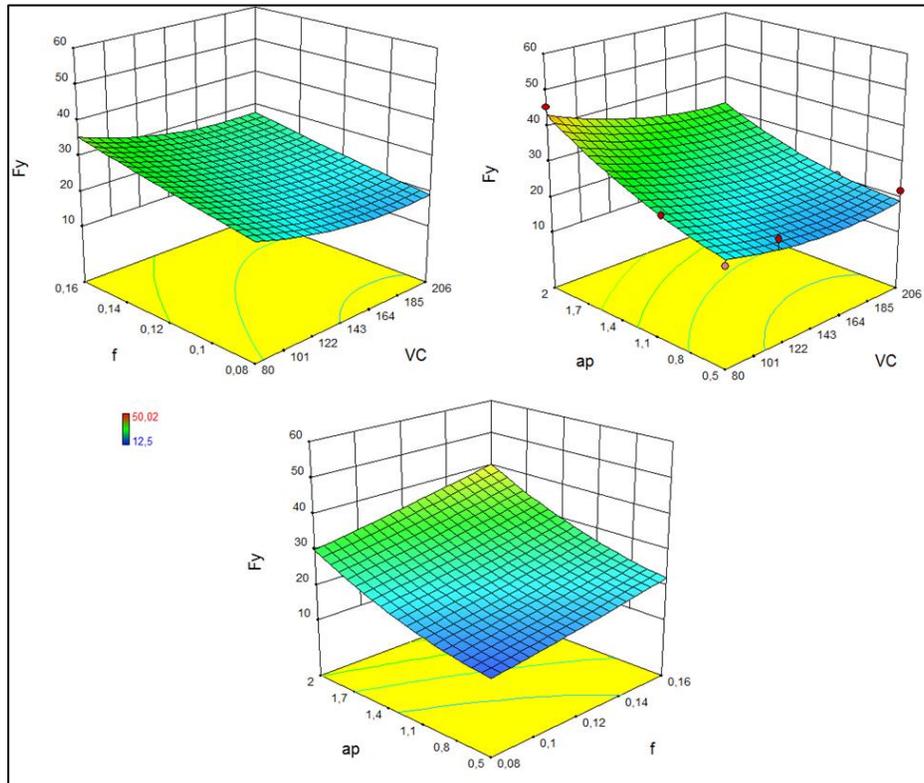


Figure III.12. Surface de réponse et pour l'effort F_y en fonction de (V_c, f, ap).

III.4.3. Modélisation de l'effort tangentiel F_z

III.4.3.1. Analyse de variance ANOVA pour F_z

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 46.89 %. Le facteur suivant influençant (F_z) est l'avance (f) suivi par (V_c), leurs contributions sont de 16,83% et 14,36% respectivement. Les autres termes ont une contribution inférieure à 1%.

Tableau III.5. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort Fz.

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Modèle	7076,46	9	786,27	15,24	< 0.0001	98.97	Significant
Vc	351,35	1	351,35	6,81	0,0183	14.36	Significant
f	1538,91	1	1538,91	29,83	< 0.0001	16.83	Significant
ap	3869,84	1	3869,84	75,02	< 0.0001	46.89	Significant
Vc ²	0,078	1	0,078	1,503E-003	0,9695	0.02	Non Significant
f x f	16,92	1	16,92	0,33	0,5743	0.12	Non Significant
ap x ap	700,47	1	700,47	13,58	0,0018	1.73	Significant
Vc x f	1,81	1	1,81	0,035	0,8536	0	Non Significant
Vc x ap	9,62	1	9,62	0,19	0,6713	0.21	Non Significant
f x ap	137,53	1	137,53	2,67	0,1209	8.81	Non Significant
Erreur	876,93	17	51,58			11.03	
Total	7953,39	26				100	

III.4.3.2. Effets principaux pour Fz

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la **figure III.13** à partir de cette figure, On peut dire que la profondeur de passe (ap) affecte fortement l'effort tangentiel de coupe (Fz), suivie par l'avance par tour (f) puis la vitesse de coupe (Vc). L'étude du graphique des effets principaux concorde avec les résultats des surfaces de réponse.

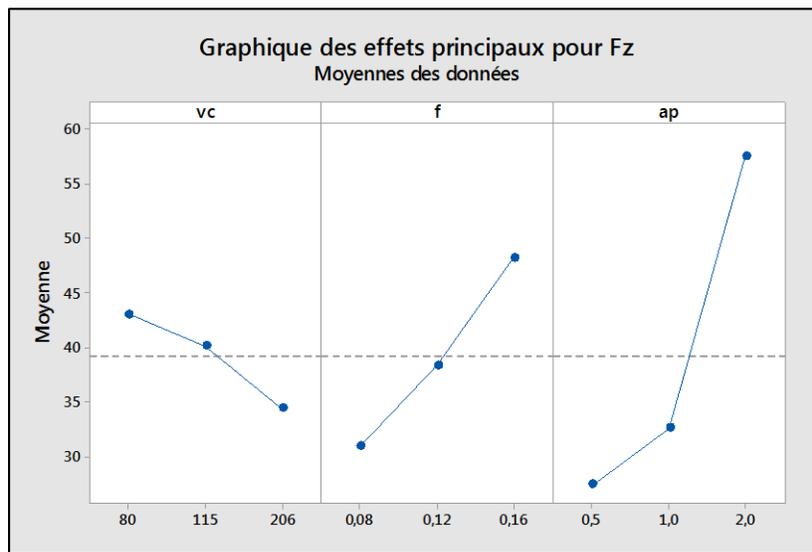


Figure III.13. Effet de conditions de coupe sur l'effort Fz.

III.4.3.3. Analyse de régression pour F_z

L'équation de régression obtenue est donnée ci-dessous par l'équation (III.10) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 98,97 \%$.

$$F_z = 55,9 - 0,095 \times V_c - 270 \times f - 31,1 \times a_p + 0,000178 \times V_c \times V_c + 791 \times f \times f + 9,75 \times a_p \times a_p + 0,031 \times V_c \times f - 0,0239 \times V_c \times a_p + 250,1 \times f \times a_p \quad (III.10)$$

III.4.3.4. 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 III.14** et **figure III.15**. 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.

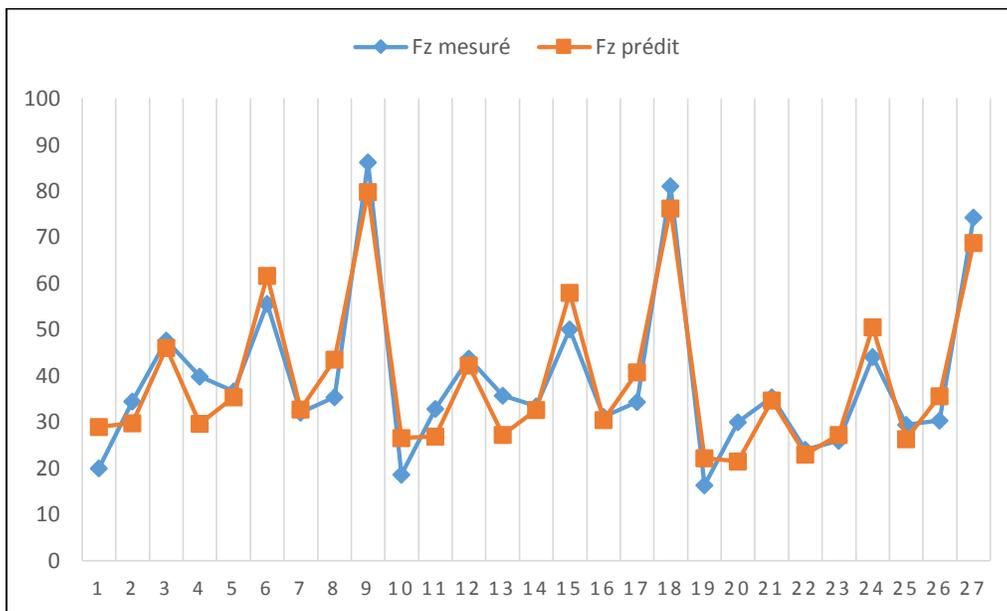


Figure III.14. Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour F_z .

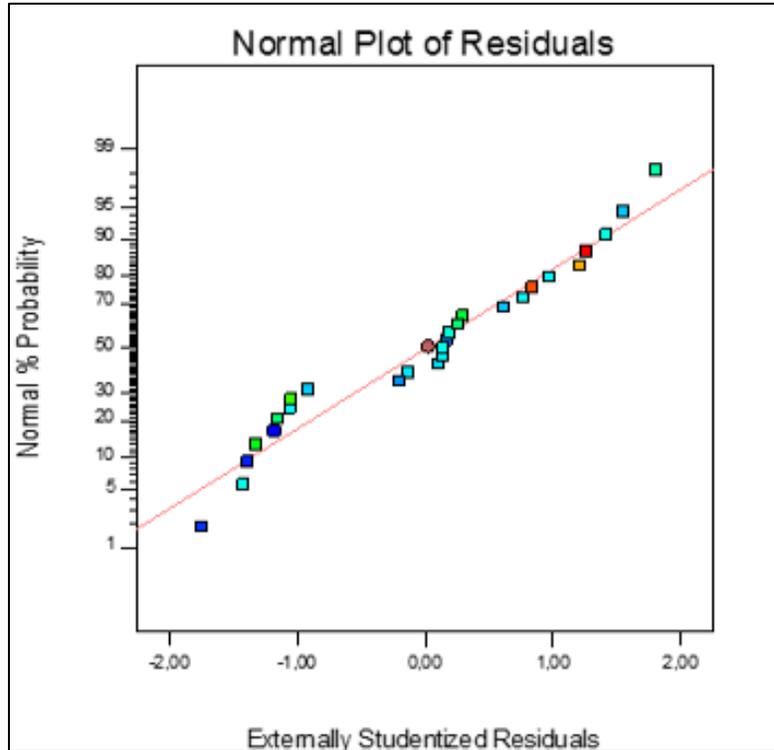


Figure III.15. Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour l'effort F_z .

III.4.3.5. Analyse de surface de réponse pour F_z

La **figure III.16** présente les surfaces de réponses en 3D. La figure (a) illustre l'effet de l'interaction entre la profondeur de passe (ap) 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 (1) et (2) révèle 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 III.5**.

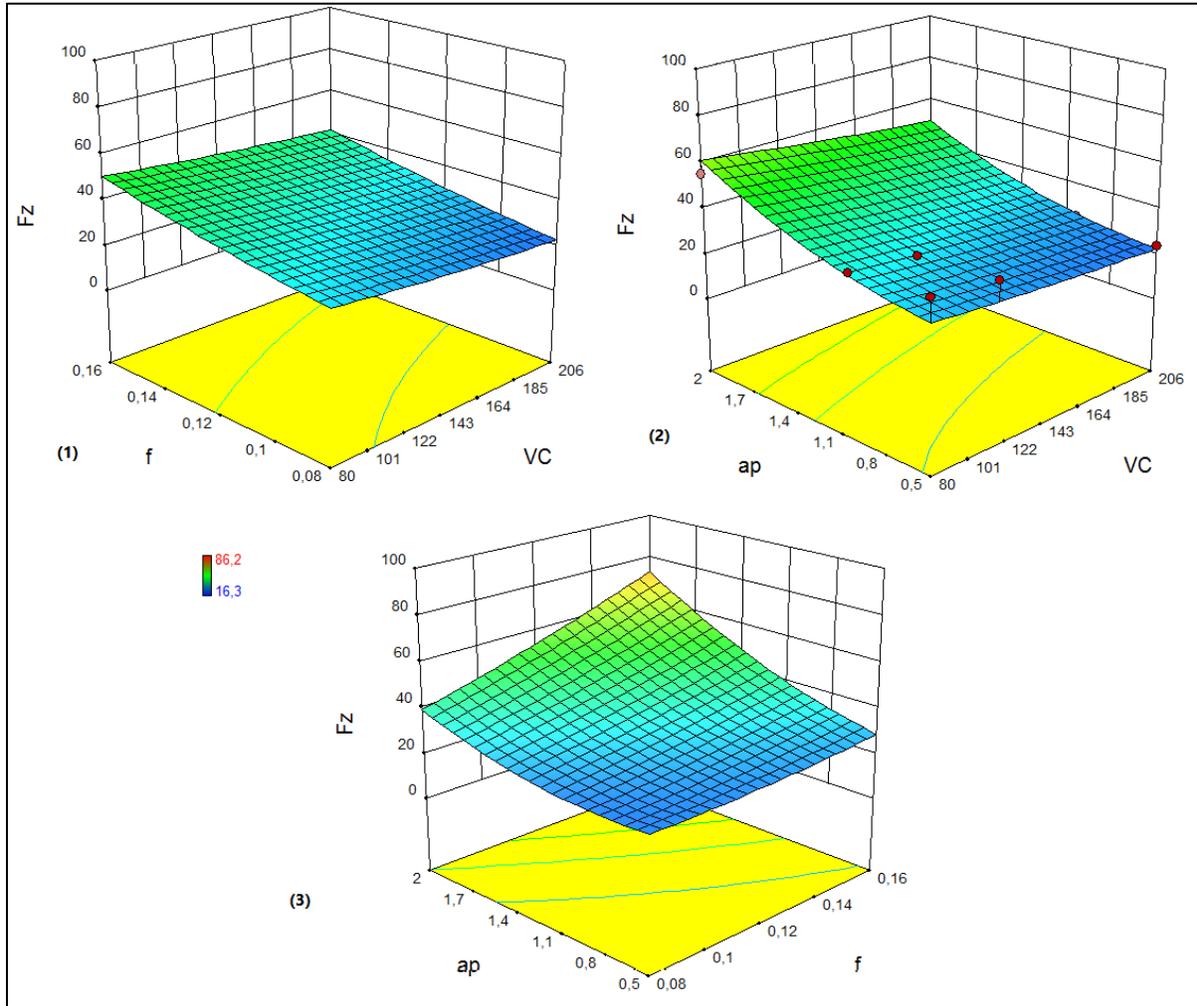


Figure III.16. Surface de réponse pour l'effort F_z en fonction de (V_c, f et ap).

III.4.4. Modélisation de la rugosité de surface R_a

III.4.4.1. Analyse de variance ANOVA pour R_a

Le **tableau III.6** illustre les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (R_a) pour un niveau de confiance de 95%. Dans ce tableau, Il est clair que l'avance par tour (f) est le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface (R_a), sa contribution est 57.92%. Le deuxième facteur important affectant la rugosité de surface est la profondeur de passe (ap) avec 28.46% de contribution, la vitesse de coupe (V_c) avec 6.84% 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.

Tableau III.6. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Ra.

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Modèle	0,41	9	0,046	41,93	< 0.0001	95.69	Significant
Vc	0,030	1	0,030	27,42	< 0.0001	6.84	Significant
f	0,25	1	0,25	231,43	< 0.0001	57.92	Significant
ap	0,11	1	0,11	101,75	< 0.0001	28.46	Significant
Vc ²	1,803E-003	1	1,803E-003	1,65	0,2163	0.12	Non Significant
f x f	3,760E-004	1	3,760E-004	0,34	0,5653	0.99	Non Significant
ap x ap	3,506E-003	1	3,506E-003	3,21	0,0911	0.04	Non Significant
Vc x f	5,287E-004	1	5,287E-004	0,48	0,4961	0.42	Non Significant
Vc x ap	4,267E-003	1	4,267E-003	3,90	0,0646	0.09	Non Significant
f x ap	1,341E-004	1	1,341E-004	0,12	0,7304	0.81	Non Significant
Erreur	0,019	17	1,093E-003			4.31	
Total	0,43	26				100	

III.4.4.2. Effets principaux pour Ra

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans la **figure III.17**. A partir de cette figure, il apparaît clairement que l’avance par tour (*f*) affecte fortement la rugosité de surface (*Ra*) suivie par la profondeur de passe (*ap*). Par contre, la vitesse de coupe (*Vc*) a une très faible influence sur (*Ra*).

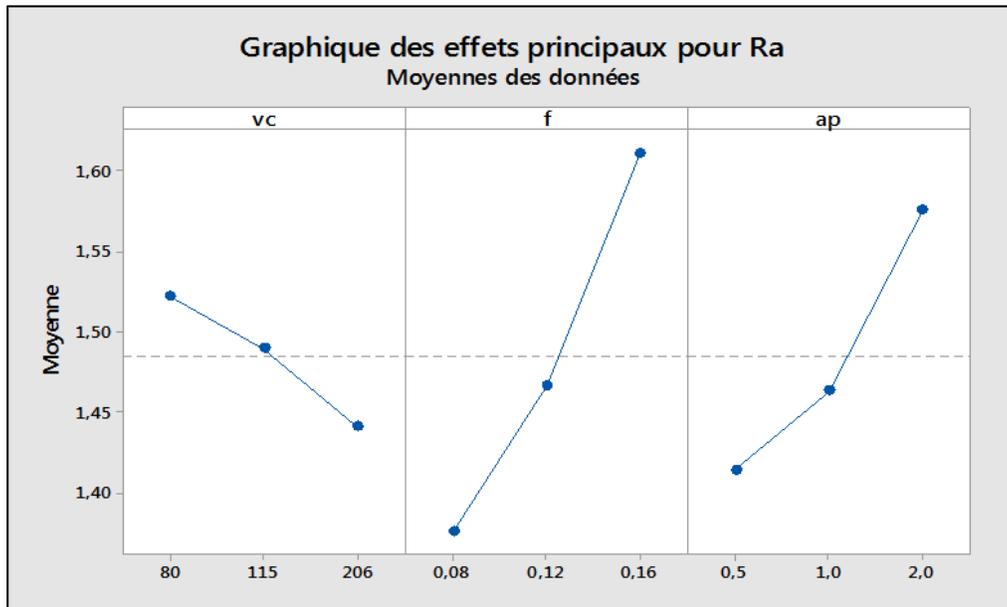


Figure III.17. Effet de conditions de coupe sur la rugosité Ra.

III.4.4.3. Analyse de régression pour Ra

La relation fonctionnelle (III.11) entre la rugosité moyenne arithmétique (Ra) et les variables indépendantes étudiées (Vc , f et ap) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 95.96 \%$).

$$Ra = 1,515 - 0,00195 \times Vc - 2,34 \times f + 0,0313 \times ap + 0,000003 \times Vc \times Vc + 16,67 \times f \times f + 0,0096 \times ap \times ap + 0,00471 \times Vc \times f - 0,000113 \times Vc \times ap + 0,560 \times f \times ap \quad (III.11)$$

III.4.4.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La figure III.18 illustre les différences entre les valeurs mesurées et prédites de la rugosité de surface (Ra). La comparaison des résultats prouve que les valeurs prédites et celles mesurées sont très proches ce qui prouve que le modèle est fiable (Figure III.19).

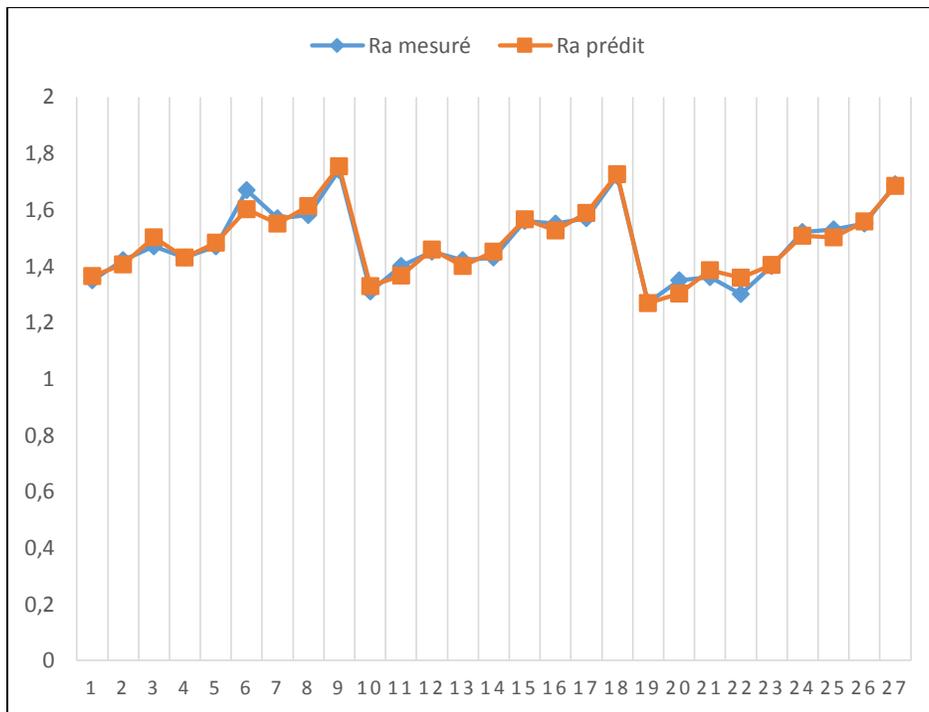


Figure III.18. Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour la rugosité Ra .

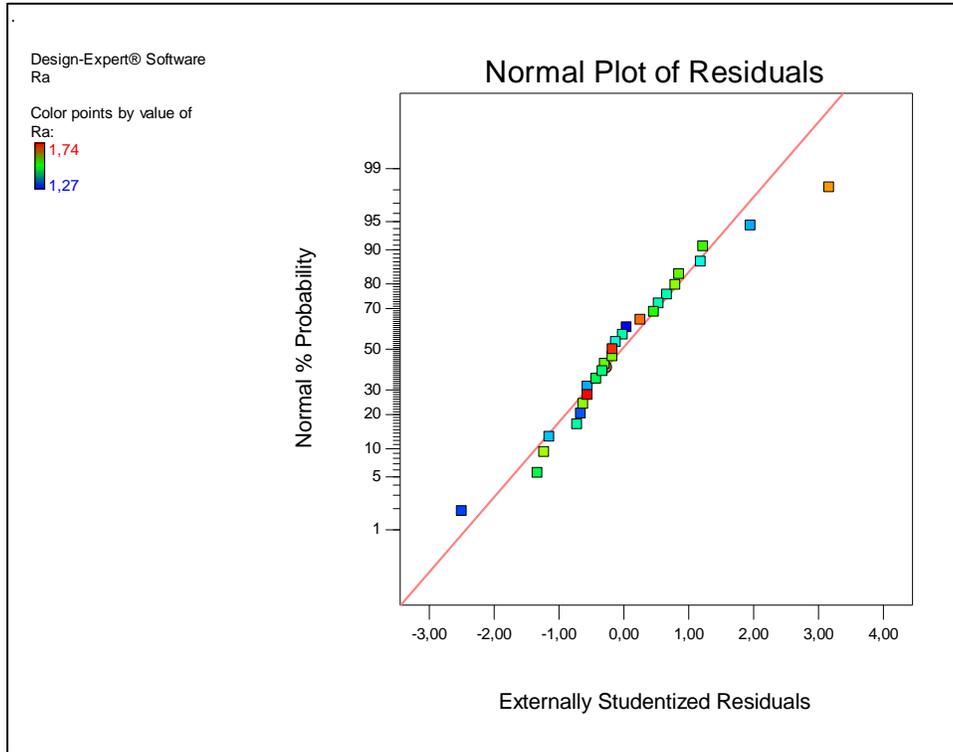


Figure III.19. Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour Ra.

III.4.4.5. Analyse de surface de réponse pour Ra

Le graphe de surface de réponse **Figure III.20** représente les résultats de la surface de réponse (3D) de la rugosité (Ra), en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , a_p), l'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que Les figures (a) et (b) montrent que l'effet de la vitesse de coupe (V_c) sur la rugosité de surface (Ra) est moindre par rapport aux effets de l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p). La figure (c) montre que l'augmentation de l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p) provoque une augmentation de la rugosité (Ra).

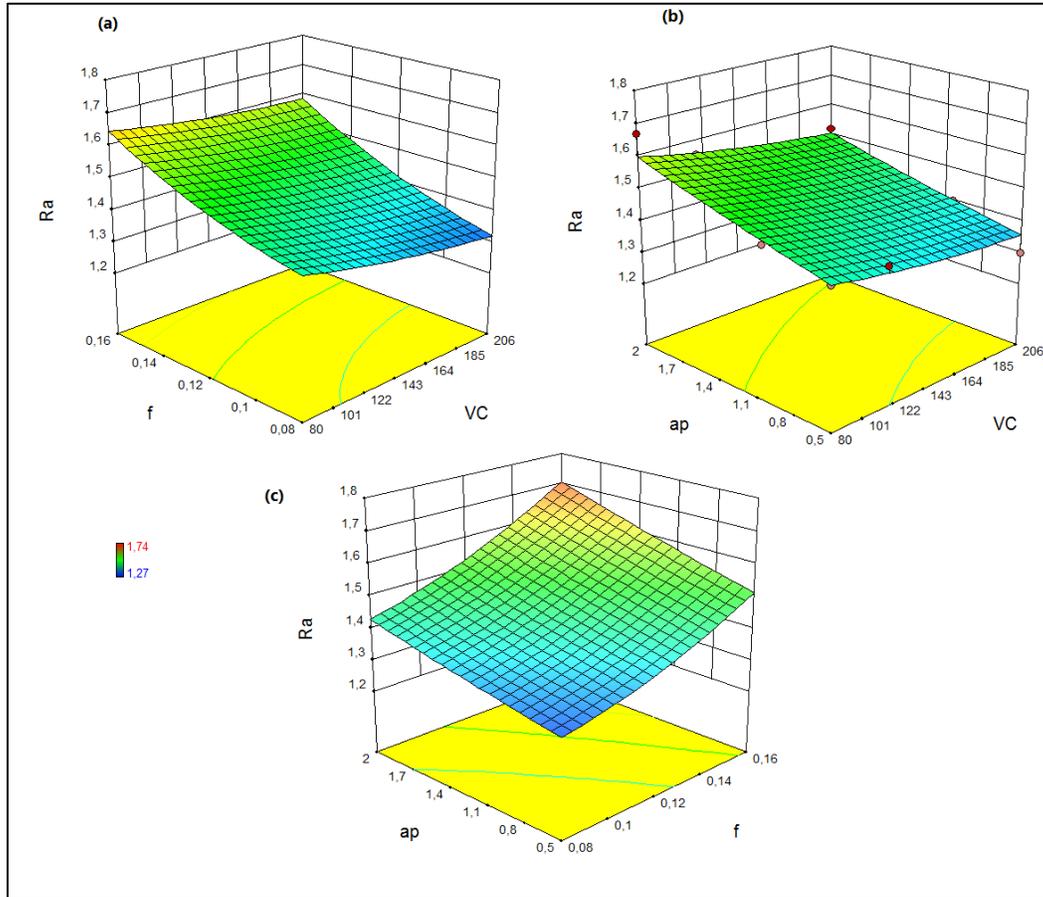


Figure III.20. Surface de réponse de la rugosité Ra en fonction de (Vc, f, ap).

III.4.5. Modélisation de la rugosité de surface Rz

III.4.5.1. Analyse de variance ANOVA pour Rz

L'analyse ANOVA de **tableau III.7** montre que l'avance (f) c'est la première condition qui affecte la rugosité (Rz) avec un pourcentage de contribution 44.99 %, puis le produit de l'avance (f^2) de 15.48%, suivie par la vitesse de coupe (Vc) de 11,48 % et la profondeur de passe (ap) de 11.09 %.

Tableau III.7. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Rz.

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Modèle	6,38	9	0,71	23,01	< 0.0001	92.41	Significant
Vc	1,04	1	1,04	33,64	< 0.0001	11.48	Significant
f	2,61	1	2,61	84,78	< 0.0001	44.99	Significant
ap	0,62	1	0,62	20,23	0,0003	11.09	Significant
Vc ²	0,15	1	0,15	4,80	0,0426	5.18	Significant
f x f	0,015	1	0,015	0,48	0,4965	15.48	Non Significant
ap x ap	0,088	1	0,088	2,87	0,1086	0.55	Non Significant
Vc x f	0,36	1	0,36	11,60	0,0034	2.14	Significant
Vc x ap	1,07	1	1,07	34,69	< 0.0001	0.22	Significant
f x ap	0,038	1	0,038	1,25	0,2799	1.28	Non Significant
Erreur	0,52	17	0,031			7.59	
Total	6,91	26				100	

III.4.5.2. Effets principaux pour Rz

La **figure III.21** expose les graphiques des effets principaux pour la rugosité (Rz) en fonction de conditions de coupe (Vc, f, ap), l'analyse des graphes montre que l'avance (f) a la plus grande influence, suivie par la vitesse de coupe (Vc). Par contre, la profondeur de passe (ap) a une très faible influence sur (Rz).

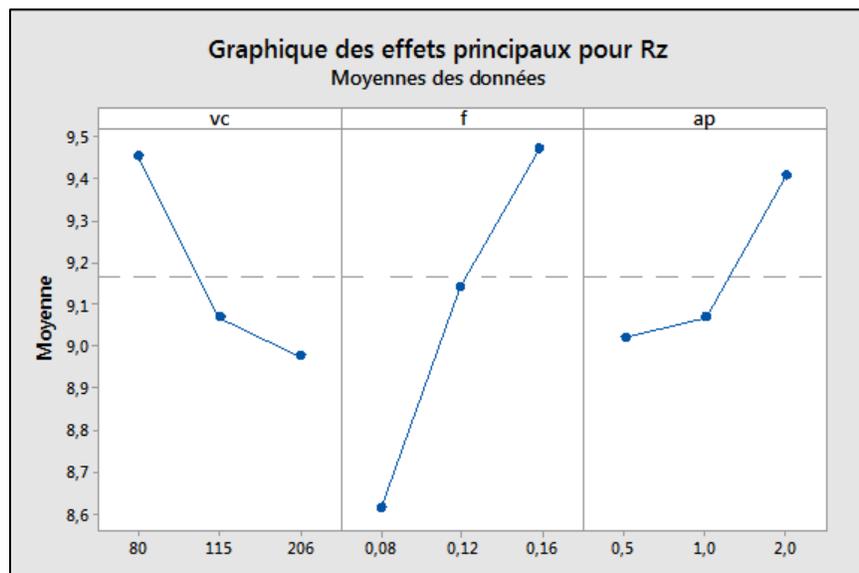


Figure III.21. Effet de conditions de coupe sur la rugosité Rz.

III.4.5.3. Analyse de régression pour R_z

La relation fonctionnelle relative à la rugosité (R_z) et les variables indépendantes étudiées (V_c , f et a_p) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 92,41\%$). Correspondant à la précision de régression. Le modèle quadratique obtenu à partir de l'analyse statistique peut être utilisé pour prédire la rugosité (R_z) de la surface (R_z) selon les facteurs étudiés. Le modèle obtenu présente l'évolution de l'état de la surface pour la rugosité (R_z) en fonction de (V_c , f , et a_p), il est présenté par l'équation (III.12).

$$R_z = 4,995 - 0,02046 \times V_c + 82,7 \times f + 0,283 \times a_p + 0,000079 \times V_c \times V_c - 263,9 \times f \times f + 0,163 \times a_p \times a_p - 0,0427 \times V_c \times f - 0,00071 \times V_c \times a_p - 2,81 \times f \times a_p \quad (III.12)$$

III.4.5.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

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

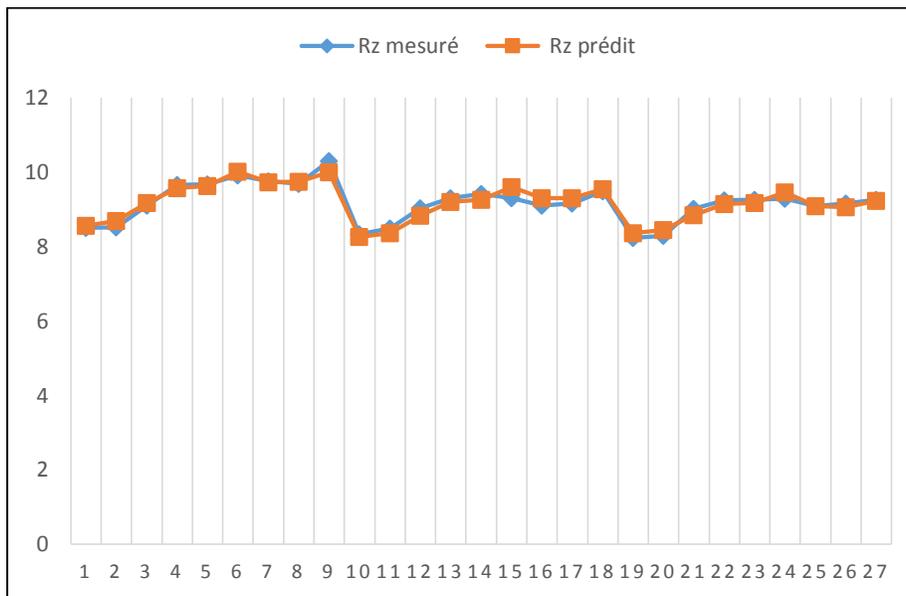


Figure III.22. Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour R_z .

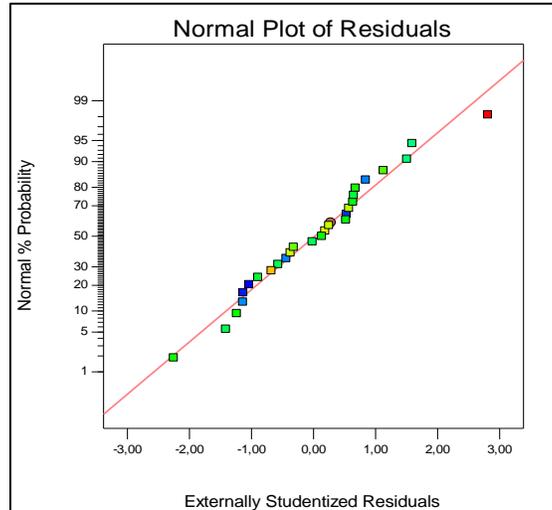


Figure III.23. Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour Rz.

III.4.5.5. Analyse de surface de réponse pour Rz

Le graphe de surface de réponse **figure III.24(a)** représente les résultats de la surface de réponse (3D) de la rugosité (Rz), en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , ap). L'analyse des résultats confirme les résultats de l'ANOVA, on remarque que la pente de la vitesse d'avance (f) est importante, donc ce facteur (f) possède l'effet le plus significatif sur la rugosité (R_z).

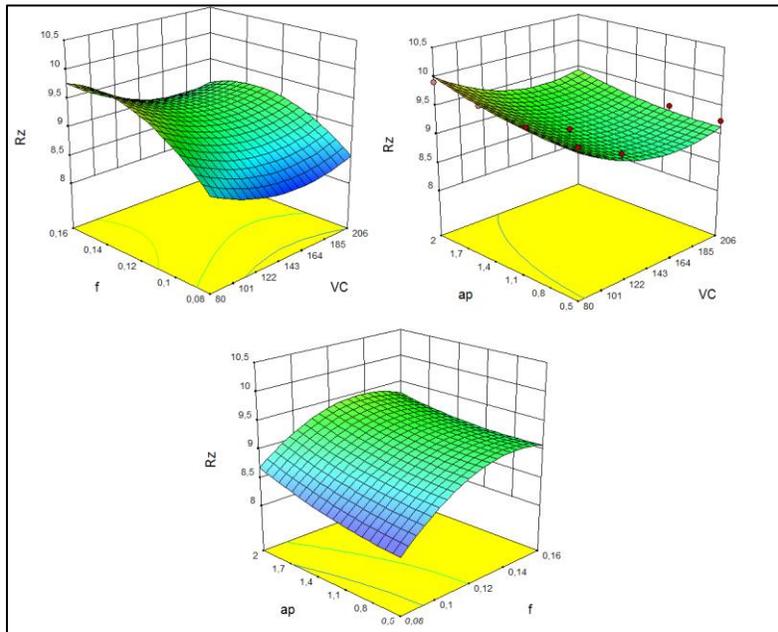


Figure III.24(a). Surface de réponse de la rugosité Rz en fonction de (V_c , f , ap).

Il est clair que l'avance par tour (f) est le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface (R_a et R_z), sa contribution est 44.99% et 57.92% respectivement. C'est logique car l'augmentation de l'avance génère des sillons résultant 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 L. R. Silva et autres [11] lors de l'usinage du composite PA66-GF30 et du polyamide PA66. Un exemple représentatif d'une image en 3D d'une surface tournée est représenté dans la **figure III.24(b)** pour mieux visualiser ces rainures.

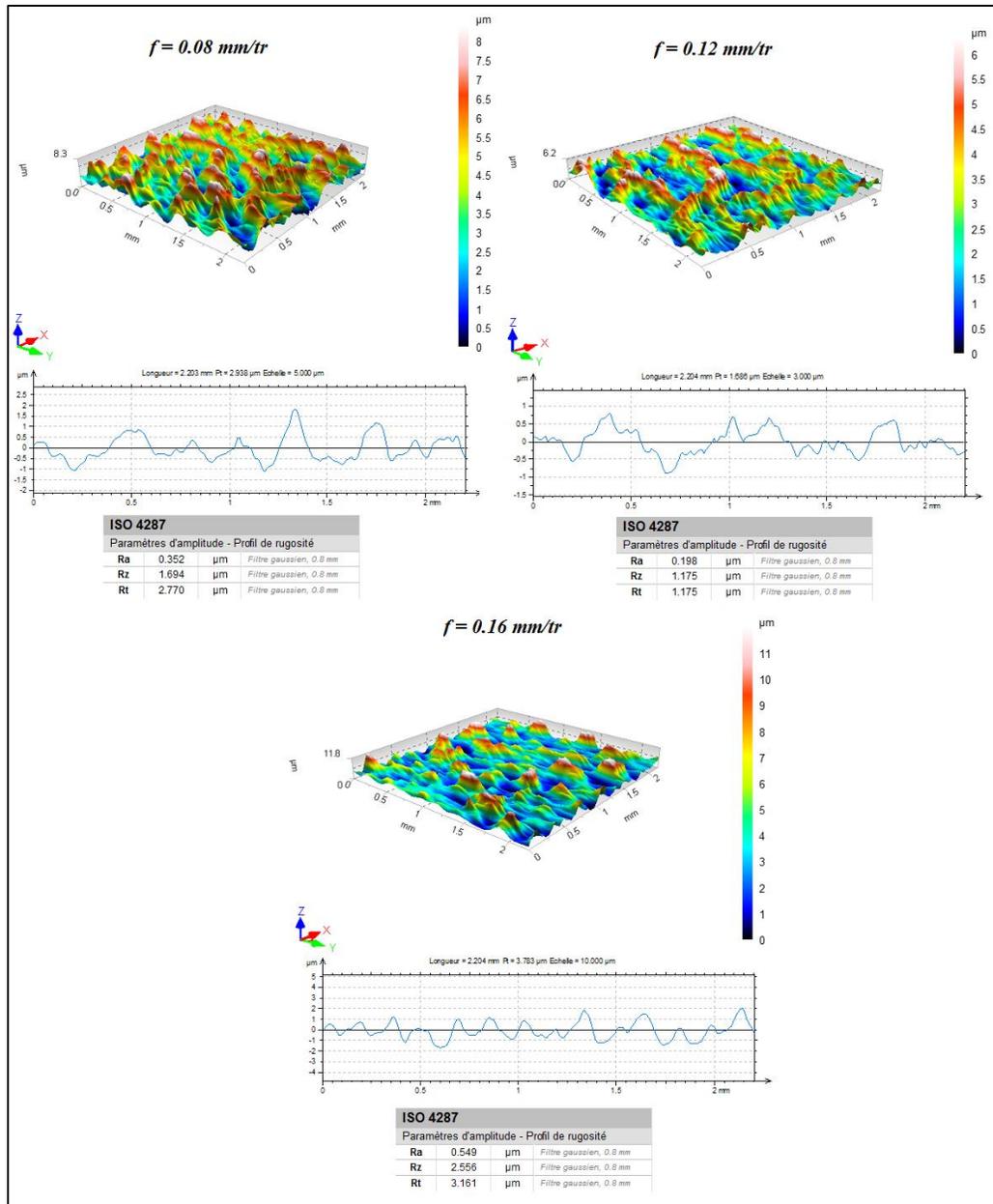


Figure IV.24(b). Topographié d'une surface usinée avec trois avances.

III.4.6. Modélisation de la puissance de coupe

III.4.6.1. Analyse de variance ANOVA pour P_c

Le résultat du **tableau III.8** montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important qui affecte la puissance de coupe (P_c). Sa contribution est de 36.81 %, suivie par l'avance (f) avec la contribution de 29.72 % puis la vitesse de coupe (V_c) avec la contribution de 11.51 % et suivie par les interactions ($f \times ap$, $V_c \times ap$) avec les contributions de (75.99 ; 4.19) % respectivement. Finalement l'interaction ($V_c \times f$) et les produits (V_c^2 , f^2 , ap^2)

Tableau III.8. Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe P_c .

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Modèle	53123,23	9	5902,58	20,27	< 0.0001	91.41	Significant
V_c	17966,99	1	17966,99	61,69	< 0.0001	11.51	Significant
f	8693,34	1	8693,34	29,85	< 0.0001	29.72	Significant
ap	21124,26	1	21124,26	72,54	< 0.0001	36.81	Significant
V_c^2	1104,85	1	1104,85	3,79	0,0682	0.07	Non Significant
$f \times f$	2432,01	1	2432,01	8,35	0,0102	0.26	Significant
$ap \times ap$	3480,51	1	3480,51	11,95	0,0030	1.02	Significant
$V_c \times f$	37,01	1	37,01	0,13	0,7259	1.90	Non Significant
$V_c \times ap$	151,97	1	151,97	0,52	0,4799	4.19	Non Significant
$f \times ap$	591,98	1	591,98	2,03	0,1721	5.99	Non Significant
Erreur	4950,83	17	291,23			8.53	
Total	58074,06	26				100.00	

III.4.6.2. Effets principaux pour la puissance P_c

La **figure III.25** 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 la vitesse de coupe (V_c) et en dernier lieu l'avance par tour (f). Cela confirme les résultats de l'ANOVA (**Tableau III.7**).

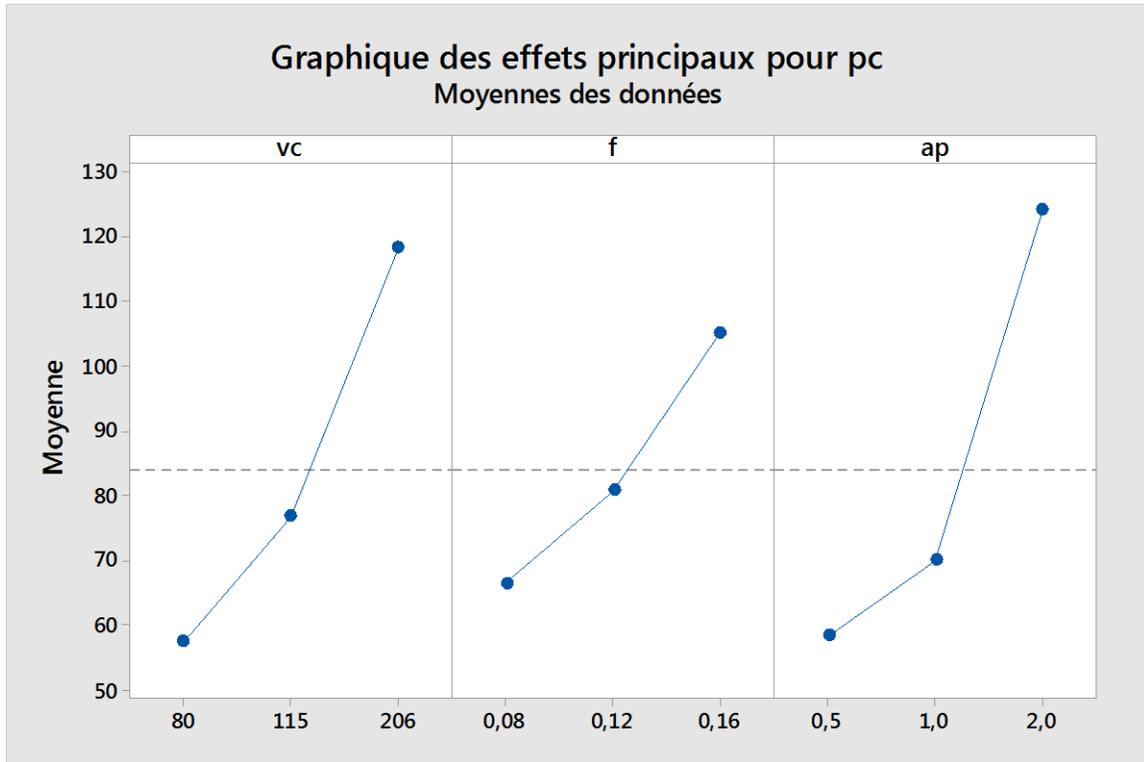


Figure III.25. Effet de conditions de coupe sur la puissance de coupe P_c .

III.4.6.3. Analyse de régression pour la puissance de coupe P_c

Le modèle de régression quadratique obtenue est donnée ci-dessous par l'équation (III.13) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 91.41\%$.

$$P_c = 144,3 - 0,065 \times V_c - 1417 \times f - 112,1 \times ap - 0,00081 \times V_c \times V_c + 3145 \times f \times f + 20,2 \times ap \times ap + 3,69 \times V_c \times f + 0,2866 \times V_c \times ap + 557 \times f \times ap \quad (III.13)$$

III.4.6.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la puissance (P_c) est présentée dans la **figure III.26** et la **figure III.27**. L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision et la robustesse du modèle trouvé, et montre bien aussi la normalité de la distribution de l'erreur.

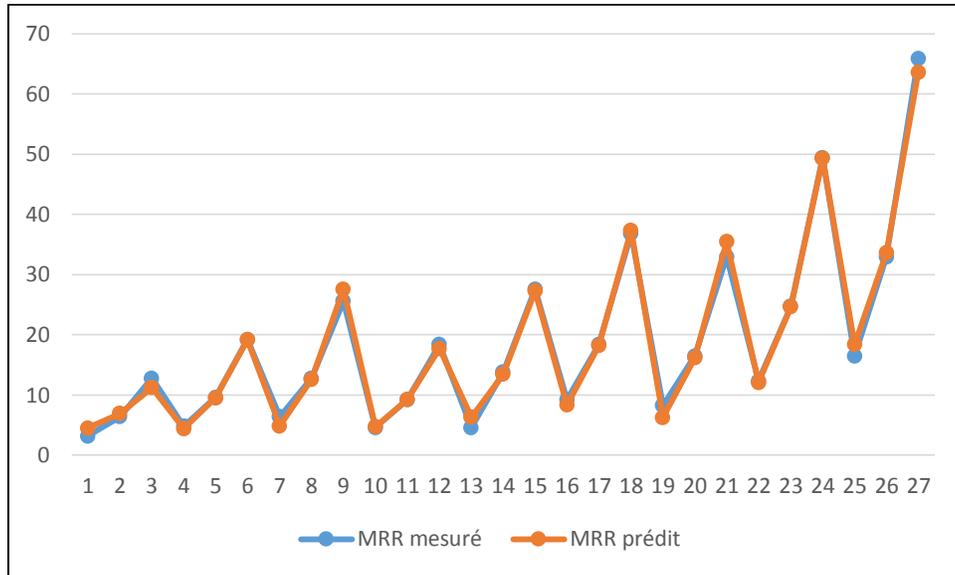


Figure III.26. Courbe de comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour la puissance de coupe P_c .

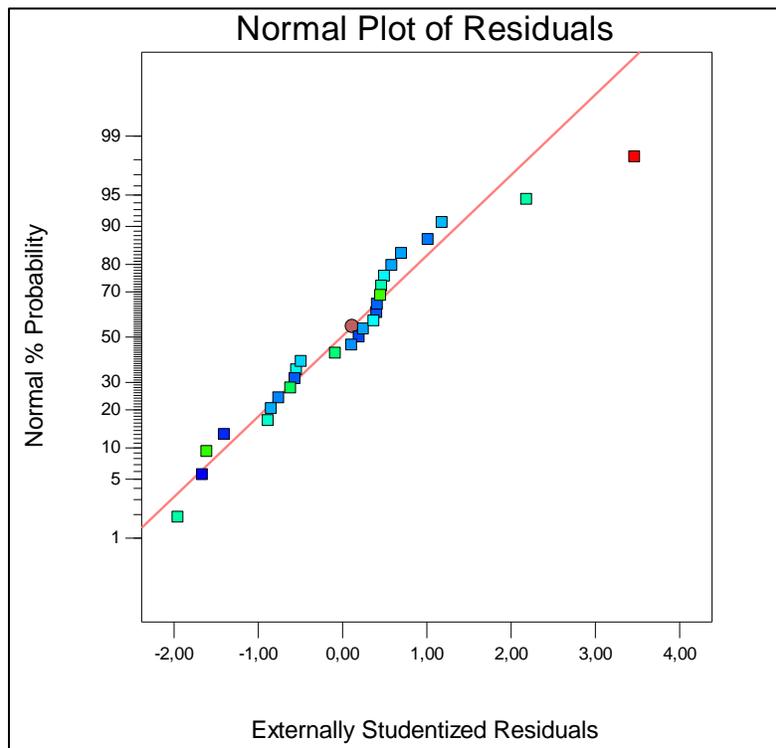


Figure III.27. Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour la puissance de coupe P_c .

III.4.6.5. Analyse de surface de réponse pour P_c

La figure III.28 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 a_p). 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 vitesse de coupe (V_c). Par contre l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) engendre un accroissement moins important comparativement à l'avance (f) et à la vitesse de coupe (V_c). Avec l'augmentation des trois facteurs (V_c), (f) et (a_p), la puissance de coupe s'accroît puisqu'elle est étroitement liée à l'augmentation des efforts de coupe et aussi la vitesse de coupe.

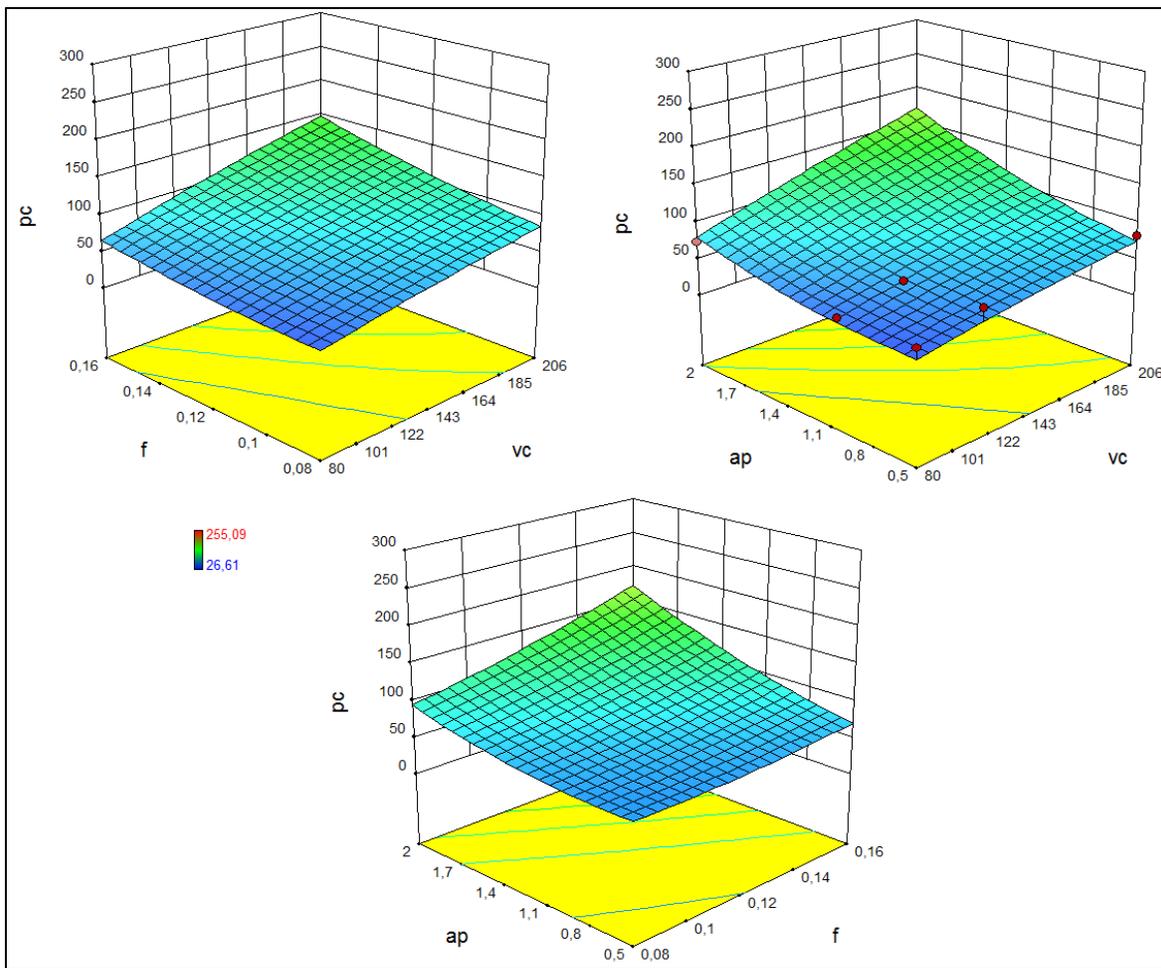


Figure III.28. Surface de réponse pour la puissance de coupe P_c en fonction de (V_c , f et a_p).

III.4.7. Modélisation de débit de copeau *MMR*

III.4.7.1. Analyse de variance ANOVA pour *MMR*

L'analyse ANOVA de **tableau III.9** présente les résultats de l'analyse ANOVA pour le débit du copeau enlevé (*MRR*). On peut affirmer que la profondeur de passe (*ap*) et la vitesse de coupe (*Vc*) ont la signification statistique la plus élevée de (48.07% et 26.29%) suivie par l'avance par tour (*f*) (12.24%). Les produits (Vc^2 , f^2 , ap^2) ont des contributions moins importantes et varient entre 1,93% et 0%. Les interactions ($Vc \times f$, $Vc \times ap$ et $f \times ap$) n'ont pas d'effet significatif sur le débit de copeau (*MMR*).

Tableau III.9. Analyse de la variance (ANOVA) pour le débit de copeau *MMR*.

Source	SS	DF	MS	F-value	P-value	Cont%	Remarques
Modèle	5686,92	9	631,88	302,78	< 0.0001	99.38	Significant
Vc	1579,26	1	1579,26	756,75	< 0.0001	26.29	Significant
f	869,82	1	869,82	416,80	< 0.0001	12.24	Significant
ap	2949,93	1	2949,93	1413,55	< 0.0001	48.07	Significant
Vc^2	110,55	1	110,55	52,97	< 0.0001	0.01	Significant
$f \times f$	419,58	1	419,58	201,05	< 0.0001	0.01	Significant
ap x ap	200,11	1	200,11	95,89	< 0.0001	0.00	Significant
$Vc \times f$	0,37	1	0,37	0,18	0,6799	1.93	Non Significant
$Vc \times ap$	0,39	1	0,39	0,19	0,6702	7.33	Non Significant
$f \times ap$	0,17	1	0,17	0,080	0,7801	3.50	Non Significant
Erreur	35,48	17	2,09			0.62	
Total	5722,40	26				100.00	

III.5. 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.

Dans notre cas, trois approches d'optimisation sont envisagées. Ils sont appelés

« *Optimisation de la qualité* », « *Optimisation de la consommation d'énergie* », et la dernière est la combinaison entre les deux optimisations précisées « *Optimisation combinée* », qui satisfait les objectifs suivants :

- minimiser la rugosité de la surface Ra et Rz pour la finition.
- minimiser les efforts de coupe Fx, Fy et Fz pour minimisation de la consommation d'énergie.
- objectif combiné ou les rugosités et les efforts de coupe ont la même importance.

Donc, 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 (Aucun, Maximum, Minimum, Cible, Dans la gamme) pour définir le but désiré. Les plages de facteurs définis pour chaque optimisation sont résumées dans le **tableau III.10**.

Tableau III.10. Conditions d'optimisations.

Contraintes						
Paramètres	objectif	Limite inférieure	Limite supérieure	Importance		
				Qualité	Consommation d'énergie	Combinée
Vc (m/min)	Gamme	80	206	***	***	***
f (mm/tr)	Gamme	0.08	0.16	***	***	***
ap (mm)	Gamme	0.5	2	***	***	***
Ra (µm)	Mini	1.27	1.74	*****	*	*****
Rz (µm)	Mini	8.23	10.3	*****	*	*****
Fx (N)	Mini	5.6	44.08	*	*****	*****
Fy (N)	Mini	12.5	50.02	*	*****	*****
Fz (N)	Mini	16.03	86.2	*	*****	*****

III.5.1. Optimisation pour un objectif de la qualité

Ce cas est très intéressant pour les travaux de finition. Dans ce cas on considère la rugosité de surface (R_a et R_z) comme le paramètre le plus important sans prendre par considération les autres paramètres de sortie.

Le **tableau III.11** présente la solution obtenue dans ce cas. Le graphique de l'optimisation de la rugosité de surface est présenté dans la **figure III.29** ; 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), avec une désirabilité de 0,980.

Tableau III.11. Solutions pour l'optimisation de la qualité de surface.

N° Solution	V_c	f	ap	R_a	R_z	Désirabilité
1	187.448	0.080	0.500	1.277	8.230	0.980

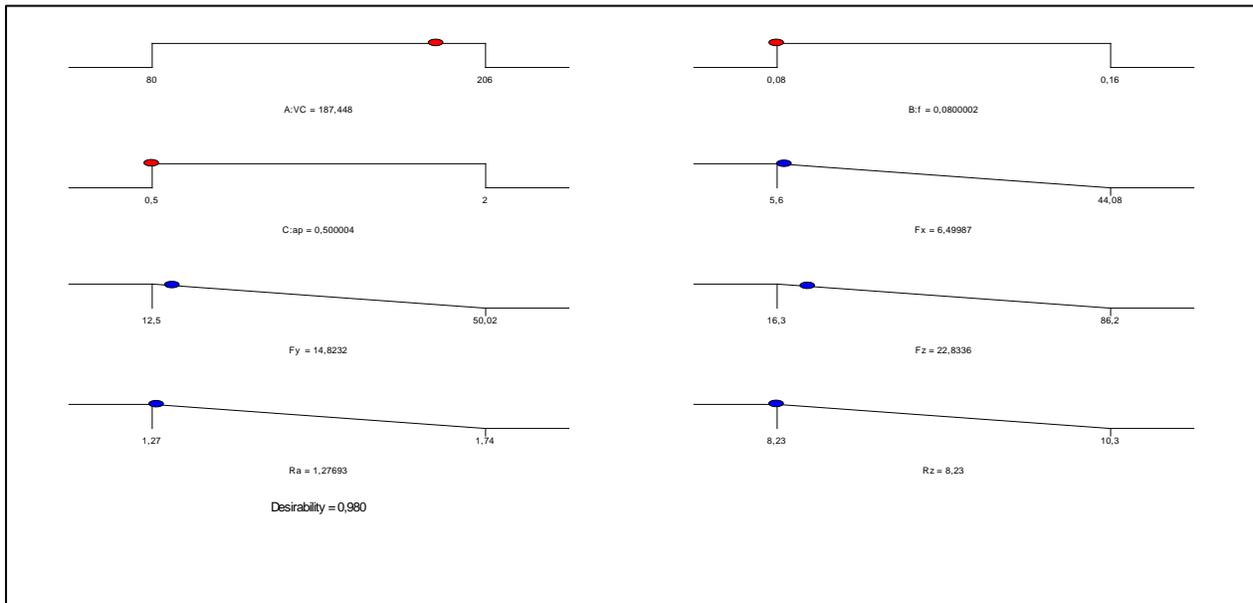


Figure III.29. Graphique de l'optimisation de la rugosité de surface.

La **figure III.29** confirme la solution de **tableau III.11**, les valeurs des paramètres de coupe optimaux pour obtenir une meilleure qualité de surface $R_a=1.277$ (μm) et $R_z=8.23$ (μm) sont : $V_c = 187.448$ (m / min), $f = 0.080$ (mm/tr) et $ap = 0.5$ (mm).

III.5.2. Optimisation pour un objectif de minimisation de la consommation d'énergie

La deuxième optimisation, a pour but de minimisation la consommation d'énergie car les efforts de coupe sont en relation directe avec la puissance consommée (**équation I.3**). Notre but donc est de minimiser les efforts de coupe (F_x , F_y et F_z). Les résultats obtenus sont présentés dans le **tableau III.12** et la **figure III.30**.

Tableau III.12. Solutions pour l'optimisation de l'effort de coupe.

N° Solution	Vc	f	ap	Fx	Fy	Fz	Désirabilité
1	181.154	0.080	0.567	6.309	14.764	22.742	0.947

La **figure III.30** confirme la solution de **tableau III.12**, Les valeurs des paramètres de coupe optimaux pour minimiser la consommation d'énergie durant l'usinage sont : $V_c=181.154$ (m /min), $f=0.080$ (mm /tr) et $ap=0.567$ (mm). Donc, Les efforts de coupe sont $F_x=6.309$ (N), $F_y=14.764$ (N), $F_z=22.742$ (N).

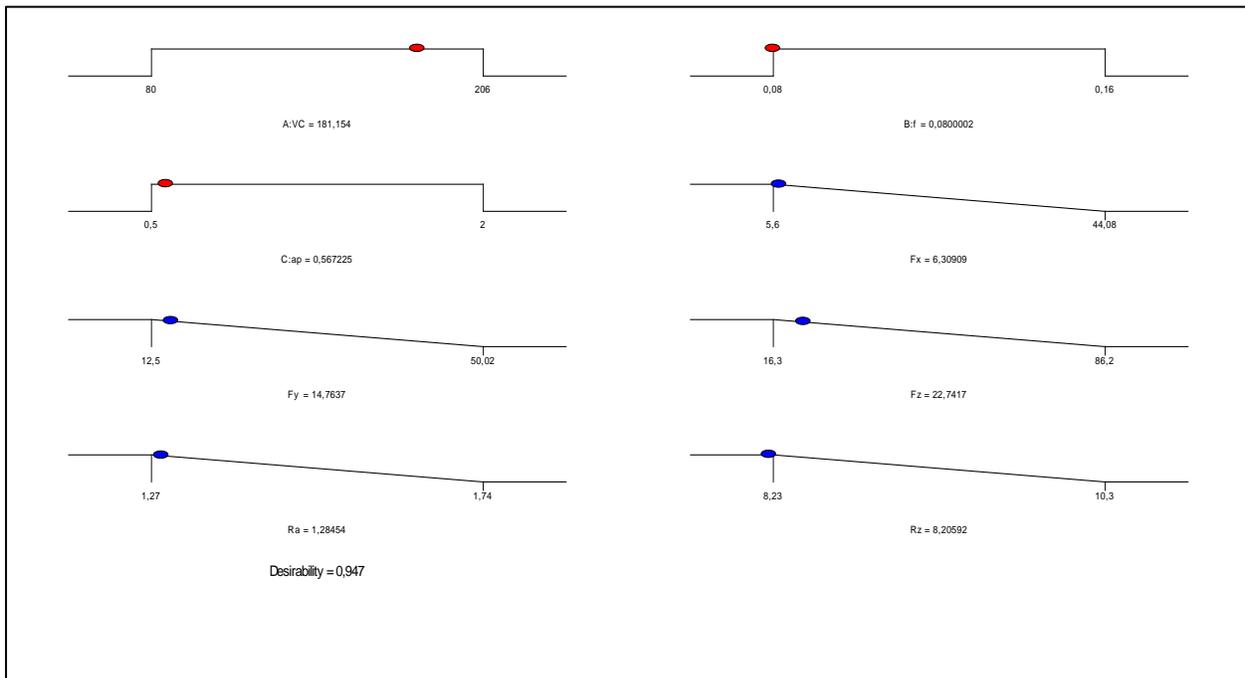


Figure III.30. Graphique de l'optimisation des efforts de coupe.

III.5.3. Optimisation combinée

Dans le cas de l'optimisation combinée, un avantage intéressant consiste à avoir une faible consommation et une bonne qualité de surface en même temps. Les résultats obtenus sont présentés dans le **tableau III.13** et la **figure III.31**.

Tableau III.13. Solutions pour l'optimisation combinée.

N° Solution	Vc	f	ap	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz	Désirabilité
1	187.444	0.08	0.5	6.500	14.823	22.742	1.277	8.230	0.961

La **figure III.31** présentés les graphiques de contour, ils présentent les valeurs optimales des paramètres de coupe telle que : **Ra = 1.277 (µm)**, **Rz=8.230 (µm)**, **Vc = 187.444 (m /min)**, **f = 0,08 (mm /tr)** et **ap = 0.5** et La **figure III.32** présente le graphique des barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses qui confirme les résultats précédentes.

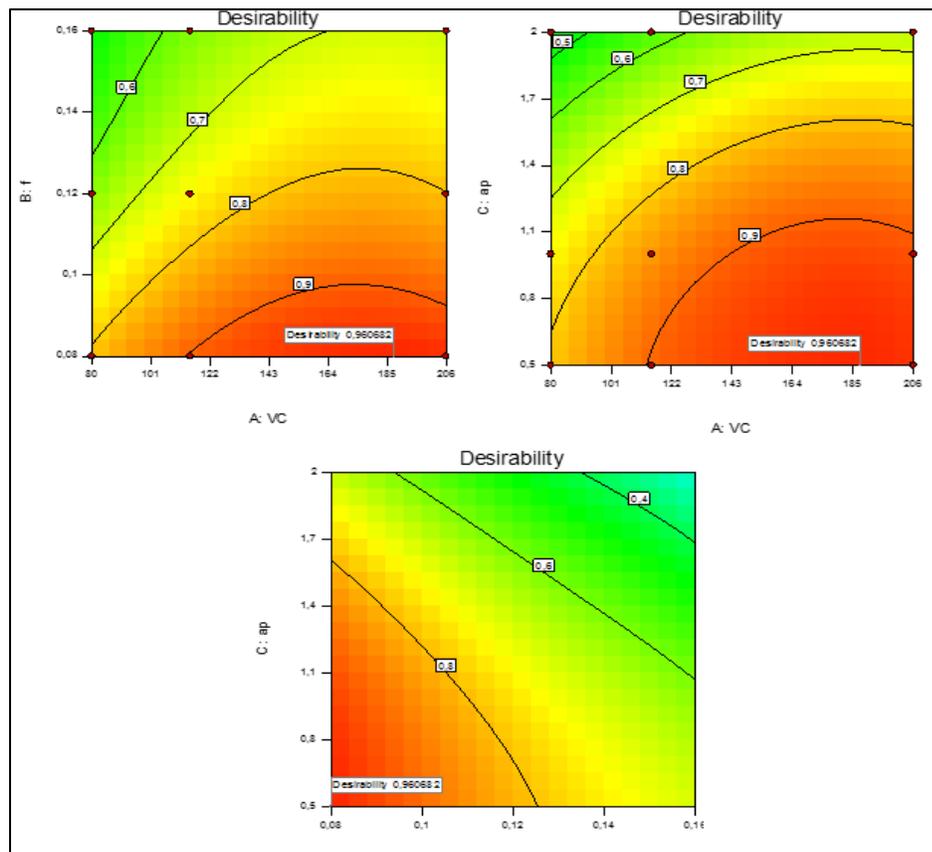


Figure III.31. Graphique de contour de désirabilité.

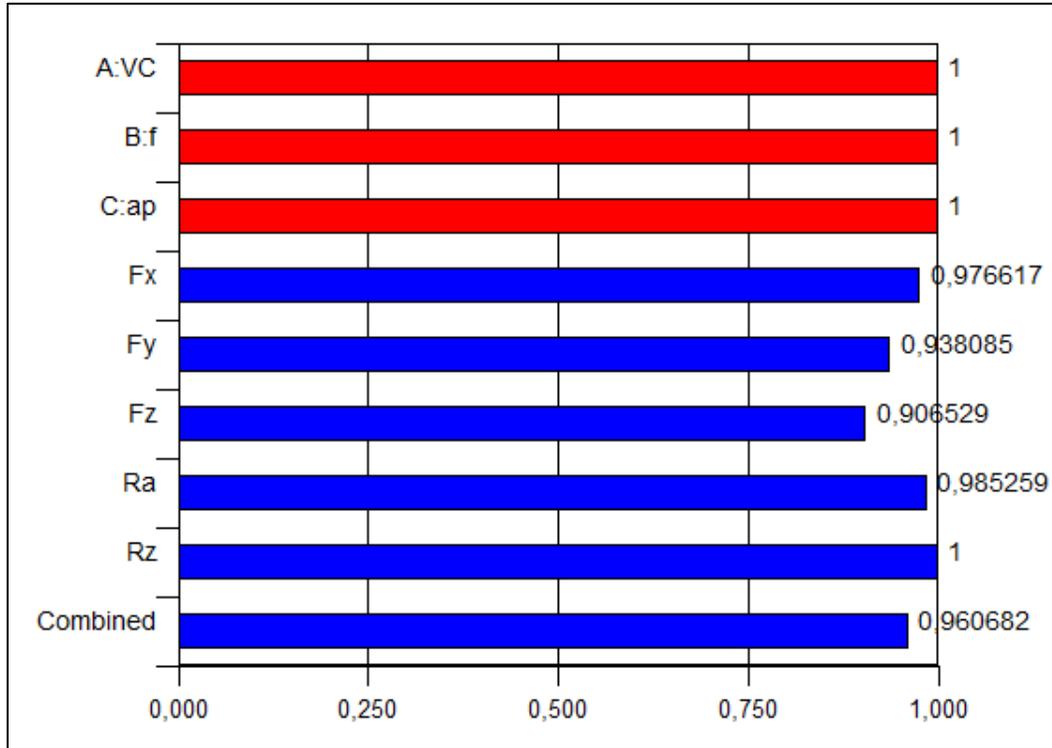


Figure III.32. Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe et des réponses.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons conclu que :

- Les résultats des essais paramétriques montrent que l'effet de l'avance est le plus sensible sur l'état de la surface usinée et la profondeur de passe pour les efforts de coupe. La vitesse de coupe n'a pas d'influence sur les deux derniers. D'autre part, l'augmentation des paramètres d'usinage fait augmenter la puissance de coupe et réduire l'effort spécifique de coupe.
- L'application de l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression en tournage conventionnel du Polyamide PA6.6 GF30 a permis d'obtenir des modèles mathématiques de la rugosité de surface (Ra et Rz), l'efforts de coupe (F_x , F_y et F_z), la puissance de coupe (P_c) et aussi le débit du copeau enlevé (MRR) en fonction des paramètres d'usinage (V_c , f et ap).
- Les modèles trouvés sont exploités pour l'optimisation suivant trois objectifs (minimiser la rugosité de la surface pour la finition, minimiser les efforts de coupe F_x , F_y et F_z pour minimisation de la consommation d'énergie et objectif combiné).

Chapitre IV

*Application des (ANN) pour modéliser les
paramètres de performance lors de l'usinage*

IV.1. Introduction

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est la méthode la plus privilégiée pour l'optimisation jusqu'à présent. Au cours des deux dernières décennies, l'algorithme de réseau neuronal artificiel (ANN) est devenu l'une des méthodes les plus efficaces pour la modélisation et l'optimisation empiriques, en particulier pour les systèmes non linéaires [23]. Aujourd'hui, on retrouve les réseaux de neurones solidement implantés dans diverses industries : dans les milieux financiers pour la prédiction des fluctuations de marché ; dans le domaine bancaire pour la détection de fraudes sur les cartes de crédit et le calcul de cotes de crédit ; en aéronautique pour la programmation de pilotes automatiques ; etc.

Ce chapitre est subdivisé en deux parties. Dans la première partie nous avons utilisé les réseaux de neurones artificiels en se servant des résultats d'un plan d'expérience de 27 essais. La seconde partie pour comparer les modèles obtenus par la méthode RSM pour connaître l'efficacité de la méthode ANN.

IV.2. Réseaux de neurones artificiels

IV.2.1. Définition

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 évidemment un réseau.

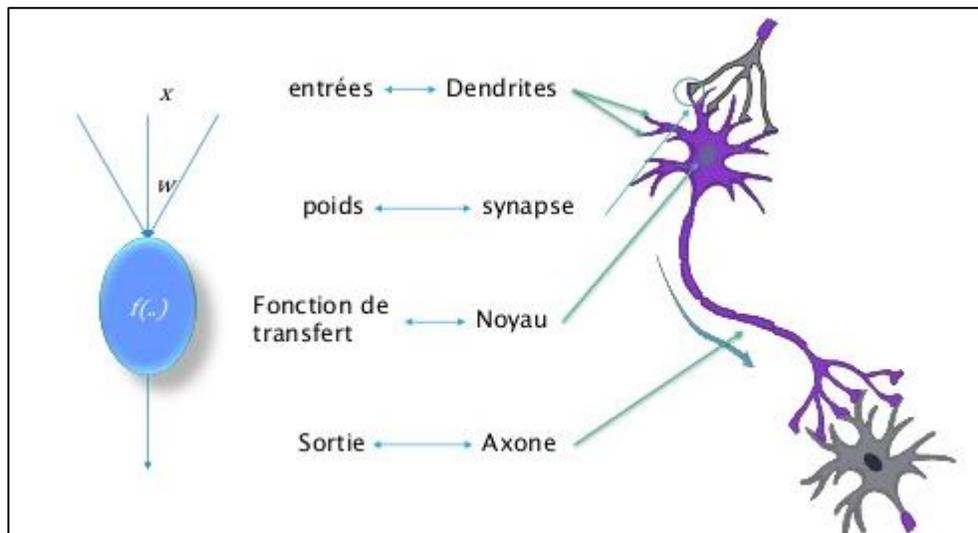


Figure IV.1. Analogie entre neurone formel et neurone biologique.

IV.2.2. Neurone formel

Un "neurone formel" est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie" [21].

Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de logiciel. On a pris l'habitude de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la **figure IV.2**.

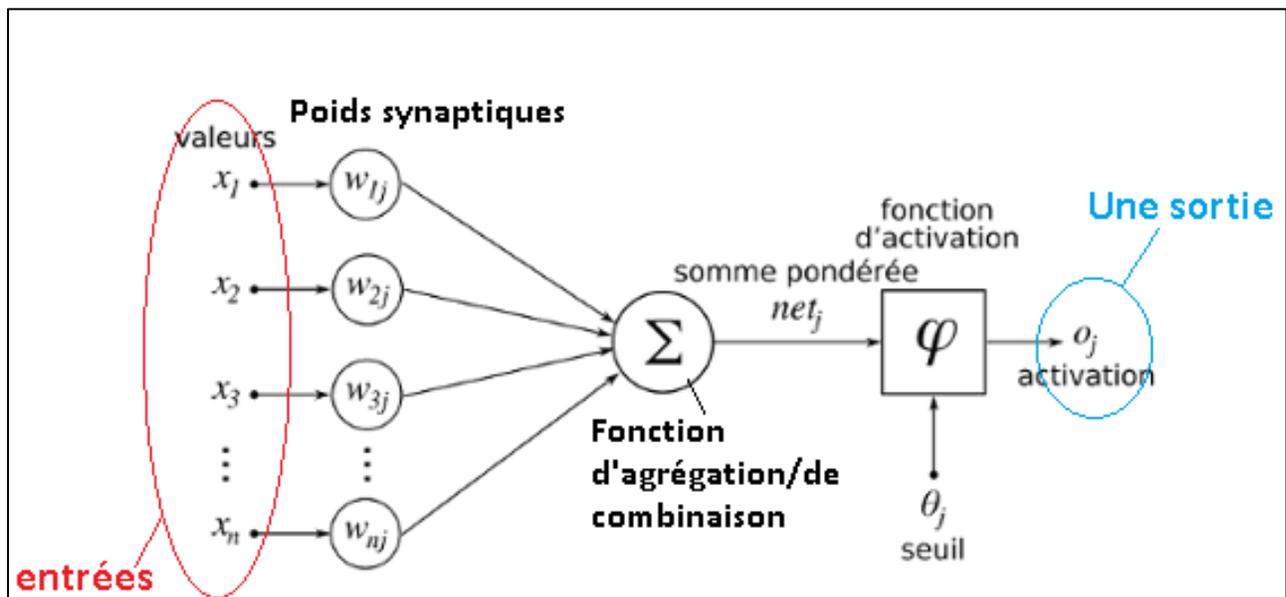


Figure IV.2. Schéma d'un neurone formel [22].

IV.2.3. Fonctions de transfert

Différentes fonctions de transfert pouvant et utilisées comme fonction d'activation du neurone (**Tableau IV.1**) [23].

Tableau IV.1. Fonctions de transfert $a=f(n)$ [23].

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

Les quartes les plus utilisées sont les fonctions «seuil», «linéaire », «sigmoïde» et «tangente hyperbolique».

- A. Seuil $f(x) = 1 [0, +\infty [(x)$,
- B. Linéaire f est la fonction identité,
- C. Sigmoïde $f(x) = 1 / (1 + ex)$,
- D. Tangente hyperbolique $f(x) = (2 / (1 + e^{-2x})) - 1$

Les modèles linéaires et sigmoïdaux sont bien adaptés aux algorithmes d'apprentissage impliquant une rétro-propagation du gradient car leur fonction d'activation est différentiable, ce sont les plus utilisés.

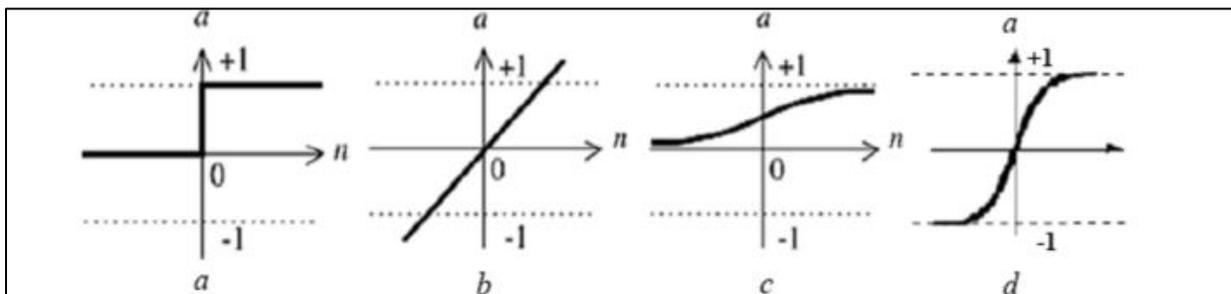


Figure IV.3. Différentes fonction de transfert de réseau de neurones.

IV.2.4. Perceptron

Le perceptron est un algorithme d'apprentissage supervisé de classifieurs binaires. On distingue deux types de perceptron : Perceptron simple et Perceptron multi-couches.

IV.2.4.1. Perceptron simple

Le perceptron simple est le réseau le plus simple qui existe, est caractérisé par :

- Le perceptron est constitué d'un unique neurone qui répond à l'équation proposée plus haut.
- La fonction de transfert est une fonction de seuil ou toutes autres fonctions du même type.
- A la différence avec le modèle de neurone formel est que le neurone peut « apprendre » en utilisant les règles de Hebb/Rosenblatt.

IV.2.4.2. Perceptron multicouches

Un perceptron multicouche (MLP) a la même structure qu'un perceptron monocouche avec une ou plusieurs couches cachées. L'algorithme de rétro-propagation comprend deux phases: la phase avant où les activations sont propagées de la couche d'entrée à la couche de sortie et la phase arrière où l'erreur entre la valeur réelle observée et la valeur nominale demandée dans la couche de sortie est propagée dans l'ordre modifier les poids et les valeurs de biais.

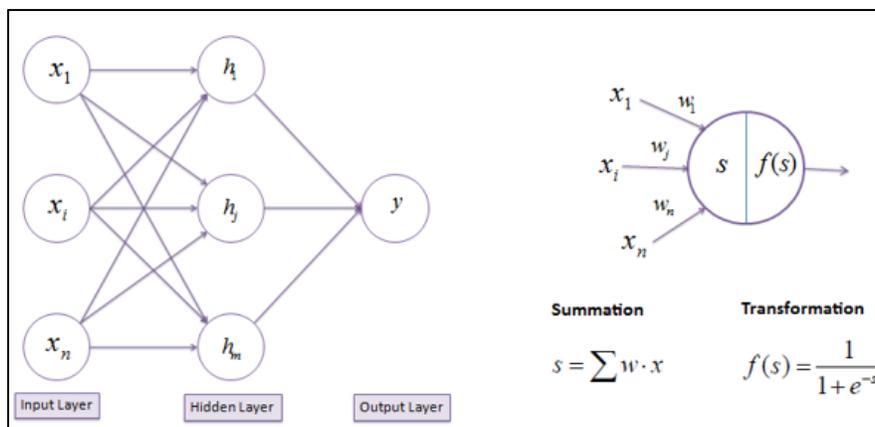


Figure IV.4. Perceptron multi-couches.

IV.2.5. Algorithme de rétro-propagation

La rétro-propagation consiste à rétro-propager l'erreur commise par un neurone à ses synapses et aux neurones qui y sont reliés. Pour les réseaux de neurones, on utilise habituellement la rétro-propagation du gradient de l'erreur, qui consiste à corriger les erreurs selon l'importance des éléments qui ont justement participé à la réalisation de ces erreurs : les poids synaptiques qui contribuent à engendrer une erreur importante se verront modifiés de manière plus significative que les poids qui ont engendré une erreur marginale.

IV.2.6. Apprentissage

Une fois que les poids et les biais du réseau sont aléatoirement initialisés, le réseau est prêt pour l'apprentissage. Ce processus exige un ensemble de données approprié au réseau qui sont les entrées P et les cible C de sorties. Pendant l'apprentissage les poids et les biais du réseau sont itérativement ajustés pour minimiser la fonction de performance. En général, 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 IV.6.**

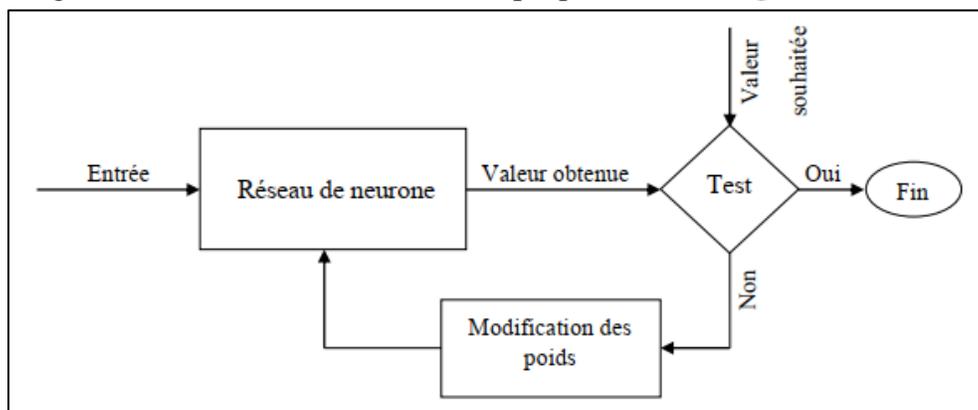


Figure IV.5. Système d'apprentissage du réseau de neurone [24].

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

Afin de modéliser les paramètres de performance des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) et la rugosité de surface (R_a et R_z) lors du tournage du polyamide PA6.6GF30, 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. Avec les données suivantes **tableau IV.2.**

Tableau IV.2. Résultats expérimentaux des paramètres de performance.

N° d'essai	Vc [m/min]	F [mm/ tr]	ap [mm]	Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Ra [µm]	Rz [µm]
1	80	0,08	0,5	10,11	17,69	19,96	1,35	8,50
2	80	0,08	1,0	16,97	22,97	34,40	1,42	8,52
3	80	0,08	2,0	30,82	38,74	47,60	1,47	9,10
4	80	0,12	0,5	19,20	20,80	39,80	1,43	9,65
5	80	0,12	1,0	16,07	27,43	36,64	1,47	9,67
6	80	0,12	2,0	33,80	45,60	55,51	1,67	9,91
7	80	0,16	0,5	21,30	27,70	32,06	1,57	9,75
8	80	0,16	1,0	19,25	30,06	35,41	1,58	9,68
9	80	0,16	2,0	44,08	50,02	86,20	1,74	10,30
10	115	0,08	0,5	7,77	14,45	18,64	1,31	8,33
11	115	0,08	1,0	11,66	21,67	32,86	1,40	8,49
12	115	0,08	2,0	27,60	31,21	43,78	1,45	9,03
13	115	0,12	0,5	11,43	22,20	35,70	1,42	9,30
14	115	0,12	1,0	15,39	23,15	33,46	1,43	9,42
15	115	0,12	2,0	23,74	35,01	50,01	1,56	9,30
16	115	0,16	0,5	13,35	25,00	31,08	1,55	9,10
17	115	0,16	1,0	14,67	27,79	34,32	1,57	9,16
18	115	0,16	2,0	41,03	43,71	80,98	1,72	9,49
19	206	0,08	0,5	5,60	12,50	16,30	1,27	8,23
20	206	0,08	1,0	10,90	19,80	29,96	1,35	8,28
21	206	0,08	2,0	22,08	29,08	35,37	1,36	9,01
22	206	0,12	0,5	6,09	21,98	23,97	1,30	9,24
23	206	0,12	1,0	10,88	20,80	25,97	1,40	9,25
24	206	0,12	2,0	21,00	29,55	44,03	1,52	9,29
25	206	0,16	0,5	10,80	22,30	29,43	1,53	9,09
26	206	0,16	1,0	11,04	23,17	30,32	1,55	9,15
27	206	0,16	2	39,93	40,48	74,3	1,69	9,25

IV.3.1. Modélisation de l'effort axiale (F_x) 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 de coupe (F_x). 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 **3-6-1 (Figure IV.6)**. Elle est composée de trois nœuds dans la

couche d'entrée, six 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.

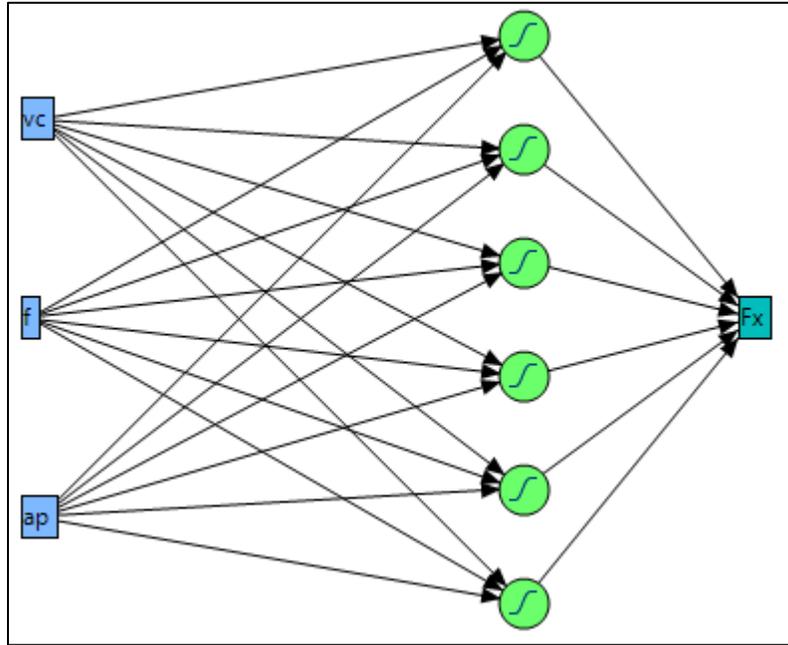


Figure IV.6. Architecture neurale choisie pour l'effort (F_x).

Les équations des sorties de chaque neurone de la couche cachée (de $H1$ à $H6$) de l'effort de coupe (F_x) sont données par les équations (IV.1).

$$\begin{aligned}
 H1 &= \tanh (0.5 \times (-0.0017 \times V_c + 10.1743 \times f - 0.1384 \times a_p - 0.9354)); \\
 H2 &= \tanh (0.5 \times (0.0009 \times V_c + 8.6450 \times f + 0.3152 \times a_p - 1.48020)); \\
 H3 &= \tanh (0.5 \times (-0.0005 \times V_c + 1.9290 \times f - 0.8018 \times a_p + 0.9623)); \\
 H4 &= \tanh (0.5 \times (0.000064 \times V_c - 0.3824 \times f - 0.0150 \times a_p + 0.058)); \\
 H5 &= \tanh (0.5 \times (0.0003 \times V_c + 7.2077 \times f + 0.0508 \times a_p - 0.9920)); \\
 H6 &= \tanh (0.5 \times (-0.00730 \times V_c + 2 \times f + 0.25210 \times a_p + 0.674900));
 \end{aligned}
 \tag{IV.1}$$

La somme des sorties des 6 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle mathématique de l'effort de coupe (F_x) indiqué dans l'équation (IV.2).

$$F_x = 331.0193 \times H1 - 1549.0181 \times H2 - 554.9221 \times H3 - 7380.5644 \times H4 + 1207.9312 \times H5 - 237.5933 \times H6 + 182.2312.
 \tag{IV.2}$$

Le tableau IV.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 (0,9848 et 0,9685) et les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (1.0824 et 2.3692), ce qui nous donne un coefficient de détermination globale $R^2 = 97.66\%$.

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

	Apprentissage	Validation
R^2	0.9848	0.9685
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	1.0824	2.3692
Somme fréquences	18	9

La figure IV.7 illustre le tracé des valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondantes pour l'effort de coupe (F_x). 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.

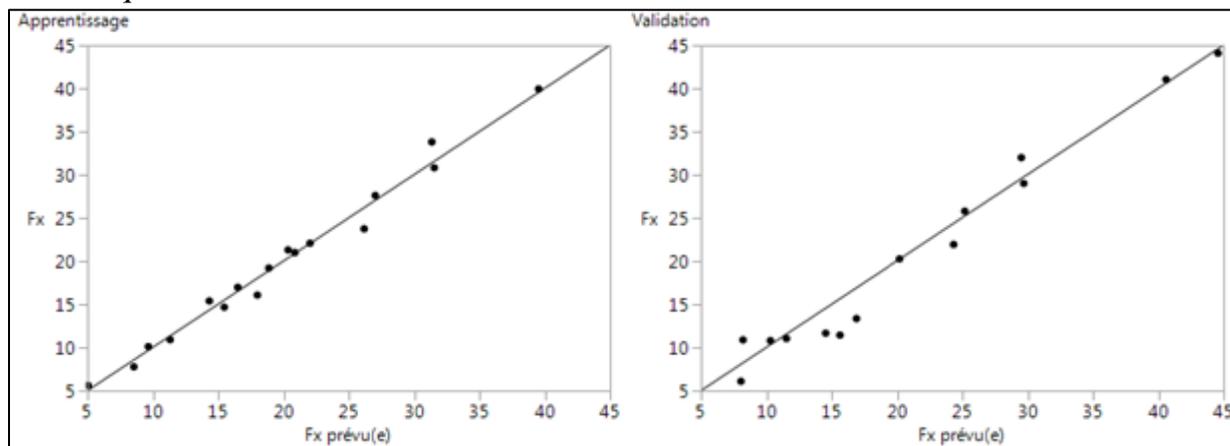


Figure IV.7. Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour (F_x).

IV.3.2. Modélisation de l'effort radial (F_y) par ANN

Les mêmes étapes pour l'application de l'approche des ANN sont considérées pour le modèle de l'effort de coupe (F_y). 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 **3-6-1 (Figure IV.8)**. Elle est composée de trois nœuds dans la

couche d'entrée, six 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.

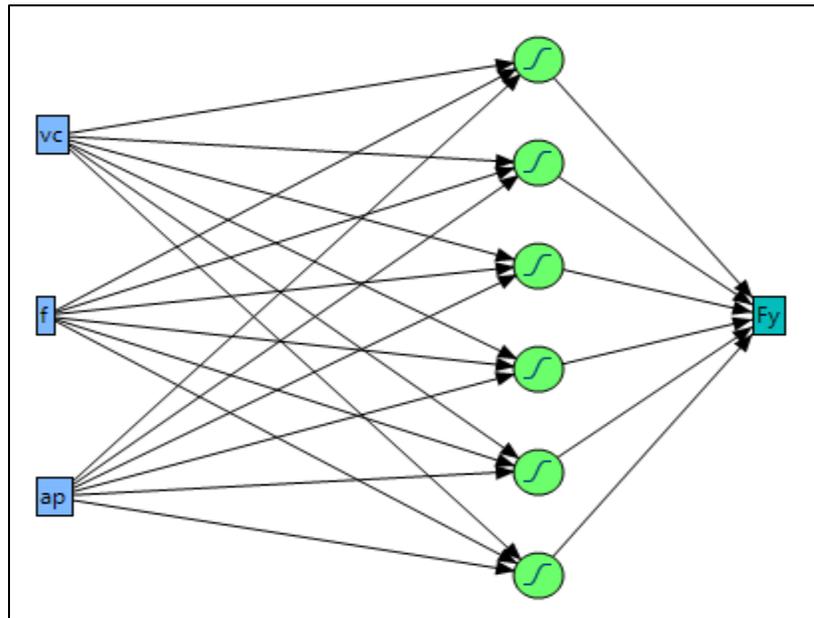


Figure IV.8. Architecture neurale choisie pour l'effort (F_y).

Les équations des sorties de chaque neurone de la couche cachée (de $H1$ à $H6$) de l'effort de coupe (F_y) sont données par les équations (IV.3).

$$\begin{aligned}
 H1 &= \tanh (0.5 \times (-0.086 \times V_c + 126.3446 \times f + 5.275 \times a_p - 7.2493)); \\
 H2 &= \tanh (0.5 \times (0.08093 \times V_c - 303.587 \times f + 7.3189 \times a_p + 14.28)); \\
 H3 &= \tanh (0.5 \times (-0.029 \times V_c - 25.4093 \times f + 1.7953 \times a_p + 5.1417)); \\
 H4 &= \tanh (0.5 \times (-0.0073 \times V_c - 8.3707 \times f - 1.9712 \times a_p + 5.4374)); \\
 H5 &= \tanh (0.5 \times (-0.0046 \times V_c - 18.3406 \times f + 10.875 \times a_p - 8.9819)); \\
 H6 &= \tanh (0.5 \times (-0.0099 \times V_c + 0.2709 \times f + 0.3524 \times a_p - 0.1565));
 \end{aligned}
 \tag{IV.3}$$

La somme des sorties des 6 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle mathématique de l'effort de coupe (F_y) indiqué dans l'équation (IV.4).

$$F_y = -3.7096 \times H1 - 4.1620 \times H2 - 11.4576 \times H3 + 0.75093 \times H4 + 10.7325 \times H5 + 47.9950 \times H6 + 52.3513
 \tag{IV.4}$$

Le tableau (IV.4.) 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 (0.9954 et 0.9989) et les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (0.6064 et 0.3301), ce qui nous donne un coefficient de détermination globale $R^2 = 99.71\%$.

Tableau IV.4. Conditions de la modélisation de l'effort de coupe (F_y) par les ANN.

	Apprentissage	Validation
R^2	0.9954	0.9989
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.6064	0.3301
Somme fréquences	22	5

La figure IV.9. Illustre le tracé des valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondantes pour l'effort de coupe (F_y). 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.

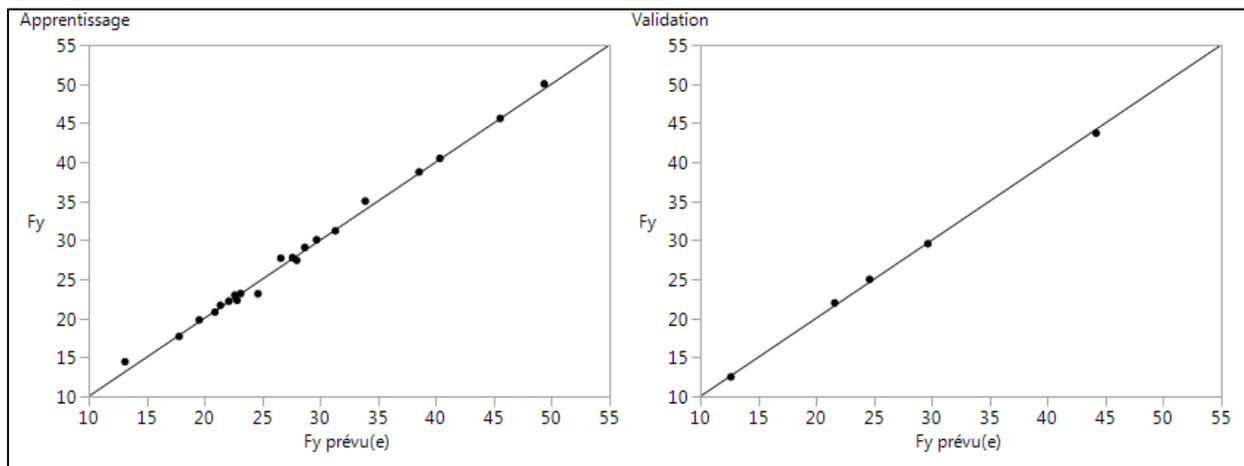


Figure IV.9. Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour (F_y).

IV.3.3. Modélisation de l'effort tangentiel de coupe (F_z) 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 (F_z). 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 **3-3-1** (Figure V.10). Elle est composée de trois nœuds dans la couche d'entrée, trois 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.

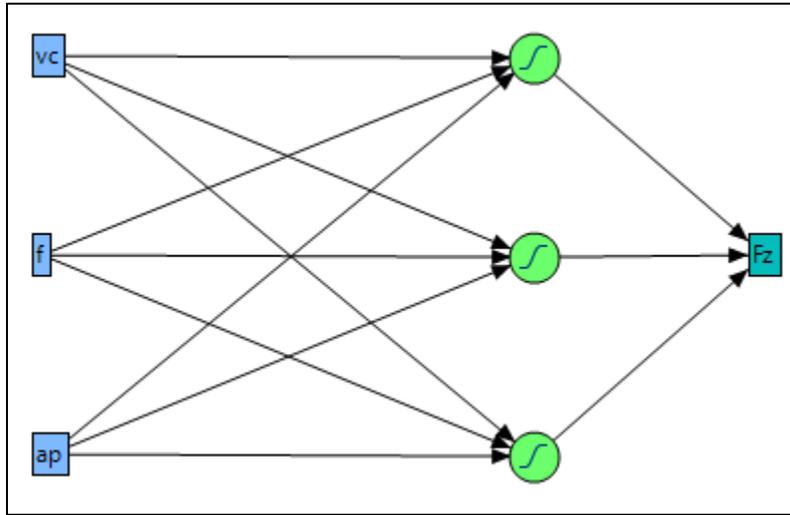


Figure IV.10. Architecture neurale choisie pour l'effort (F_z).

Les équations des sorties de chaque neurone de la couche cachée (de $H1$ à $H3$) de l'effort de coupe (F_z) sont données par les équations (IV.5).

$$\left. \begin{aligned} H1 &= \tanh (0.5 \times (-0.01732 \times V_c + 523.6876 \times f - 3.2402 \times a_p - 59.0007)); \\ H2 &= \tanh (0.5 \times (-0.0025 \times V_c + 257.8360 \times f + 18.2224 \times a_p - 49.7693)); \\ H3 &= \tanh (0.5 \times (0.001700 \times V_c - 4.16630 \times f - 1.1152 \times a_p + 2.786300)); \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.5})$$

La somme des sorties des 3 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 (IV.6).

$$F_z = 11.2698 \times H1 - 15.6909 \times H2 - 97.3132 \times H3 + 91.1638 \quad (\text{IV.6})$$

Le tableau (IV.5) 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 (0.9982 et 0.99943) et les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (0.7565 et 0.8605), ce qui nous donne un coefficient de détermination globale $R^2 = 99,62\%$.

Tableau IV.5. Conditions de la modélisation de l'effort tangentiel de coupe (F_z) par les ANN.

	Apprentissage	Validation
R^2	0.9982	0.9943
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.7565	0.8605
Somme fréquences	22	5

La figure IV.11. Illustre le tracé des valeurs expérimentales en fonction de leurs valeurs prédites correspondantes pour l'effort tangentiel de coupe (F_z). 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.

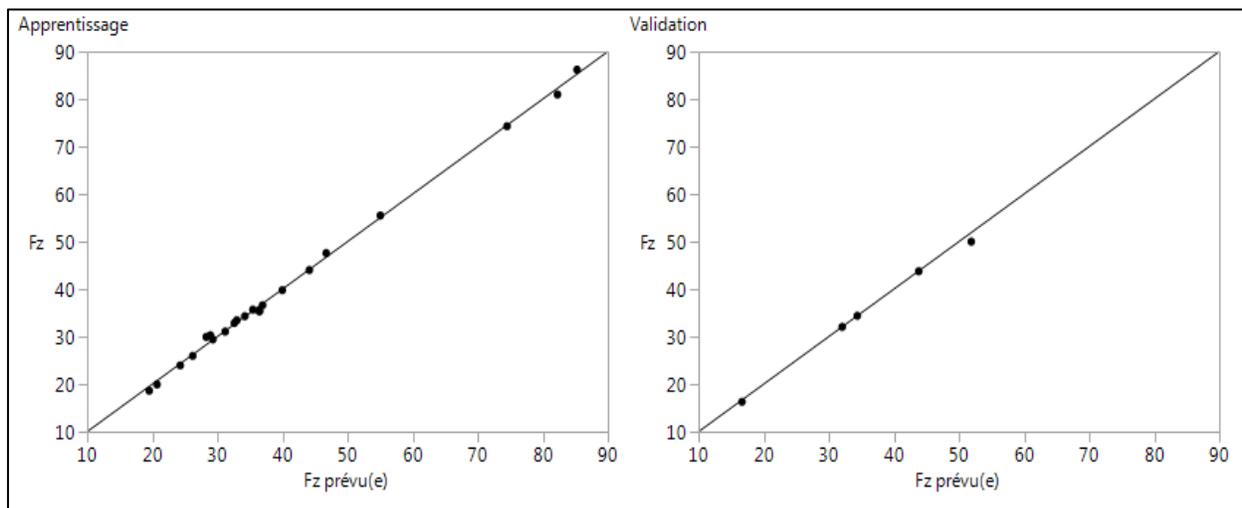


Figure IV.11. Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour l'effort de coupe (F_z).

IV.3.4. Modélisation de la rugosité de surface (Ra) par un réseau de neurones artificiel

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 **3-7-1** (Figure IV.12). Elle est composée de trois nœuds dans la couche d'entrée, ce qui correspond au nombre de paramètres de coupe (V_c , f et a_p), 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.

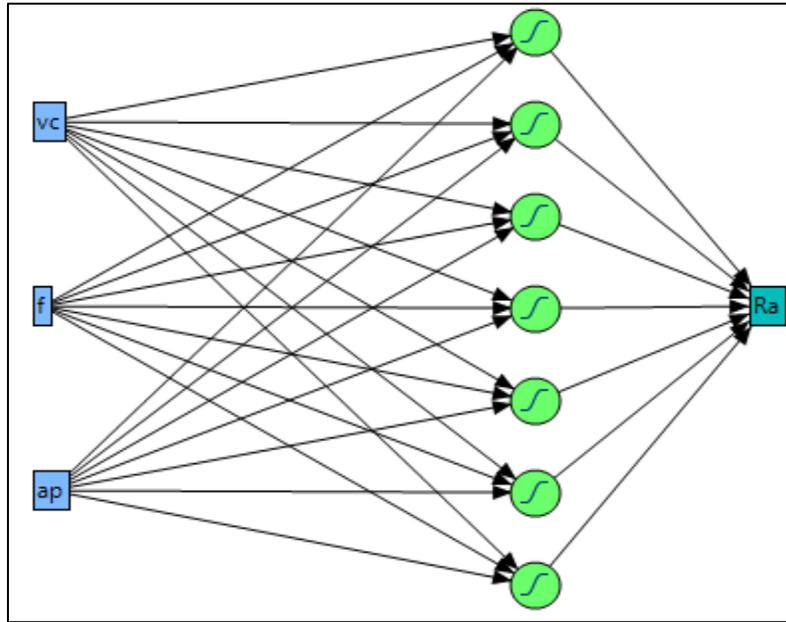


Figure IV.12. Architecture neurale choisie pour la rugosité (Ra).

Les équations ci-dessous (IV.7) de $H1$ à $H7$ sont obtenues par la méthode des réseaux de neurones artificiels. Ils présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée.

$$\begin{aligned}
 H1 &= \tanh (0.5 \times (-0.0140 \times Vc + 35.0734 \times f - 3.1402 \times ap + 1.4167)); \\
 H2 &= \tanh (0.5 \times (-0.00007 \times Vc + 54.2935 \times f + 1.9871 \times ap - 7.730)); \\
 H3 &= \tanh (0.5 \times (-0.0179 \times Vc + 33.1264 \times f - 1.6886 \times ap + 0.2003)); \\
 H4 &= \tanh (0.5 \times (0.02408 \times Vc + 17.6391 \times f + 0.9587 \times ap - 6.5698)); \\
 H5 &= \tanh (0.5 \times (0.0004 \times Vc - 58.5152 \times f - 1.08680 \times ap + 8.5477)); \\
 H6 &= \tanh (0.5 \times (0.0117 \times Vc + 12.5369 \times f + 0.0070 \times ap - 5.44830)); \\
 H7 &= \tanh (0.5 \times (-0.0181 \times Vc + 26.6493 \times f - 1.8942 \times ap + 0.7536));
 \end{aligned}
 \tag{IV.7}$$

La somme des sorties des 7 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 (IV.8).

$$Ra = -0.2491 \times H1 - 0.018 \times H2 + 0.3717 \times H3 - 0.1180 \times H4 - 0.1233 \times H5 + 0.4094 \times H6 - 0.1497 \times H7 + 1.8188
 \tag{IV.8}$$

Le tableau IV.6 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 (0.9952 et 0.9951) et les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (0.0086 et 0.0088) ce qui nous donne un coefficient de détermination globale $R^2 = 99.51\%$. Ces résultats prouvent que le modèle neuronal explique très bien la variation de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe.

Tableau IV.6. Conditions de la modélisation de la rugosité de surface (Ra) par les ANN.

	Apprentissage	Validation
R^2	0.9952	0.9951
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.0086	0.0088
Somme fréquences	22	5

La figure IV.13 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.

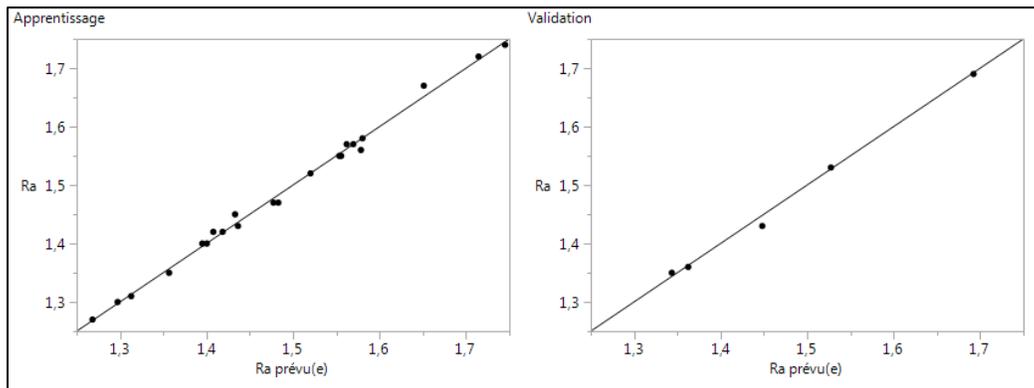


Figure IV.13. Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra).

IV.3.5. Modélisation de la rugosité de surface (Rz) par ANN

Dans notre cas nous avons adopté la structure **3-7-1** (**Figure IV.14**). Elle est composée de trois nœuds dans la couche d'entrée, ce qui correspond au nombre de paramètres de coupe (Vc , f et ap), 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.

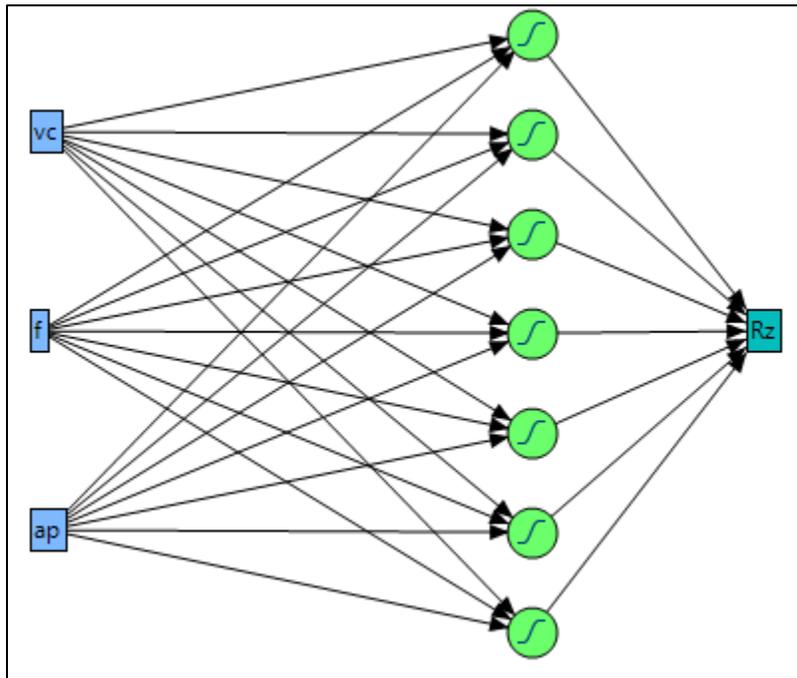


Figure IV.14. Architecture neurale choisie pour la rugosité (R_z).

Les équations ci-dessous (IV.9) de $H1$ à $H7$ sont obtenues par la méthode des réseaux de neurones artificiels. Ils présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée.

$$\begin{aligned}
 H1 &= \tanh (0.5 \times (-0.0224 \times V_c + 17.617 \times f + 0.2245 \times a_p + 0.2225)); \\
 H2 &= \tanh (0.5 \times (-0.0310 \times V_c + 31.8309 \times f + 0.4333 \times a_p - 0.116)); \\
 H3 &= \tanh (0.5 \times (0.0215 \times V_c - 13.6991 \times f - 0.5721 \times a_p + 0.3536)); \\
 H4 &= \tanh (0.5 \times (0.0096 \times V_c + 111.0072 \times f + 2.0093 \times a_p - 16.25)); \\
 H5 &= \tanh (0.5 \times (-0.036 \times V_c + 23.0658 \times f + 2.2294 \times a_p - 1.8836)); \\
 H6 &= \tanh (0.5 \times (0.0019 \times V_c + 61.9074 \times f + 1.2287 \times a_p - 7.7723)); \\
 H7 &= \tanh (0.5 \times (0.0042 \times V_c + 17.560 \times f + 1.60860 \times a_p - 2.4986));
 \end{aligned}
 \quad (IV.9)$$

Transfert linéaire nous donne le modèle mathématique de la rugosité de surface (R_z) donné par l'équation (IV.10).

$$R_z = - 3.9757 \times H1 - 0.2252 \times H2 - 6.7816 \times H3 - 0.6352 \times H4 - 1.2727 \times H5 + 1.8424 \times H6 - 1.1410 \times H7 + 10.5592 \quad (\text{IV.10})$$

Le tableau (IV.7) 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 (0.9949 et 0.9999) et les racines de l'erreur quadratique moyenne sont respectivement (0.0362 et 0.0014) ce qui nous donne un coefficient de détermination globale $R^2 = 99.74\%$. Ces résultats prouvent que le modèle neuronal explique très bien la variation de la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe.

Tableau IV.7. Conditions de la modélisation de la rugosité de surface (*Ra*) par les ANN

	Apprentissage	Validation
R^2	0.9949	0.9999
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.0362	0.0014
Somme fréquences	22	5

La figure IV.15. 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.

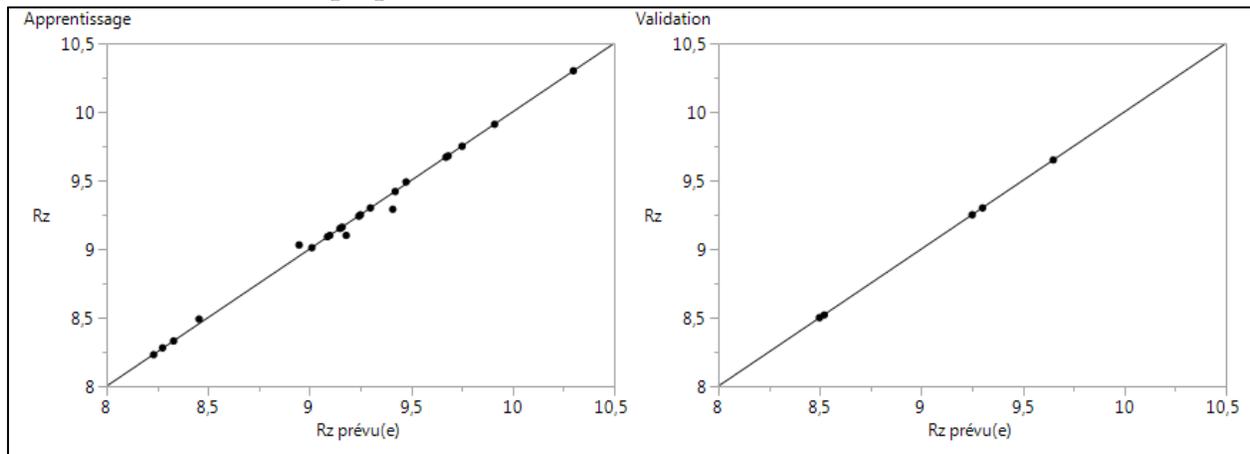


Figure IV.15. Comparaison des valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (R_z).

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

Le tableau (IV.8) résume les résultats trouvés des coefficients de détermination R^2 des modèles de la rugosité de surface (R_a et R_z) et de l'efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) 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 paramètres étudiés (R_a , R_z , F_x , F_y et F_z). 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, ce qui prouve la robustesse et la fiabilité de la méthode des ANN.

Tableau IV.8. Coefficients de corrélation pour RSM et ANN.

	Coefficient de détermination R^2 (%)	
	RSM	ANN
$F_x ; (N)$	92.78	97.66
$F_y ; (N)$	95.91	99.71
$F_z ; (N)$	98.97	99.62
$R_a ; (\mu m)$	95.96	99.51
$R_z ; (\mu m)$	91.41	99.74

Les valeurs expérimentales et prédites obtenues par les modèles RSM et ANN de la rugosité de surface (R_a et R_z) et de les efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) sont présentées dans la figure IV.16 (a et b) et la figure IV.17 (a, b et c). On remarque que la courbe du modèle obtenu par RSM de la rugosité de surface (R_a et R_z) 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 les efforts de coupe (F_x , F_y et F_z), 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.

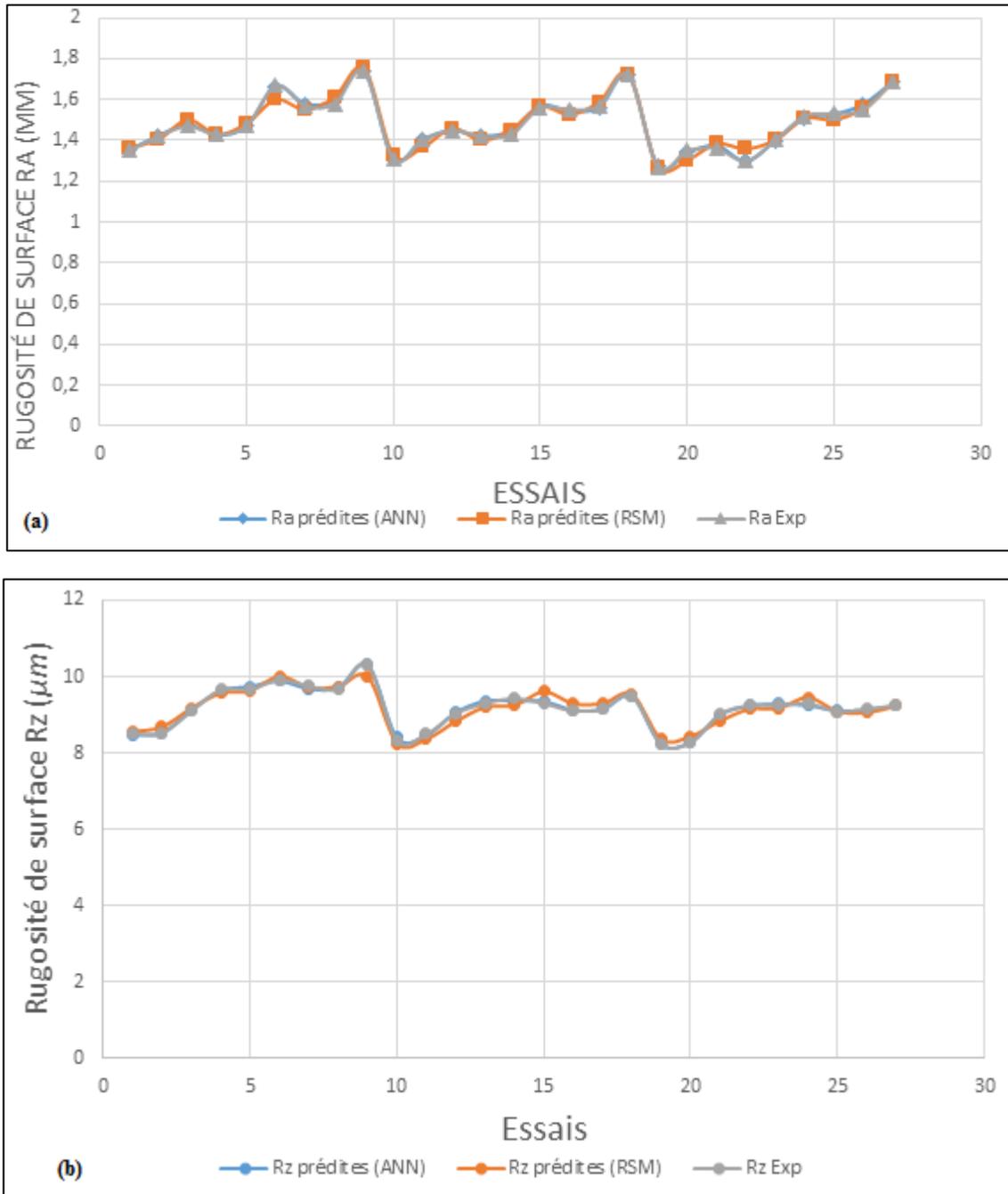
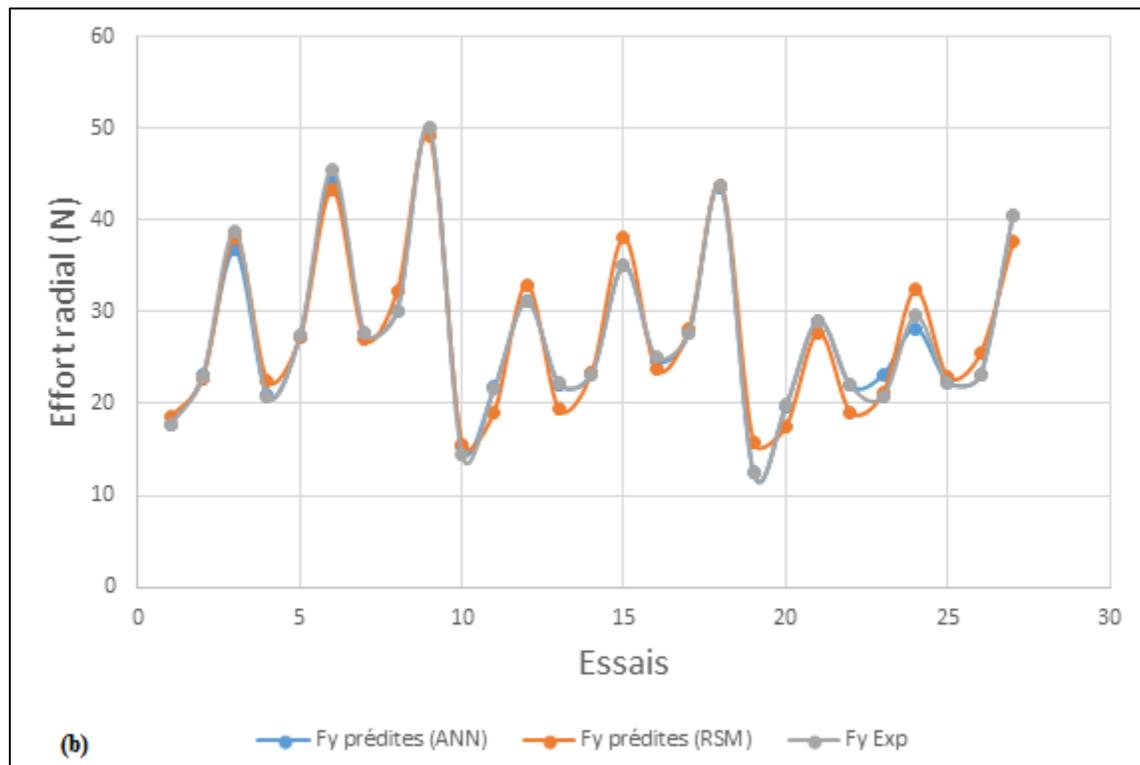
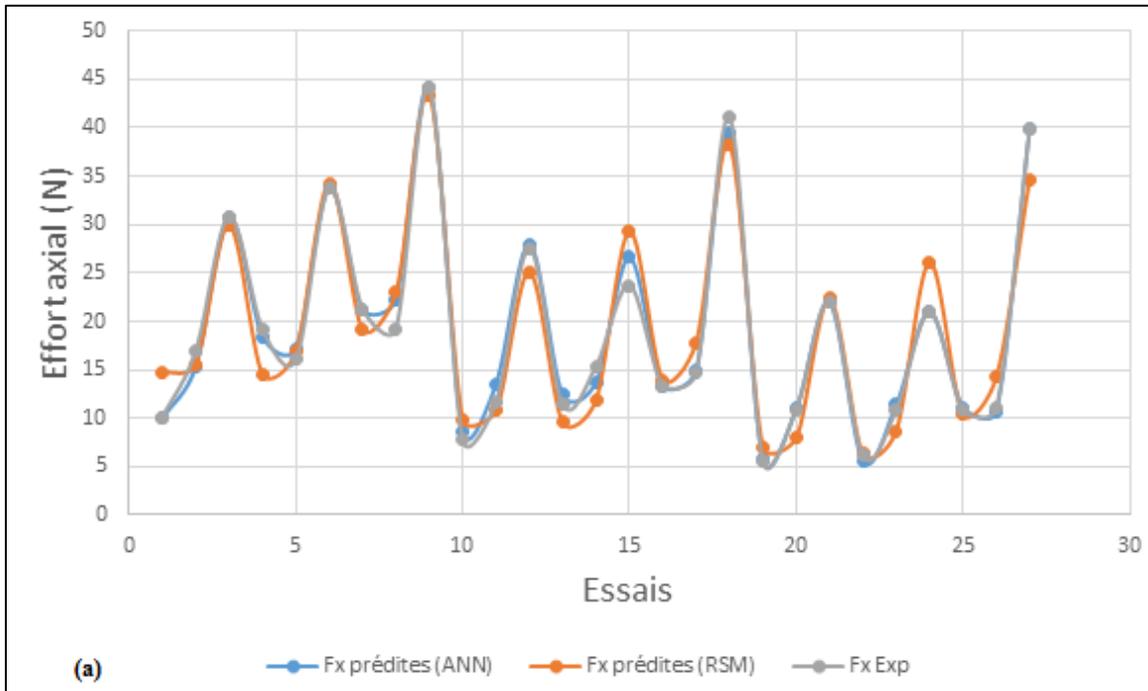


Figure IV.16. Comparaison entre les valeurs expérimentales, prédites par RSM et ANN : a) Rugosité de surface (Ra), b) Rugosité de surface (Rz).



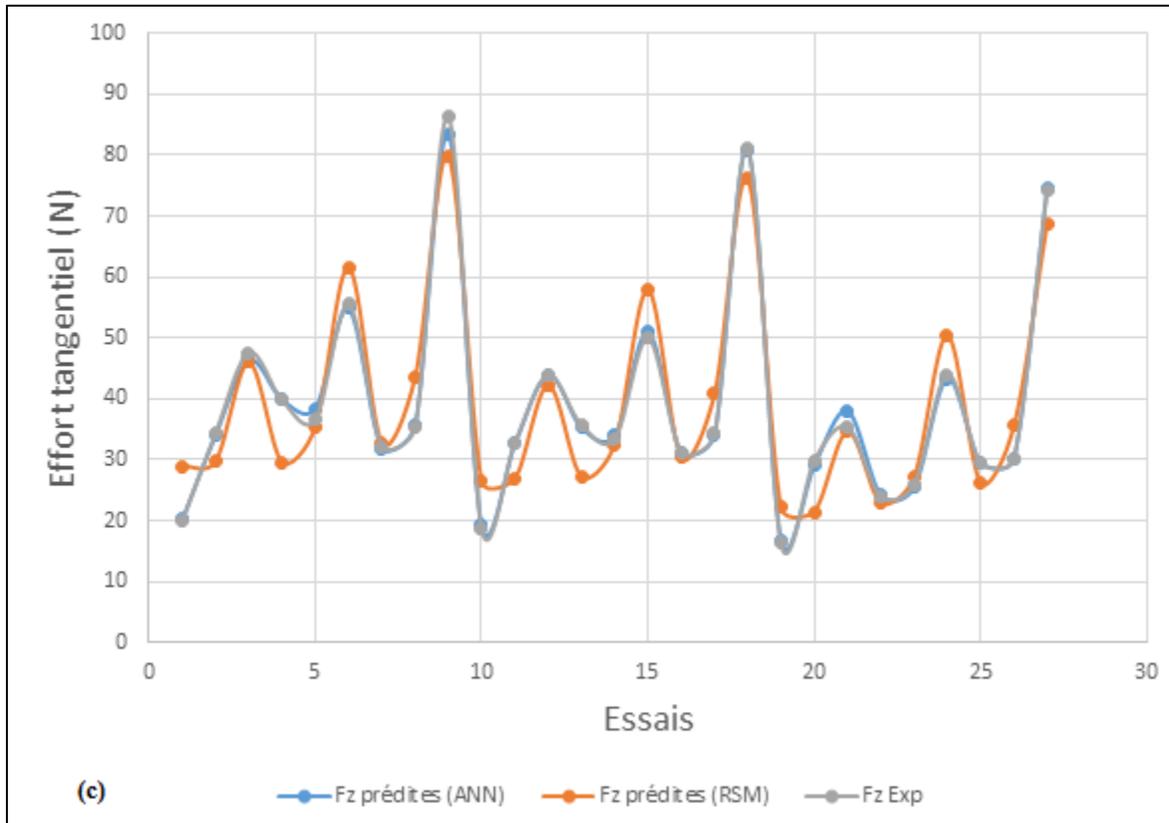


Figure IV.17. Comparaison entre les valeurs expérimentales, prédites par RSM et ANN : a) Effort axial (F_x), b) Effort radial (F_y) et c) Effort tangentiel (F_z).

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la technique des ANN pour développer des modèles de prédiction des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) et de la rugosité de surface (R_a et R_z). Ensuite, nous avons comparé les résultats trouvés des coefficients de détermination R^2 des modèles obtenus par la méthode de la surface de réponse (RSM) et les réseaux neuronaux artificiels (ANN). On a trouvé que la technique des ANN donner des résultats très satisfaisants par rapport la méthode de RSM. On a trouvé aussi que les résultats dépendent de la structure du réseau selon le nombre des couches et des nœuds. Alors donc, les modèles obtenus par les ANN représentent bien la relation non linéaire entre les réponses étudiées et les paramètres d'usinage.

Conclusion générale

L'étude expérimentale et de modélisation lors du tournage du polyamide renforcé par 30% des fibres de verre (PA6.6GF30) en utilisant un outil en carbure cémenté, nous a permis d'étudier l'usinage 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. Aussi, nous avons fait une modélisation et une optimisation des conditions de coupe. Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

1- Les résultats des essais paramétriques 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 80 à 230 m/min fait diminuer les différents critères de rugosité (R_a , R_q , R_z et R_t) respectivement de 28,47 % ; 44,04 % et 9,80 %.
- ✚ La profondeur de passe (a_p) intervient d'une manière plus significative que la vitesse de coupe. Sur le plan pratique, on peut dire que l'augmentation de (a_p) de 0,5 à 2 mm fait augmenter les critères R_a , R_z et R_q de 13,72% ; 3,31% et 18,63% respectivement.
- ✚ Par contre, l'état de surface se détériore avec l'augmentation de l'avance. Une augmentation de l'avance de 0,08 à 0,20 (mm/tr) induit une augmentation des critères de rugosité R_a , R_z et R_q de 46,98% ; 43,06% et 31,01% respectivement. On peut dire que l'effet de l'avance (f) est le plus important sur l'état de la surface usinée du polymère PA6.6GF30.
- ✚ L'accroissement de la vitesse de coupe (V_c) de 80 à 230 (m/min) fait diminuer les trois composantes (F_x , F_y et F_z) respectivement de 23,89% ; 23,63% et 29,94%.
- ✚ Lorsque la profondeur de passe (a_p) augmente de 0,5 à 2 mm, les trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) augmentent de 43,36% ; 25,58% et 43,09% respectivement. Nous avons remarqué aussi que 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 0,20 (mm/tr) conduit à une élévation des composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) de (31,69%, 47,39% et 30,06%) 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.
- ✚ 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 (29,94%), ce qui est bien pour l'arête de coupe de l'outil.

- ✚ L'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,20 (mm/tr) implique une diminution de l'effort spécifique de coupe de 42,80%, ce qui est bien pour l'arête de coupe de l'outil, mais élève aussi la rugosité de surface du PA6.6GF30. 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 2 (mm) conduit à une diminution de l'effort spécifique de coupe de 60.70%, cela est profitable à l'arête tranchante de l'outil de coupe.
- ✚ A propos de la puissance de coupe, nous avons remarqué qu'une augmentation des différents paramètres de coupe (V_c , f et a_p) conduit à une augmentation de la puissance de coupe (P_c).

2- les résultats de la méthodologie de surface de réponse montrent que :

- ✚ L'analyse de la variance (ANOVA) des rugosités de surfaces montre que la vitesse d'avance f est le facteur le plus dominant sur la rugosité de surface et elle représente une contribution de $R_a = 57,92\%$, $R_z = 44,99\%$.
- ✚ L'analyse de variance (ANOVA) des composantes des efforts de coupe, la puissance de coupe et le débit de copeau MMR indiquent que la profondeur de passe (a_p) reste le facteur qui influe énormément sur les différentes composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z , P_c , MRR), sa contribution 66.37% pour F_x , 66.72% pour F_y , 46.89% pour F_z , 36.81% pour P_c et 48.07% pour MMR.
- ✚ La comparaison entre les valeurs expérimentales des rugosités et les efforts de coupe avec les valeurs estimées montre qu'ils sont très proches. Donc on peut conclure que les modèles issus de la méthode de surface de réponse (RSM) donnent des très bons résultats.
- ✚ Pour l'optimisation de la qualité on a minimisé la rugosité de la surface R_a et R_z , les valeurs des paramètres de coupe optimaux se révèlent comme suit : $V_c = 187.448$ m / min, $f = 0.08$ mm / tr et $a_p = 0.5$ mm. La rugosité de surface optimisée et le débit du copeau enlevé sont les suivants ($R_a = 1.277 \mu\text{m}$, $R_z = 8.230 \mu\text{m}$) avec une désirabilité = 0,917.
- ✚ Pour l'optimisation de la consommation d'énergie, on a minimisé les efforts de coupe F_x , F_y et F_z , les valeurs des paramètres de coupe optimaux se révèlent comme suit : $V_c = 187.444$ m / min, $f = 0.08$ mm / tr, $a_p = 0.5$ mm, $F_x = 6.50$ N, $F_y = 14.823$, $F_z = 22.742$, $R_a = 1.277 \mu\text{m}$ et $R_z = 8.230 \mu\text{m}$ avec une désirabilité = 0,961.

✚ Pour l'objectif combiné, les valeurs optimales des paramètres de coupe telle que :
Ra = 1.277 (μm), Rz=8.230 (μm), Vc = 187.444 (m /min), f = 0,08 (mm /tr), ap =
0.5, Fx= 6.5 N, Fy= 14.823 N et Fz= 22.742 N avec une désirabilité = 0,961.

9- La méthode de réseau de neurones artificiel donne un coefficient de corrélation très proche à (1). La comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimées par les modèles RSM et ANN montrent clairement que les modèles issus par la méthode des réseaux de neurones donnent des résultats excellents, (R^2 pour Ra= 99,51%, Rz= 99,74%, Fx= 97.66%, Fy= 99.71% et Fz = 99.62%) par rapport aux modèles issus par la méthodologie de surface de réponse (R^2 pour Ra= 95.96%, Rz= 92.41%, Fx = 92.78%, Fy= 95.91% et Fz = 98.97%).

Références bibliographiques

- [1] **Chabbi, A.** (2018). Modélisation et optimisation des paramètres d'usinage lors du tournage du polyacétal POM. Thèse de doctorat en Mécanique, université Guelma.
- [2] **Roumesy, B.** (1975). Détermination des lois d'usures des outils de Couples.
- [3] **Azwan, I. A.** (2013). Chip formation studies in machining fibre reinforced polymer composites. Article, International Journal of Materials and Product Technology.
- [4] **Selaimia, M.** (2008). Etude des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage du PE80. Licence C.F.A.O, Université 08 Mai 1945 Guelma.
- [5] **STS IPM.** (2009). Étude des produits et des outillages.
- [6] **Habak, M.** (2006). Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6. Thèse de doctorat en Mécanique, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. ParisTech.
- [7] **Berthelot, J. M.** (2010). Mécanique des matériaux et structure composites. Livre, ISMANS, 24-48,
- [8] **MICHAUD CHAILLY.** (2015). Plastiques techniques. Edition CGV-9.2,
- [9] **Davim, J. P., & Mata, F.** (2007). A comparative evaluation of the turning of reinforced and unreinforced polyamide. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33(9-10), 911-914.
- [10] **Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Mata, F., & Davim, J. P.** (2010). Modeling and analysis of machinability characteristics in PA6 and PA66 GF30 polyamides through artificial neural network. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 23(3), 313-336.

- [11] **Silva, L. R., & Davim, J. P.** (2009). The effect of tool geometry on the machinability of polyamide during precision turning. *Journal of composite materials*, 43(23), 2793-2803.
- [12] **Mata, F., & Davim, J. P.** (2009). Performance of diamond coated tools (CVD) in machining polyamides. *International Journal of Materials and Product Technology*, 37(1-2), 188-198.
- [13] **MOȚOI-CRISTESCU, E. M.** Studies Regarding the Influence of the Improving Elements Upon the Roughness of the Surface Processed of Polyamides.
- [14] **Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Silva, L. R., Abrão, A. M., & Davim, J. P.** (2009). Machinability study in microturning of PA66 GF30 polyamide with a PCD tool. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(12), 1290-1296.
- [15] **Hussain, S. A., Pandurangadu, V., & Palanikumar, K.** (2010). Surface roughness analysis in machining of GFRP composite by carbide tool (K20). *European journal of scientific research*, 41(1), 84-98.
- [16] **Hessainia, Z., Belbah, A., Yallese, M. A., Mabrouki, T., & Rigal, J. F.** (2013). On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. *Measurement*, 46(5), 1671-1681.
- [17] <https://www.ensingerplastics.com/fr-fr/produits-semi-finis/plastiques/pa66-tecamid-66-gf30-black> (28/03/2019).
- [18] https://www.altimet.fr/?page_id=234 (28/03/2019).
- [19] **Bouزيد, L., Yallese, M. A., Chaoui, K., Mabrouki, T., & Boulanouar, L.** (2015). 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.

- [20] **Aouici, H., Bouchelaghem, H., Yallese, M. A., Elbah, M., & Fnides, B. (2014).** 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.
- [21] **Desai, K. M., Survase, S. A., Saudagar, P. S., Lele, S. S., & Singhal, R. S. (2008).** 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.
- [22] <https://intelligence-artificielle-robotique.weebly.com/theacuteorie.html> (10/05/2019).
- [23] **Parizeau, M. (2004).** Réseaux de neurones, livre, université LAVAL. 5-12.
- [24] **I. Meddour, L. (2015).** 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.