

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des sciences et de la technologie
Département de génie mécanique
Laboratoire de domiciliation LMS

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN 3^{ème} CYCLE

Spécialité: Génie mécanique
Option : Mécanique appliquée

Présentée par

Cherafa Hamza

Intitulée

Étude expérimentale et modélisation des paramètres de coupe lors de l'usinage d'un matériau polymère composite renforcé de fibres de verre (GFRP).

Devant le Jury composé de :

Pr. Bey Kamel	Université badji mokhtar Annaba	Président
Pr Yallese MOHAMED ATHMANE	Université 8 Mai 1945 Guelma	Encadreur
Dr Boucherit Septi	Université 8 Mai 1945 Guelma	Co-encadreur
Dr. Belbah Ahmed	Université 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
Pr. Bensouillah Hamza	Université 8 Mai 1945 Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2023-2024

Dédicace

*La connaissance s'acquiert par l'expérience tout le
reste n'est que de l'information*

Albert Einstein

Je tiens à dédier cette thèse :

À mes parents

À ma famille

À mes amis

Remerciement

Avant tout, nous remercions notre dieu, pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Puis, je tiens à remercier mon encadreur de la thèse monsieur Yallese Mohammed Athmane, professeur au département de génie mécanique, université de 8 mai 1945 de Guelma, pour nous proposer ce sujet et pour ses conseils scientifiques. Aussi, je remercie mon co-encadreur de thèse monsieur Septi Boucherit pour ses visions durant tout ce chemin.

Je tiens à remercier les membres du jury pour l'honneur qui ont accepté d'évaluer notre modeste travail.

D'autre part, je remercie tous les membres du laboratoire de la mécanique et de structures.

Enfin, je remercie également toutes les personnes qu'ils nous ont apporté leur soutien et tous ceux qui nous avons oubliés dans ces remerciements.

Résumé

L'objectif de la thèse est de mettre en place une approche scientifique et expérimentale afin de comprendre l'usinabilité du PA66-GF30 lors du processus de tournage en se basant sur une série des expériences uni factorielles et multifactorielles en utilisant la conception de Taguchi et à l'aide des outils de coupe en carbure revêtu. Pour cela, la discussion des résultats liés à la première partie de cette étude qui concerne les essais uni factorielle ont permis de déterminer la limite de bon fonctionnement du couple outil-matière et de comprendre l'usinabilité du PA66 GF30 en termes de la qualité de surface usinée et des efforts de coupe axial, radial et tangentiel en fonction de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe, le rayon du bec et la lubrification. D'autre part, la deuxième partie de ce travail a permis de réaliser une étude statistique sur l'influence des facteurs de coupe sur les paramètres de sortie et par suite développer des modèles mathématiques de prédiction des paramètres technologique à savoir ; l'effort de coupe principal, la rugosité de surface, la puissance de coupe et le débit du copeau enlevé en appliquant la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) et l'approche des réseaux de neurones (ANN). Les deux approches ont été comparées en termes de précision. Finalement, une série d'essais a été effectuée afin de vérifier la validation expérimentale des modèles développés. La dernière partie de ce travail, est dédiée à l'optimisation des conditions de coupe suivant l'approche de Taguchi basée sur le signal-bruit (S/N). Cette section est suivie par une optimisation multi objective en utilisant la fonction de désirabilité (DF) suivant plusieurs objectifs souhaités et les algorithmes génétiques (GA).

Mots clés : Usinabilité, Modélisation, Optimisation, PA66-GF30, Efforts de coupe, Rugosité, Puissance de coupe, Productivité.

Abstract

This paper presents an experimental study focused on the machinability analysis of glass fiber reinforced polyamide (PA66 GF30) during turning process and using a coated carbide cutting tools. For this purpose, a series of unifactorial and multifactorial experiments based on the experimental plan of Taguchi have been carried out. The results treatment of the first part of this study which concerns the unifactorial analysis of machining process allowed us the determination of the best region for functioning of the both (cutting tool-work piece) and to understand the machinability of PA66 GF30 in terms of surface quality and cutting forces (the main cutting force, the feed force and the thrust force) as a function of cutting speed, feed rate, depth of cut, tool nose radius and lubrication. On the other hand, the second part of this study allowed us the determination of the mathematical models to predict the evolution of the main cutting force, the surface roughness, the cutting power and material removal rate with applying the response surface methodology and the artificial neural network. In addition, a statistical analysis of the experimental results has been made, followed by a comparative study allowed us the deduction of the precision of each method applied. The validation tests of the developed models for the surface roughness and cutting forces were carried out. The last part was devoted to investigate the optimization of machining process for the different objectives. In this framework, the Taguchi method was used for the mono objective optimization. Whereas, the desirability function and the genetic algorithm have been applied for the multi-objective optimization purpose.

Keywords: Machinability, Modeling, Optimization, PA66-GF30, Cutting forces, Surface roughness, Cutting power, Material removal rate.

ملخص

الأطروحة تستهدف بالأساس وضع مقارنة علمية و تجريبية لأجل فهم عملية التصنيع الخاصة بمادة البولياميد المدعم بنسبة 30% من الألياف الزجاجية خلال عملية الخراطة متركزين على سلسلة من التجارب أحادية و متعددة العوامل باستعمال مخطط التجارب لتاغيشي وبمساعدة أدوات قطع من الكرييد المعدني. لأجل هذا الهدف، مناقشة النتائج المرتبطة بالجزء الأول من هذه الدراسة التي تتعلق بالتحليل أحادي العوامل الخاص بعملية التصنيع سمحت بتحديد منطقة العمل الأمثل للمزدوجة (أداة قطع- مادة مصنعة) و تحليل تطور الإعدادات التكنولوجية المدروسة بصيغة نوعية السطح المصنع وإجهادات القطع المحورية، القطرية و المماسية بدلالة سرعة القطع و التقدم، عمق التمريرة، و نصف قطر التفطح بالنسبة لأداة القطع بالإضافة الى نوعية التصنيع. من جانب آخر الجزء الثاني من هذا العمل سمح لنا بإنجاز دراسة إحصائية متمحورة حول دراسة تأثير عوامل القطع على الإعدادات التكنولوجية، و عليه تم اقتراح نماذج رياضية إحصائية لأجل توقع الإعدادات التكنولوجية المدروسة بصيغة إجهاد القطع المماسي، خشونة السطح المصنع، إستطاعة القطع و قيمة الإنتاجية و هذا بتطبيق منهجية استجابة السطح و المقاربة الخاصة بشبكة الألياف العصبية الاصطناعية. بعد ذلك، سلسلة من التجارب انجزت لأجل التحقق من الصلاحية التجريبية للنماذج المقترحة الخاصة بنوعية السطح المصنع وإجهاد القطع المماسي. في النهاية، تم القيام بمقارنة سمحت لنا بتقييم واستخلاص حدود الدقة فيما يخص الطرق التحليلية المطبقة.

الجزء الأخير من هذا العمل خصص لانتقاء شروط القطع المثلى على أساس مقارنة تاغيشي. هذا العمل متبوع بالتحسين المتعدد الأهداف باستعمال وتطبيق الدالة المستهدفة على أساس عدة أهداف مرغوبة، كما تم في هذا الإطار استعمال الخوارزميات الجينية لتحقيق نفس الهدف المركب.

الكلمات المفتاحية: تصنيع، نماذج رياضية، تحسين، بولياميد 66 مركب، إجهادات القطع، خشونة السطح، إستطاعة القطع، إنتاجية.

TABLES DES MATIERES

Introduction générale	VI
------------------------------------	-----------

Chapitre.I Étude bibliographique

I.1. Généralités sur les matériaux composites.....	1
I.1.1. Introduction.....	1
I.1.2. Constituants.....	2
I.1.2.1. La matrice.....	2
I.1.2.2. Le renfort.....	4
I.1.2.3. L'interface fibre-matrice.....	9
I.2. Généralités sur l'usinage.....	9
I.2.1. Usinabilité des matériaux.....	9
I.2.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité.....	10
I.2.3. Facteurs influençant l'usinabilité.....	10
I.2.3.1. Caractéristiques mécaniques et physiques.....	11
I.2.3.2. Caractéristiques thermiques.....	11
I.2.3.3. Composition chimique.....	11
I.2.4. Paramètres technologiques.....	12
I.2.4.1. Efforts de coupe.....	12
I.2.4.2. Puissance de coupe.....	14
I.2.4.3. États de surface.....	15
I.2.4.3.1. Introduction.....	15
I.2.4.3.2. La rugosité.....	16
I.2.4.3.3. Critères de la rugosité de surface.....	18
I.2.4.3.4. Paramètres affectant la qualité de surface.....	20
I.3. Généralités sur la mise en forme par usinage des matériaux composites.....	21
I.3.1. Introduction.....	21
I.3.2. Tournage des matériaux composites à matrice polymère et renfort fibreux (FRP).....	21
I.3.3. Comportement des matériaux composites lors de l'usinage.....	21
I.3.3.1. Hétérogénéité.....	22
I.3.3.2. Anisotropie.....	22
I.3.3.3. Dégradation thermique.....	22
I.3.3.4. Usure des outils.....	22
I.3.4. Phénomènes lors de l'usinage des matériaux composites.....	22

I.3.4.1. Peluchage.....	22
I.3.4.2. Arrachement des fibres.....	22
I.3.4.3. Décohésion de l'interface fibre-matrice	23
I.3.4.4. Délaminage.....	23
I.4. État de l'art sur l'usinage des matériaux composites	23
I.5. Conclusion	49

Chapitre.II Procédure expérimentale

II.1. Introduction	51
II.2. Machine - outil.....	51
II.3. Outils de coupe utilisés.....	52
II.4. Matériau des éprouvettes	53
II.5. Plan expérimental et conditions de coupe	54
II.5.1. Introduction	54
II.5.2. Plan de Taguchi L18.....	55
II.5.3. Plan des essais uni-factoriels.....	56
II.5.3.1. Plan des essais de l'effet des facteurs de coupe	56
II.5.3.2. Plan des essais de l'effet du rayon de bec	57
II.5.3.3. Plan des essais de l'effet de la lubrification	57
II.6. Instruments et méthodes de mesure.....	58
II.6.1. Mesure des efforts de coupe	58
II.6.2. Mesure de la rugosité	59
II.7. Conclusion	62

Chapitre.III Impact des conditions de coupe sur les paramètres technologiques pendant l'usinage du PA66-GF30

III.1. Introduction	63
III.2. Évolution des efforts de coupe	63
III.2.1. Influence de l'avance	63
III.2.2. Influence de la vitesse de coupe	64
III.2.3. Influence de la profondeur de passe	65
III.3. Évolution de la rugosité de surface en fonction des paramètres du régime de coupe	66

III.3.1. Effet de l'avance.....	66
III.3.2. Effet de la vitesse de coupe	67
III.3.3. Effet de la profondeur de passe	68
III.4. Impact du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe et la rugosité de surface	69
III.4.1. Impact du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe avec des avances par tour différentes.....	69
III.4.2. Impact du rayon de bec sur l'évolution de la rugosité de surface avec des avances par tour différentes.....	71
III.4.3. Impact du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe avec des vitesses de coupe différentes.....	72
III.4.4. Impact du rayon de bec sur l'évolution de la rugosité de surface avec des vitesses de coupe différentes.....	74
III.5. Impact de la lubrification sur l'évolution des efforts de coupe et de la rugosité de surface.....	76
III.5.1. Influence de la lubrification sur l'évolution des efforts de coupe avec des avances par tour différentes.....	76
III.5.2. Influence de la lubrification sur l'évolution de la rugosité de surface avec des avances par tour différentes.....	77
III.5.3. Influence de la lubrification sur l'évolution des efforts de coupe avec des vitesses de coupe différentes.....	79
III.5.4. Influence de la lubrification sur l'évolution de la rugosité de surface avec des vitesses de coupe différentes.....	80
III.6. Conclusion	82

Chapitre.IV Modélisation du processus d'usinage du PA66-GF30 en utilisant les méthodes ANN et RSM

IV.1. Introduction.....	84
IV.2. Généralités sur les ANN.....	85
IV.2.1. Définition.....	85
IV.2.2. Données de base d'ANN.....	86
IV.2.3. Architecture des réseaux.....	87
IV.2.4. Fonctions de transfert	90
IV.2.5. Calcul des valeurs prédites	91
IV.2.6. L'apprentissage	93
IV.3. Modélisation de la rugosité (Ra) et l'effort principal (Fz) par ANN	96
IV.3.1. Modélisation de la rugosité (Ra)	96
IV.3.2. Modélisation de l'effort de coupe principal (Fz).....	99
IV.4. Modélisation des paramètres technologiques en utilisant la méthode (RSM).....	102

IV.4.1. Introduction	102
IV.4.2. Méthode (RSM).....	102
IV.4.3. Analyse de la variance (<i>ANOVA</i>)	105
IV.4.4. Résultats et discussions	107
IV.4.4.1. Analyse statistique.....	107
IV.4.4.1.1. ANOVA pour la rugosité (<i>Ra</i>)	107
IV.4.4.1.2. ANOVA pour l'effort tangentiel (<i>Fz</i>).....	109
IV.4.4.1.3. ANOVA pour la puissance de coupe (<i>P</i>).....	110
IV.4.4.1.4. ANOVA pour le débit de copeaux enlevés (<i>MRR</i>).....	111
IV.4.4.2. Diagramme des effets principaux pour <i>Ra</i> , <i>Fz</i> , <i>P</i> et <i>MRR</i>	112
IV.4.4.3. Modélisation mathématique des facteurs de réponse	114
IV.4.4.3.1. Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés.....	116
IV.4.4.4. Diagramme des effets d'interaction sur l'évolution des facteurs de réponse	117
IV.5. Essais de validation.....	122
IV.6. Comparaison entre la modélisation <i>ANN</i> et <i>RSM</i>	123
IV.7. Conclusion	126

Chapitre.V Optimisation des conditions d'usinage du polyamide renforcé en fibres de verre (PA66-GF30)

V.1. Introduction	128
V.2. Optimisation mono-objective	128
V.2.1. Méthode de Taguchi.....	128
V.2.2. Apport de la méthode de Taguchi	129
V.2.3. Tables de Taguchi	131
V.2.4. Optimisation des conditions d'usinage du PA66-GF30 pour l'objectif de la qualité et de la productivité.....	133
V.2.4.1. Analyse et la discussion des résultats	134
V.2.4.1.1. Modélisation mathématique de la rugosité de surface (<i>Ra</i>) et le débit de copeau enlevé (<i>MRR</i>).....	134
V.2.4.1.2. Prédiction des paramètres optimaux.....	134
V.3. Optimisation multi-objective.....	136
V.3.1. Approche de la fonction de désirabilité.....	136
V.3.1.1. Introduction	136
V.3.1.2. Optimisation des conditions d'usinage pour l'objectif de la qualité	137
V.3.1.3. Optimisation des conditions d'usinage pour l'objectif de la productivité.....	140

V.3.1.4. Optimisation des conditions d'usinage pour l'objectif combiné	143
V.3.1.5. Optimisation du processus d'usinage pour les phénomènes de coupe étudiés (Fz, Ra, P et MRR).....	147
V.3.2. Optimisation multi-objective en utilisant l'approche (ANN-GA).....	153
V.4. Conclusion	157
Conclusion générale et perspectives	158
Références bibliographiques	162
La liste des Figures	168
La liste des Tableaux	172
Glossaire	174

Introduction générale

Les matériaux composites à matrice polymère et renfort fibreux présentent un meilleur rapport masse-rigidité-résistance, et une faible sensibilité à la fatigue et à la corrosion en comparaison avec d'autres matériaux métalliques ou polymères. Les bonnes caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux composites ont contribué à l'augmentation du champ d'application de ces derniers dans de nombreux secteurs de l'industrie. Parmi les principaux objectifs qui rendent les matériaux composites comme solutions dans nombreux applications de l'ingénierie, est la réponse sur les enjeux économiques et techniques liés à la réduction de la masse, la consommation de l'énergie et l'impact environnemental relative à la diminution des matières et des gazes polluants. Cependant, le coût global qui concerne l'élaboration de ces matériaux et les difficultés qui dépendent de l'optimisation de la qualité d'usinage restent des obstacles qui influent sur le développement et la diffusion de ce type des matériaux dans le milieu industriel. Les études prévisionnelles indiquent que la croissance accélérée de l'exploitation des matériaux composites sera d'une importance capitale dans le développement de différents secteurs industriels notamment dans l'industrie des avions, automobiles, navale et spatiale. Par exemple, concernant le domaine de l'aéronautique, le pourcentage de l'utilisation des matériaux composites est passé de 5 % pour (A 300) à plus de 50 % pour (A 350 XWB) en seulement 50 ans. Aussi, l'utilisation des matériaux composites permet de gain de masse variant de 10 % jusqu'à 50 % avec des performances égales pour une augmentation dans les coûts de fabrication de 10 % à 20 %. Pour l'industrie automobile, les matériaux composites à matrice thermoplastique et renfort fibreux (fibres de verre) occupent une partie importante en raison de la résistance exceptionnelle au choc et à la fatigue qui caractérise ce type des matériaux.

La croissance de l'importance de tels matériaux dans les secteurs industriels se traduit à une grande nécessité pour l'élaboration des pièces de structure. Malgré, le grand développement dans les techniques de mise en forme à partir d'une phase primaire et les conseils liés à la réduction de nombre des opérations de mise en forme des matériaux composites, la solution usinage par un outil coupant reste nécessaire pour les opérations de finition et à grande précision. En général, l'usinage des matériaux composites comporte de nombreux défis liés principalement à l'hétérogénéité et l'anisotropie de ces matériaux. Aussi, l'arrachement des fibres, le délaminage, la décohésion de l'interface fibre-matrice, l'usure accélérée des outils de coupe (aciers rapide,..) en raison de l'effet abrasive des fibres (fibres de verre), la dégradation thermique qui se traduit par la fusion d'une matrice thermoplastique à cause de la concentration de la chaleur générée dans la zone de coupe sont des phénomènes qui augmentent la difficulté de l'usinage de tels matériaux.

Pour cela, les études expérimentales qui dépendent de l'analyse et la quantification de l'effet de différents conditions de coupe et la géométrie des outils restent l'une des méthodes principales qui focalisent sur la compréhension du comportement des matériaux composites lors de l'usinage. À cet effet, la modélisation des paramètres technologiques afin de faire des prédictions et l'optimisation des conditions de coupe restent des étapes essentielles pour la maîtrise de l'usinage des polymères composites.

INTRODUCTION GENERALE

Dans cette optique, l'objectif de la thèse est de mettre en place une approche scientifique pour comprendre le comportement du polyamide renforcé en fibres de verre (PA66 GF30) pendant le processus de tournage. Cette approche consacre une étude expérimentale basée sur l'analyse uni-factorielle et multifactorielle relative à l'impact de la vitesse de coupe, de l'avance par tour, de la profondeur de passe, du rayon de bec et de la lubrification sur l'évolution des paramètres technologiques en termes de la qualité de surface usinée, des efforts de coupe, de la puissance de coupe et du débit de copeau enlevé. Pour cet objectif, l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN) et la méthodologie de la surface de réponse (RSM) ont été exploitées afin de modéliser le processus de coupe et de quantifier l'impact de différents facteurs sur les paramètres de performance de l'usinage étudiés. Aussi, la méthode de Taguchi, l'approche de la fonction de désirabilité et des algorithmes génétiques ont été appliquées pour effectuer les tâches d'optimisation mono-objective et multi-objective du régime de coupe. Notre thèse de doctorat est structurée comme suit :

Le premier chapitre est réservé aux généralités et les notions de base qui concernent la définition et la classification des matériaux composites selon leurs performances, leurs utilisations et leurs constituants, ainsi le rôle de chaque constituant d'un matériau composite. Ensuite, on aborde quelques principes sur l'usinage des métaux en général et les polymères composites en particulier. Finalement, un résumé sur les travaux de recherche antérieure sur l'effet de différents paramètres d'usinage tels que, la géométrie de l'outil et les conditions de coupe sur l'usinabilité des matériaux composites à matrice polymère et renfort fibreux (GFRP) et plus particulièrement dans le cas du polyamide renforcé par des fibres de verre (PA66 GF30).

Dans **le deuxième chapitre**, on aborde les équipements nécessaires pour la réalisation des expériences, la structure et les propriétés mécaniques et thermiques du polyamide renforcé en fibres de verre (PA66-GF30), la géométrie et les caractéristiques des outils de coupe utilisés. Les plans des essais adoptés, les appareils et les méthodes de mesure des paramètres de sortie sont aussi exposés dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré aux essais sur l'usinabilité du (PA66 GF30) en termes de la rugosité de surface et des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe, le rayon de bec et la lubrification en utilisant la méthode uni factorielle.

Le quatrième chapitre est focalisé sur trois objectives, le premier concerne la modélisation du processus d'usinage en termes de la qualité de surface usinée, de l'effort de coupe principal, de la puissance de coupe et du débit de copeau enlevé en appliquant l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN) et la méthodologie de la surface de réponse (RSM). Ensuite, une série des essais a été effectuée afin de vérifier la validation expérimentale des modèles développés et des résultats obtenus. Enfin, une comparaison entre la modélisation ANN et RSM a été faite afin de sélectionner le modèle le plus précis et de connaître les performances et l'efficacité de chaque méthode appliquée.

INTRODUCTION GENERALE

Le dernier chapitre s'articule sur trois axes, le premier lié à l'optimisation mono-objectif des conditions d'usinage pour atteindre le minimum de la rugosité de surface et le maximum du débit de copeau enlevé en utilisant la méthode de Taguchi basée sur le signal/bruit. La deuxième partie a été réservée à l'optimisation multi-objective du régime de coupe en se basant sur la méthodologie de la surface de réponse et la fonction de désirabilité afin de réaliser la solution combinée qui a pour but d'améliorer la qualité de surface usinée, la productivité et de réduire l'effort de coupe principal et la puissance de coupe. Le dernier objectif sera focalisé sur l'optimisation du processus de coupe en utilisant la méthode des algorithmes génétiques avec les modèles développés par des réseaux de neurones (ANN-GA). Le traitement des résultats expérimentaux lié à la tâche de la modélisation et d'optimisation a été effectué à l'aide des logiciels de l'analyse statistique et de la modélisation mathématique tels que (Matlab, JMP 10, Design Expert 10 et Minitab 16).

Finalement, le travail est couronné par une conclusion générale, suivie par des perspectives ainsi que les références bibliographiques.

Chapitre I

Étude Bibliographique

I.1. Généralités sur les matériaux composites

I.1.1.Introduction

Les matériaux composites peuvent être classés selon la matrice en trois catégories principales, les composites à matrice polymère renforcée par des fibres (FRP), les composites à matrice métallique (MMC) et à matrice céramique (CMC) [1-3]. Les matériaux composites à matrice organique renforcée par des fibres (FRP) sont très utilisés par rapport aux autres catégories en raison des propriétés des polymères et des fibres [1]. La matrice polymère thermoplastique ou thermodurcissable se caractérise par son poids léger, sa résistance à la corrosion, son module d'élasticité élevé,...ect.

Les matrices thermoplastiques sont des polymères qui possèdent des bonnes caractéristiques en comparaison avec d'autres matrices. La simplicité de mise en forme, la cadence de transformation, la transformation irréversible sont des propriétés favorables qui rendent ces matériaux plus utilisés et plus applicables dans de nombreux types de matériaux composites et des secteurs industriels concernés. Le polyamide (PA66) est un exemple sur les matrices polymères thermoplastiques qui présentent une résistance et une dureté exceptionnellement élevées, haute résistance à l'usure, bonne stabilité dimensionnelle, poids léger et un service de température élevé. D'autres parts, la structure du polyamide a une bonne solubilité et une grande masse molaire. Le renforcement des polyamides par des fibres augmente les propriétés mécaniques et thermiques de ce dernier quel que soit le type de renfort. Les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont les plus utilisés pour renforcer des matrices polymères. Les fibres de verre soit de type E, R et D ou autres se caractérisent par leur faible taux d'allongement, leur module d'élasticité exceptionnellement élevé et leur très bonne résistance à la rupture dépassant même celle de certains métaux. Cependant, le verre est un matériau très fragile du fait de sa forte sensibilité aux microfissures. Ce dernier perd ce caractère et sa fragilité est diminuée lorsqu'il est sous forme de fibres avec un faible diamètre et possède alors de bonnes propriétés mécaniques. En plus, les fibres de verre offrent une bonne adhérence entre les fibres et la matrice, des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications et leur prix raisonnable par rapport aux autres types de fibres. Elles sont utilisées dans plus de 90% des composites [4], et plus particulièrement pour les composites à grande diffusion (GD). Deux familles de composites développés selon des objectifs différents.

Les composites à grande diffusion (GD) : Ils possèdent des faibles caractéristiques mécaniques à celles de l'acier. Ils proviennent essentiellement du couple fibre de verre/poly stère ou verre E/techno polymère, avec un taux de renforcement voisin de 30% en masse. Ils sont utilisés en raison de leurs couts compétitifs et de leur faibles poids, ils occupent un taux important dans l'industrie des composites.

Les composites à haute performance (HP) : à l'opposé des composites à grande diffusion, ces derniers possèdent des caractéristiques mécaniques élevées à celles de l'acier, ils résistent des températures très élevées jusqu'à 1000 C. Ils constituent principalement par des fibres de verre R, de carbone et d'aramide qui sont exploitées dans la majorité du temps pour renforcer des résines époxydes avec un grand taux de renforcement égal ou supérieur de 50 %. Ils sont utilisés dans des structures hautes performance et en cas particulier dans l'aéronautique (caisson central de l'avion A380, voilure et fuselage de (Boeing 787 Dreamliner), caissons de voilure du Rafale, prototype de voitures,...). [5,6]

I.1.2. Constituants

Un matériau composite peut être défini comme une combinaison macroscopique d'au moins deux matériaux différents (Résine et Renfort). Le résultat de cet assemblage est un matériau hétérogène et souvent anisotrope mais aussi, il possède généralement de bonnes propriétés par rapport à ses constituants, la matrice se caractérise par ses faibles caractéristiques mécaniques en comparaison avec son renfort. Quel que soit le type de la matrice métallique, céramique ou polymère, il faut assurer le maintien des renforts et transférer et répartir des sollicitations appliquées sur la pièce. Ainsi, elle donne la forme géométrique du matériau et permet de protéger le renfort contre le milieu ambiant (humidité, température, corrosion). Le renfort peut généralement être comme des fibres ou des particules. Les fibres sont la forme la plus utilisée dans le renforcement des matériaux composites. Son rôle principal est la contribution à l'amélioration de la rigidité et de la résistance mécanique du matériau composite. Le type, le diamètre, la forme et l'orientation des fibres sont des facteurs les plus influents sur la valeur de cette rigidité. D'une façon générale, les propriétés d'un matériau composite sont directement liées aux caractéristiques mécaniques de leurs constituants, la matrice, les fibres et aussi de l'interface fibres-matrice.

I.1.2.1. La matrice

Le rôle de la matrice est de recevoir les renforts. Elle permet de conserver les fibres dans leur disposition et leur orientation, de protéger les fibres et le matériau composite physiquement et chimiquement. Elle assure la liaison mécanique entre les éléments de renfort. Elle permet de transférer les charges aux fibres, de répartir et de distribuer les efforts entre les fibres (résistance à la compression et à la flexion). Elle permet de donner la forme géométrique désirée d'un composite, de fournir une résistance à la propagation des fissures et de déterminer toutes les propriétés de cisaillement d'un composite. Elle limite en général la température d'utilisation du composite. Les résines doivent être compatibles avec les fibres et avoir une déformabilité importante. Leur masse volumique faible permet de conserver des caractéristiques spécifiques élevées aux matériaux composites.

Les résines les plus utilisées sont les résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les thermoplastiques sont des polymères qui ont l'avantage de simplicité de mise en forme. Ils se transforment à l'état ramolli par l'échauffement et durcissent au cours du refroidissement. Sa transformation est réversible. Dans l'état ramolli, la matrice prend sa forme par injection, extrusion ou formage dans un moule. Ils ont une cadence de

transformation plus rapide que les thermodurcissables et les élastomères. Ils se présentent sous forme des chaînes linéaires. Le renforcement de la matrice par des fibres apporte une tenue mécanique et thermique améliorée du matériau et une bonne stabilité dimensionnelle. Après leur utilisation, les résines thermoplastiques peuvent être récupérées et facilement recyclées. De plus, les résines thermoplastiques sont économiquement intéressantes mais leurs propriétés mécaniques et thermomécaniques sont faibles. Ces résines thermoplastiques sont essentiellement utilisées pour les composites à grande diffusion (GD).

Parmi les résines thermoplastiques les plus utilisées, on trouve les polyéthylènes, les propylènes, les polycarbonates, le polyéther éther cétone et les polyamides [7]. Le matériau concerné dans cette étude est la matrice polyamide (PA66) renforcée par 30% de fibres de verre.

Les thermodurcissables sont des polymères qui se caractérisent par leurs infusibles et insolubles. Ils durcissent de façon définitive lors de leur mise en forme par chauffage et donc sa transformation chimique pendant le processus de fabrication est irréversible. Ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques et thermiques que les matrices thermoplastiques. Ils sont, en général associés à des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel. Ce sont les matrices les plus utilisées dans la production des matériaux composites. Ils existent de nombreuses catégories de matrices thermodurcissables, les résines les plus courantes sont les polystyrènes insaturés qui associés à des fibres de verre ont une bonne tenue à la température et aux agents chimiques et sont très largement utilisés. Les résines époxydes qui se caractérisent par des caractéristiques mécaniques, thermiques et chimiques élevées, et qui constituent la résine type des composites HP (haute performance) et les résines phénoliques qui possèdent une bonne résistance au feu [8]. Les thermodurcissables représentent presque 70% des résines utilisées dans l'élaboration des matériaux composites en Europe [1,4]. On peut trouver des autres types de résines tels que les matrices métalliques qui possèdent globalement une bonne conductibilité thermique et électrique, et se caractérisent par une tenue aux températures d'utilisation plus élevées comme l'aluminium et ses alliages, le nickel, le titane. Leurs utilisations sont en grande partie dans le stade préindustriel. On trouve aussi les matrices céramiques qui se constituent principalement à des carbures de silicium et de carbone. Elles sont utilisées dans les structures composites qui subissent des contraintes d'origine thermique et se caractérisent par leur prix de fabrication élevé. Mais contrairement aux résines polymères, l'utilisation des composites à matrice céramique et métallique reste limitée en raison de leurs inconvénients techniques et économiques notamment avec les exigences de réduire la masse et la consommation d'énergie dans l'industrie en général et plus particulièrement dans les secteurs de l'aéronautique, de l'aérospatial et des automobiles. La figure I.1 représente les principaux types de résines utilisées dans les composites.

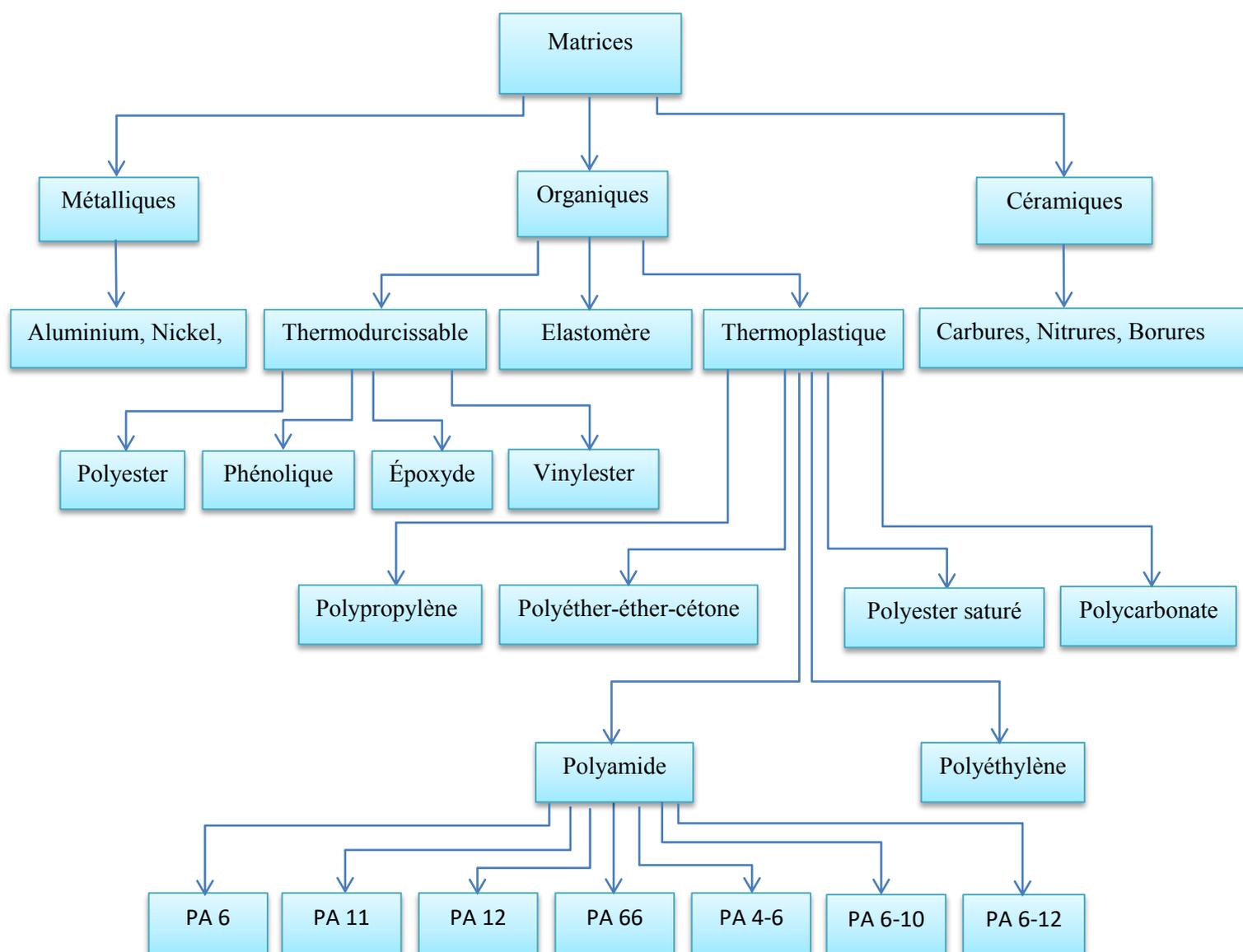


Fig.I.1. Principaux matériaux d'une matrice

I.1.2.2. Le renfort

Il contribue principalement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques d'un matériau composite en termes de la résistance et de la rigidité. Les renforts se présentent généralement sous forme de fibres. Ils se caractérisent par une bonne compatibilité physico-chimique avec la matrice renforcée. Pour améliorer les propriétés mécaniques d'un composite, il faut jouer sur leur architecture pour obtenir une charpente résistante et adaptée aux contraintes mécaniques appliquées. En fonction des propriétés recherchées, les renforts sont souvent sous forme de fibres (longues, courtes ou broyées) ou agglomérées sous forme de

mats de fibres. Ainsi, ils peuvent être sous forme de structures de tissus (taffetas, serge, satin), de tresse, de tricots ou sous forme de nappe et de tissus 3D. Les fibres se présentent généralement sous forme linéique, surfacique ou multidirectionnelle. En fonction de leur nature et de sa fragilité, le diamètre des fibres varie généralement entre $3\mu\text{m}$ et $20\mu\text{m}$. Les fibres sont donc fortes mais sont fines, ce qui leur confère une grande souplesse. Les composites à fibres longues présentent un meilleur comportement mécanique que les composites à fibres courtes ou à particules. En revanche, les composites à fibres parallèles présentent un comportement anisotrope, tandis que les composites à fibres courtes ou à particules orientées aléatoirement présentent à peu près un comportement isotrope [9]. On distingue de nombreux types des renforts organiques et inorganiques et les plus courants sont des fibres de verre, de carbone et d'aramide. La figure I.2 résume les principaux matériaux du renfort.

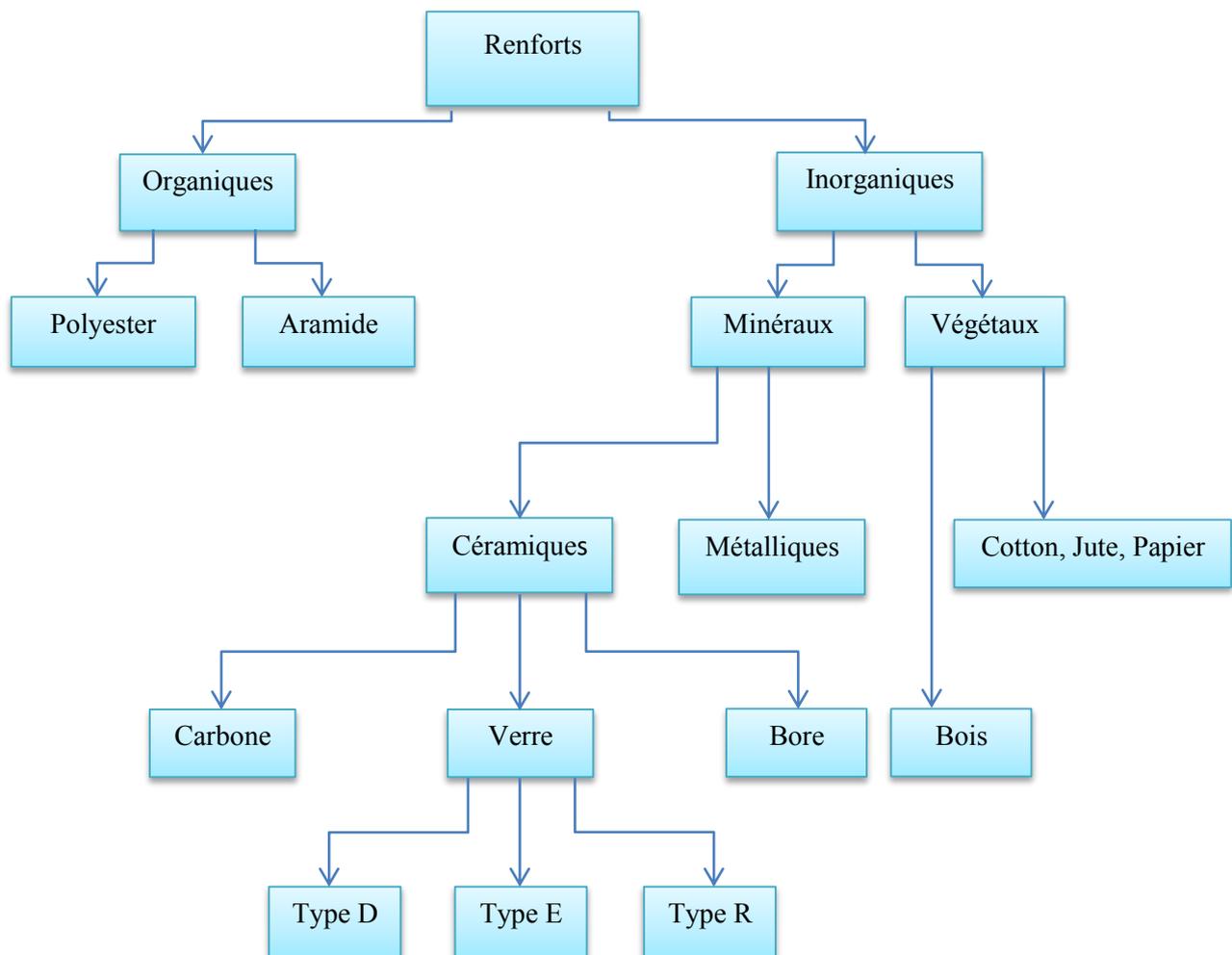


Fig.I.2. Principaux matériaux du renfort.

I.1.2.2.1. Fibres de verre

Elles sont obtenues à partir de silice et de certains additifs. Elles possèdent de bonnes propriétés mécaniques et d'isolation thermique [10]. Elles se caractérisent par une résistance élevée à la rupture dépassant même celle de certains aciers. Elles offrent de bonnes propriétés d'adhérence avec la matrice, de faible taux d'allongement et un module d'élasticité exceptionnellement élevé. Par contre, le verre est un matériau très fragile et sensible aux microfissures mais lorsqu'il est sous forme des fibres, le verre perd ce caractère et alors possède de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles représentent une grande partie des renforts utilisés dans les composites et particulièrement dans les composites à grande diffusion (GD). Suivant leur composition chimique, il existe de nombreux types de verre et les plus courants sont de type E, V et R. le type E est le plus utilisé dans les composites à grande diffusion. Le type D qui se caractérise par sa propriété diélectrique est le plus utilisé dans les applications concernant les matériels d'électronique et de télécommunication. Le type R qui possède des caractéristiques mécaniques élevées et le plus utilisé dans les structures des composites à haute performance et particulièrement dans le domaine de l'aéronautique [4,6]. L'élaboration des fibres de verre est basée sur les étapes suivantes. La première étape est appelée l'affinage, dans cette étape le mélange à base de silice et d'additifs est chauffé jusqu'à la température de fusion (1500 C°). La deuxième étape est appelée l'étirage, il s'agit d'étirer le verre dans l'état ramolli avec une grande vitesse pour former des filaments de verre ou des fibres à un diamètre précis. La troisième étape est l'ensimage, il s'agit de faire des traitements de surface des fibres pour améliorer les propriétés d'adhérence, la compatibilité fibre-matrice et la protection des fibres contre les effets indésirables, dans cette étape on peut former les filaments de verre selon la longueur désirée. La dernière étape est appelée le séchage, il s'agit de maintenir les fils de verre dans une température comprise entre 600 et 700 C° pour atteindre aux propriétés finales des fibres [11]. Les tableaux I.1 et I.2 représentent la composition chimique et les caractéristiques mécaniques de différents types de fibres de verre [6,12].

Tableau I.1. Composition chimique de différents types de verre E, D et R selon Berthelot.

Composants		Composition en masse (%)		
		Verre D	Verre E	Verre R
Silice	SiO ₂	73-74	53-54	60
Alumine	AlO ₂		14-15.5	25
Chaux	CaO	0.5-0.6	20-24	9
Magnésie	MgO	0.5-0.6	20-24	6
Oxyde de bore	B ₂ O ₃	22-23	6.5-9	
Fluor	F		0.07	
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0.1-0.2	<1	
Oxyde de titane	TiO ₃		<1	
Oxyde de sodium	Na ₂ O	1.3	<1	
Oxyde de potassium	K ₂ O	1.5	<1	

Tableau I.2. Caractéristiques mécaniques des fibres de verre E et R selon Berthelot.

Caractéristiques		Verre E	Verre R
Masse volumique	Kg/m ³	2600	2555
Module d'Young	GPa	73	86
Contrainte à la rupture	MPa	2000-2400	3600
Allongement à la rupture	%	4.4	5.2
Coefficient de Poisson		0.22	-

I.1.2.2.2. Fibres de Carbone

Elles offrent généralement d'excellentes propriétés mécaniques et thermiques que les autres types de fibres. Elles possèdent d'excellents comportements en traction et en compression avec une faible densité et se caractérisent par une température d'utilisation atteignant jusqu'à 1100 C°. Elles sont maintenues sur leurs caractéristiques mécaniques à une température de 1500 C° dans une atmosphère non oxydante. On les rencontre dans les structures composites à fortes sollicitations (HP), leur utilisation reste limitée à cause des prix de fabrication (matière et méthode de fabrication). Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur qui se présente sous forme de fibres orientées et réticulées. La première étape se concerne d'une oxydation jusqu'à 300 C°, suivie par une carbonisation à une température de 1100 C° pour obtenir une structure hexagonale de l'atome du carbone. Les fibres obtenues ont de bonnes caractéristiques à la rupture et un module d'Young de l'ordre de 200 GPa. Par conséquent, cette phase permet d'élaboration de deux types de fibres de carbone, le carbone à haute ténacité (HT) et à haute résistance (HR). Puis, l'étape de graphitisation qui consiste à effectuer une pyrolyse des fibres jusqu'à une température presque de 2600 C° en atmosphère neutre dans le but d'améliorer la rigidité des fibres et particulièrement pour atteindre un module d'Young élevé, ce qui entraîne une réorientation des réseaux hexagonaux suivant l'axe de fibres. À la fin de cette phase on peut obtenir deux types de fibres, le carbone à haut module de Young [HM] et à très haut module [THM]. Cependant, les défauts qui apparaissent pendant ce traitement liés à la diminution de résistance à la rupture. Dans la phase finale, des traitements de surface des fibres sont effectués pour accroître la rugosité des fibres, faciliter leur intégration dans la matrice et améliorer la liaison fibre-matrice [5,13]. Le tableau I.3 aborde les caractéristiques de base de différents types de fibres de carbone.

Tableau I.3. Caractéristiques principales de différents types de fibres de carbone [12].

Caractéristiques		Carbone HR	Carbone HM	Carbone THM
Masse volumique	Kg/m ³	1750	1810	1950
Diamètre	µm	5-7	5-7	5-7
Module d'Young	GPa	230	400	600
Contrainte de rupture	MPa	130	210	310
Module spécifique MN	m/kg	3000-4000	2800	2000
Contrainte spécifique KN	m/kg	1717-2290	1550	1030

I.1.2.2.3. Fibres d'aramide

Ce sont des fibres qui sont obtenues à partir des polyamides aromatiques (poly aramides) par synthèse chimique à basse température. Elles sont représentées sous des noms commerciaux différents et le plus courant est appelé (Kevlar). Elles offrent des caractéristiques mécaniques élevées par rapport aux autres fibres et plus particulièrement dans le cas des fibres de verre. Elles possèdent une bonne résistance mécanique à la traction [10]. Les composites renforcés par des fibres d'aramide représentent une bonne stabilité en température jusqu'à 200 C° en fonction de la matrice. Les fibres d'aramide sont non abrasives et non cassantes comparées au verre et au carbone et sa structure n'est pas cristalline. Malgré ces propriétés des aramides, elles restent se caractérisées par une faible résistance en compression et dans le sens normal à l'axe de la fibre. Ainsi, contrairement aux fibres de verre et de carbone, les fibres d'aramide se caractérisent par leur comportement ductile et leur faible adhérence avec la matrice. D'autre part, sa faible conductivité thermique et sa dilatation lors de l'échauffement (sous l'action d'un outil coupant) apportent des difficultés supplémentaires lors de leur usinage. Néanmoins, la découpe et l'usinage des matériaux aramides sont possibles avec des solutions concernant la nature des outils et des méthodes facilitant leurs opérations. Ces solutions se focalisent autour de l'élaboration des outils qui doivent être tranchants et très durs (endurcis avec une couche de carbure de tungstène), et leur géométrie telle que les fibres soient maintenues sous tension pour faciliter leur découpe par cisaillement. Généralement, elles sont plus utilisées dans les composites hautes performances et plus particulièrement dans les structures sandwiches (l'âme de nid d'abeille). Elles sont utilisées de façon plus vaste dans les composites pour renforcer les matrices époxydes. On trouve la majorité de leurs applications dans les secteurs de l'industrie aéronautique avec des résines époxydes, de la construction navale avec des résines polystères insaturées, des articles de sport et de l'industrie de l'armement et des réservoirs sous pression [13,14]. Le tableau I.4 présente les caractéristiques principales qui concernent les fibres d'aramide.

Tableau I.4. Propriétés principales de différentes fibres d'aramide [14].

Principales propriétés de différents types des fibres d'aramide	Méta-aramide	Para-aramide		
	(1)	Bas module (2)	Haut module (3)	Copolymère (4)
Masse volumique (g/cm ³)	1.38	1.44	1.45	1.39
Résistance en traction (Mpa)	700-850	2760	2760	3400
Module de traction (Gpa)	12-20	58	120	73
Allongement à la rupture (%)	15-30	3.3	2.4	4.5
Capacité thermique (Kj.Kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1.2	1.4	1.4	1.4
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.13	0.05	0.05	0.05
Taux d'humidité (5) (%)	4.6	7	3.5	3
Indice d'oxygène limite (6)	20-27	29	29	25
Coefficient de dilatation thermique (K ⁻¹)	2*10 ⁻⁵	-3.5*10 ⁻⁵	-3.5*10 ⁻⁵	-4*10 ⁻⁵

Avec :

- (1) Nomex® de DuPont et Conex® de Teijin.
- (2) Kevlar 29® de DuPont et Twaron® de Azko.
- (3) Kevlar 49® de DuPont et Twaron HM® de Azko.
- (4) Technora® de Teijin.
- (5) A l'équilibre, à 20 C° et 65 % HR (humidité relative).
- (6) IOL mesuré selon la méthode normalisée ISO 4589-1984.

I.1.2.3. L'interface fibre-matrice

Les propriétés générales d'un matériau composite dépendent non seulement de la nature des fibres et de la matrice constituantes, mais aussi se concernent aux propriétés et à la nature de l'interface fibre-matrice (épaisseur, forces interfaciales, mouillabilité du renfort par la matrice,) qui possèdent des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques différentes de celles de la matrice et des fibres [8]. L'interface fibre-matrice est la zone de transition qui permet de transférer les charges de la matrice aux fibres. Globalement, l'interface joue un rôle important pour le comportement régulier d'un composite. Elle a la propriété de dévier les fissures dans un composite, c'est-à-dire qu'au lieu d'une rupture brutale, on observe plutôt une décohésion progressive entre les fibres et la matrice. En d'autres termes, l'interface fibre-matrice rend le matériau composite plus tenace et plus ductile, c'est-à-dire plus résistant à la rupture. La formation de l'interface fibre-matrice et l'optimisation des liaisons chimiques, physiques et mécaniques est basée sur le traitement qu'est appelé l'ensimage, ce dernier est défini comme une émulsion de différents matériaux (polymères, silanes et additifs) déposés généralement sur les fibres dans le but de limiter le frottement qui entraîne la casse des fibres lors de leur filage et de former l'interface qui permet une bonne cohésion entre les fibres de verre et la matrice polymère. En général, l'ensimage est une opération qui contient premièrement un agent de couplage (généralement organosilane) permettant de créer une bonne interface grâce aux liaisons covalentes formées entre les fibres et la matrice, et ainsi un agent filmogène collant qui permet d'augmenter la cohésion de l'interface fibre-matrice et de rendre la structure des fibres plus efficace et proche chimiquement à celle de la matrice [13,15].

I.2. Généralités sur l'usinage

I.2.1. Usinabilité des matériaux

Dans la réalité, on trouve de nombreuses notions qui concernent le terme de l'usinabilité. Mais, globalement la notion d'usinabilité décrit l'aptitude d'un matériau à être usiné ou plus précisément, on la peut définir comme étant la propriété grâce à laquelle un matériau peut subir plus ou moins facilement une opération de mise en forme par enlèvement de la matière déterminée. Il s'agit donc, en principe d'une propriété inhérente de la matière envisagée [16,17].

L'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières pendant une seule méthode d'usinage sous des conditions de coupe identiques à elle-même à l'aide d'un même outil de coupe (même forme, géométrie, revêtements, acuité) et qui possèdent ainsi des propriétés mécaniques, thermiques et chimiques identiques à elle-même. A partir de cette définition, on peut comprendre que le terme d'usinabilité est une propriété particulière difficile à étudier car elle dépend de deux domaines scientifiques et techniques différents. D'une part, l'aspect métallurgique du problème qui est liés aux conditions de l'élaboration du matériau et aux processus de fabrication concernés qui conduit à des propriétés combinées particulières du matériau lors de sa mise en œuvre. D'autre part, l'aspect mécanique du problème qui dépend des conditions de mise en forme du métal en fonction de son application prévue.

Par contre, le terme de la coupe des métaux se focalise sur l'étude de l'impact de différentes méthodes d'usinage (Tournage, Fraisage, Perçage, Rabotage, ..) sur le comportement du même matériau dans des conditions de coupe différentes (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, rayon de bec,..) en utilisant différents outils coupants qui se caractérisent par des compositions chimiques et des géométries distinctes [18].

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

Les critères d'évaluation de l'usinabilité sont généralement nombreux et l'ordre de son effet (classement) est différent d'un auteur à l'autre. À partir de cela, on peut dire que le critère d'usinabilité n'est pas bien défini. Cependant, d'une façon générale, les critères qui concernent la mesure et l'évaluation de l'usinabilité peuvent prendre en compte les aspects suivants sans considérer l'ordre et l'importance de ces derniers :

- La durée de vie des outils et l'évolution de leur usure au cours du temps (la tenue de l'outil ou les critères dépendant qui correspond en cas particulier à l'usure en dépouille et/ou en cratère (V_B , K_T)).
- Les efforts de coupe définissant la résistance de la coupe et qui sont considérés comme un indicateur à la puissance nécessaire de la coupe. Dans la coupe longitudinale en tournage, généralement l'effort le plus important est l'effort de coupe tangentiel.
- La qualité de la surface usinée, notamment la rugosité qui définit l'aptitude de la surface de fonctionnement et permet de choisir les conditions de coupe en fonction de la destination finale de la pièce usinée.
- Le fractionnement des copeaux.
- La température de coupe.
- La productivité qui se rapporte à la plupart des paramètres précédents.

I.2.3. Facteurs influençant l'usinabilité

La facilité d'usinage d'un matériau est une fonction de nombreux paramètres métallurgiques complexes, l'élaboration du métal, sa composition chimique, ses caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques sont des principaux facteurs qui influencent l'usinabilité des matériaux [16,18].

I.2.3.1. Caractéristiques mécaniques et physiques

D'une façon générale, la résistance mécanique, ou plus particulièrement la dureté peut être considérée comme un indicateur significatif sur l'usinabilité d'un matériau. En principe, l'accroissement de la dureté du métal rend ce dernier plus usinable. Mais, ce principe reste valable pour les matériaux qui se caractérisent par une résistance mécanique jusqu'à 800 Mpa et n'est pas étendu à des résistances élevées. On trouve ce cas par exemple lors de l'usinage des aciers qui ont subi sous l'effet de traitement de trempe et de revenu, ces derniers possèdent une meilleure usinabilité que les aciers qui ont subi à un traitement de recuit en raison de leur dureté élevée. Contrairement à la notion précédente, la formule générale indique que l'élévation de la résistance à l'ordre de 1100 Mpa par exemple rend le matériau (acier) difficile à usiner et possédant un meilleur fractionnement des copeaux et un état de surface amélioré. Parmi les facteurs qui influencent l'usinabilité, on trouve l'écrouissage, ce dernier est un phénomène lié aux caractéristiques des métaux, il s'agit du comportement du métal sous l'effet des contraintes, généralement un métal se durcit sous l'effet des contraintes appliquées, mais il y a une différence de sensibilité pour chaque type de métal. D'une façon générale, l'écrouissage est favorable lors de l'usinage car il contribue à la facilité de fracture et à l'écrasement des copeaux et à leur dégagement par l'outil comme le cas des aciers doux étirés à froid utilisés en décolletage. Certains matériaux (métaux) présentent une sensibilité importante à l'écrouissage sous l'effet de coupe, ce qui conduit à l'accroissement de la dureté de la matière comme dans le cas des aciers inoxydables austénitiques, du nickel, du titane, et de leurs alliages. Dans le cas de l'usinage de ces derniers, il est préférable d'utiliser des profondeurs de passe élevées pour réduire l'effet d'écrouissage. Par contre, cette solution peut engendrer une entaille sur l'outil de coupe compatible avec la profondeur sélectionnée et par conséquent l'accélération de sa dégradation. Un autre paramètre peut affecter l'usinabilité, il est appelé la compatibilité métallurgique. Il s'agit de l'aptitude à la soudabilité de deux matériaux par diffusion (outil-matière). Globalement, une compatibilité importante peut conduire à des microsoudures et des arrachements dans la zone de contact, et par conséquent, à une usure rapide des outils par diffusion.

I.2.3.2. Caractéristiques thermiques

Les matériaux qui possèdent une conductivité thermique élevée permettent d'atteindre une bonne usinabilité que les matériaux qui se caractérisent par une faible conductivité car lors de l'usinage, les matériaux qui possèdent une faible conductivité ne dissipent pas rapidement la chaleur générée lors de la coupe et permettent de la concentration de cette dernière dans la zone de coupe (pièce-outil-copeaux). Ce qui conduit à la dégradation thermique dans la surface usinée et à l'accélération d'usure des outils de coupe.

I.2.3.3. Composition chimique

L'élément le plus important est le carbone, les aciers à faible teneur en carbone (<0.3%) conduit à une mauvaise usinabilité en raison de la structure de la ferrite qui se caractérise par une forte plasticité. Une forte plasticité engendre des efforts et des températures de coupe élevées sous l'effet de la coupe. Ce qui peut entraîner le phénomène de grippage et l'arrachement du métal qui présentent un état de surface rugueux. Par contre, les aciers à

moyenne teneur en carbone (0.3% - 0.6%) possèdent une meilleure usinabilité en raison de compromis convenables entre la plasticité de la ferrite et la ténacité de la perlite. L'accroissement de la teneur en carbone atténue l'effet de la plasticité et permet de former des plages de perlite qui donnent des solutions de continuité dans la matière de la ferrite. Ce qui conduit à un optimum usinabilité avec des aciers demi-durs à un pourcentage de 0.35 % en carbone. Une augmentation supplémentaire de la teneur en carbone (> 0.6 %) décroît de l'usinabilité et rend le matériau plus dur car le taux de perlite accroît la ténacité de l'acier par rapport à la plasticité, ce qui entraîne l'usure accélérée des outils. À dureté comparable, la nature, la morphologie et la répartition des constituants permettent de modifier l'usinabilité des matériaux. Le choix des traitements thermiques appropriés est de grande importance car ces derniers ont une influence sur la taille, la grossièreté et la répartition des grains et en conséquence permettent de la variation d'usinabilité. Par exemple, le traitement de recuit (globulisation) des aciers à grande teneur en carbone contribue à l'amélioration de la durée de vie des outils puisque la structure globulaire est favorable pour les opérations de tournage. Ainsi que, le traitement de recristallisation permet d'éliminer l'effet d'écrouissage lorsque ce dernier est indésirable.

I.2.4. Paramètres technologiques

Une bonne connaissance des phénomènes régissant le processus de coupe tels que les efforts de coupe, la rugosité de surface et l'usure des outils de coupe présente un bon indicateur sur l'usinabilité d'un matériau.

I.2.4.1. Efforts de coupe

La majorité des travaux relatifs à la modélisation du processus de coupe concerne la prédiction des efforts de coupe générés par l'outil de coupe et appliqués sur la pièce. Les efforts de coupe sont l'origine de déformations plastiques de la pièce pendant la coupe, ce qui conduit en conséquence à l'élévation de la température dans la zone de déformation. La prévision et la connaissance des efforts de coupe nous renseignent principalement sur la puissance mécanique nécessaire pour l'enlèvement de la matière. Elle permet de délimiter la zone de coupe en choisissant des valeurs des efforts de coupe acceptables pour l'outil, de dimensionner les organes de la machine, d'intervenir dans la précision d'usinage et dans l'apparition des vibrations dans la machine, au broutage. D'une façon générale, les études indiquent que les efforts de coupe sont affectés principalement par l'évolution de la profondeur de passe. Mais contrairement au précédent, l'effet de la vitesse de coupe est moins significatif. Donc, la mesure des efforts de coupe contribue de manière décisive à l'étude du processus de coupe et de leur évolution. Dans ce cadre, deux appareils fondamentaux de mesure peuvent être utilisés :

- **Dynamomètre statique** : Il est utilisé pour mesurer les trois composantes des efforts de coupe (F_V , F_R , F_T). L'outil de coupe est posé sur l'appareil de mesure pour mesurer les actions agissantes directement par l'outil sur la pièce dans le cas de tournage. Pour le cas de fraisage ou de rectification, la pièce est posée sur le dynamomètre, et ce dernier prend la mesure des réactions de l'outil à partir de la pièce pendant la rotation.

- **Dynamomètre rotatif** : Il est utilisé principalement pour mesurer le couple s'exerçant sur l'outil. La mesure de cette dernière est considérée comme un critère d'évaluation important. Il est utilisé notamment dans le processus de fraisage et de perçage par le positionnement du capteur (dynamomètre) directement sous l'outil pendant la rotation.

Le dynamomètre décompose l'effort intervenant lors du processus de tournage en 3 composantes principales :

- **L'effort de coupe tangentiel (F_T)**

Appelé aussi l'effort principal de coupe. C'est l'effort parallèle à la tangente à la surface de la pièce au niveau de la pointe de l'outil. Il représente un impact très important pendant les opérations de coupe.

- **L'effort de coupe axial (F_V)**

Il correspond à la force appliquée sur l'outil parallèlement à l'axe de rotation de la pièce à usiner. Il est pratiquement nul pendant la configuration de la coupe orthogonale et peut être important dans le cas de la coupe longitudinale et appelé aussi l'effort d'avance.

- **L'effort de coupe radial (F_R)**

Il est défini comme l'effort parallèle au rayon de la pièce, est appelé aussi l'effort de pénétration ou de refoulement. Généralement, il n'a aucune importance et effet pendant la coupe longitudinale. Il est perpendiculaire aux axes des deux efforts précédents. La figure I.3 présente les différents composants de l'effort de coupe affectant sur l'outil pendant la coupe orthogonale dans le cas de tournage [2].

$$\text{On donne : } F = \sqrt{F_V^2 + F_R^2 + F_T^2} \quad (\text{I.1})$$

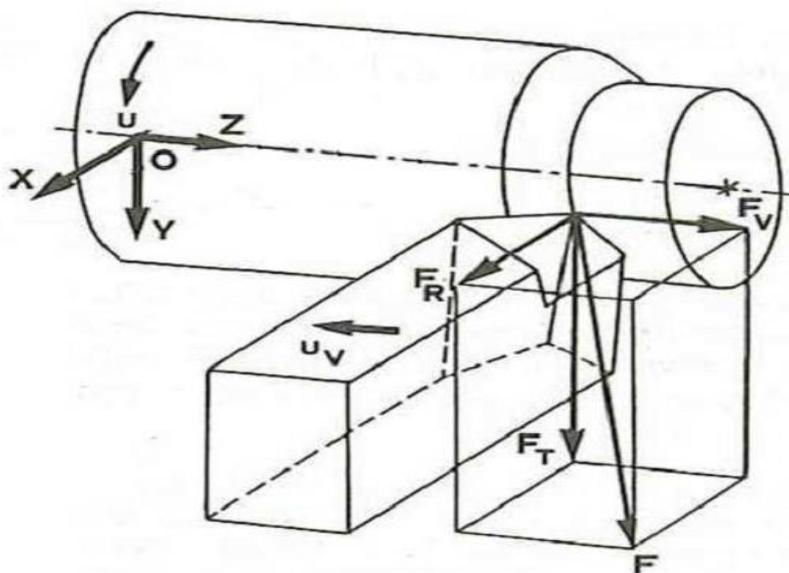


Fig.I.3. Effort de coupe résultant F et leurs composants (F_T , F_V , F_R) pendant le tournage longitudinal.

La valeur approximative de l'effort de coupe en tournage dépend de la résistance à la rupture par compression, des dimensions du copeau, de la nature de la matière utilisée et de son usinabilité. Ainsi, elle concerne la forme de l'outil coupant et le type d'opération réalisé. Pour les besoins de calcul qui concernent la valeur de l'effort principal de coupe lors du tournage, on donne la relation approximative suivante [19] :

$$F_T = R_r \times S \times K \quad (I.2)$$

Avec, R_r : est la résistance spécifique à la rupture par compression.

S : est la section du copeau définie par la profondeur de passe (a) et l'avance par tour (f) selon la relation suivante : $S = a \times f$ (I.3)

K : le coefficient qui prend en compte l'usinabilité de la matière, de l'épaisseur du copeau (il est important lors de l'usinage en ébauche qu'en finition), et de la géométrie de l'outil de coupe.

Généralement, le coefficient K prend ses valeurs entre (2.5 et 4) pour les aciers, et entre (4 et 5) pour les fontes.

I.2.4.2. Puissance de coupe

L'un des principaux éléments qui va limiter les paramètres de coupe est la puissance de la machine. La connaissance de la puissance de coupe nécessaire lors de la coupe joue un rôle fondamental notamment pendant les opérations de l'usinage en ébauche. Lors de la coupe longitudinale en tournage, la puissance nécessaire à l'usinage est liée à la rotation de la broche et de l'avance du traînard selon la relation suivante [19] :

$$P_c = F_T \times V_c + F_V \times V_f \quad (I.4)$$

Avec,

P_c : la puissance consommée par la coupe en W.

F_T : l'effort de coupe tangentiel en N.

F_V : l'effort axial en N.

V_c : la vitesse de coupe tangentielle en m/s.

V_f : la vitesse d'avance en m/s.

Si on estime que : $F_V = 0.2 F_T$ et que $V_c \gg V_f$, on obtient sur la formule suivante :

$$P_c = F_T \times V_c \quad (I.5)$$

Lorsqu'on prend V_c en m/min, la relation précédente devient comme la suivante :

$$P_c = F_T \times V_c / 60 \quad (I.6)$$

Lorsqu'on prend en compte la valeur de F_T , alors on obtient sur la formule détaillée suivante :

$$P_c = V_c \times K \times R_r \times S = V_c \times K \times R_r \times a \times f \quad (I.7)$$

I.2.4.3. États de surface

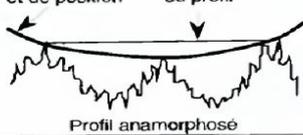
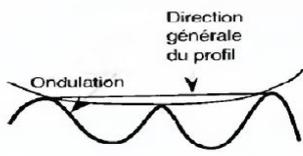
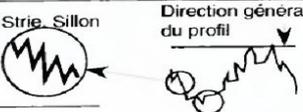
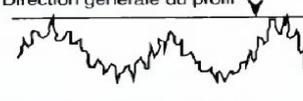
I.2.4.3.1. Introduction

Généralement, on appelle états de surface, les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (moulage, usinage, etc.). La notion de la qualité de surface dans le cas des matériaux composites concerne aussi de différents phénomènes qui entrent sous la définition de l'intégrité de surface qui sont considérés comme un indicateur sur les changements chimiques et physiques de la couche superficielle après l'usinage et qui contiennent les différents types d'endommagement induits par la coupe. En général, l'étude de la qualité de surface s'attache à deux notions, la morphologie ou texture et l'intégrité de la surface. Les deux notions sont reliées de nombreuses caractéristiques de la pièce et du processus de coupe effectués telles que la vitesse de coupe, l'avance par tour, le type et la teneur en fibres, l'orientation des fibres, le contenu et le type de la matrice. Dans ce cadre, on s'intéresse principalement à la morphologie et la texture de surface qui est liée aux caractéristiques géométriques de la surface usinée et qui est considérée comme une fonction de la géométrie d'outil, la cinétique et les mouvements du processus d'usinage, et la rigidité de l'outil-machine. La caractérisation et la quantification de la qualité de surface usinée et l'effet de différents paramètres du processus qui contribuent à la formation de cette dernière sont considérés comme des facteurs nécessaires pour décrire la morphologie de la surface usinée et l'aptitude du produit fini pour une fonction donnée. Mais avant tout, il faut mieux comprendre les principaux défauts qui concernent la notion de l'état de surface et qui se composent classiquement en deux échelles et en quatre catégories principales [20,21].

1. L'échelle macroscopique : Elle caractérise les défauts macro géométriques à grande amplitude des premiers et deuxièmes ordres qui concernent les défauts de forme tels que les défauts de rectitude, de circularité, de cylindricité, de planéité et les défauts d'ondulation. Ils apparaissent généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice.

2. L'échelle microscopique : Elle concerne les écarts micro géométriques à faible amplitude du troisième et quatrième ordre et qui caractérisent les défauts de la rugosité et des arrachements. Ils apparaissent principalement aux défauts de l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage, aux grenailages, aux vibrations de la machine et encore aux piqûres de la corrosion dans le cas des métaux. Le tableau I.5 résume les principaux défauts de l'état de surface et de son ordre et leur signification par rapport aux fonctions possibles.

Tableau I.5. Principaux défauts de l'état de surface et son ordre [20].

ORDRE	DESIGNATION	ILLUSTRATION	SURFACE SPECIFIEE	
			Dessin d'exécution	Signification par rapport à la fonction
1	ECART DE FORME Exemple : - Ecart de rectitude - circularité - etc.	Ecart de forme et de position Direction générale du profil  Profil anamorphosé	PRESCRIPTION GEOMETRIQUE (voir N F E 04-552)	Les 1 ^{er} et le 2 ^e ordres influent sur : • le frottement de glissement et de roulement, • la résistance au matage, • l'étanchéité dynamique et statique,
	ONDULATION	Direction générale du profil Ondulation  Profil anamorphosé	SYMBOLISATION DES ECARTS GEOMETRIQUES Du 2 ^e au 4 ^e ordre	• le résultat des mesurages, • etc. Ils créent : • une usure, • un grippage. Ils diminuent : • le durée de vie des organes, • etc.
3	RUGOSITE	STRIE, SILLON (périodique ou pseudo-périodique)  Strie, Sillon Direction générale du profil	(voir N F E 05-016)	Les 3 ^e et 4 ^e ordres influent sur : • l'écoulement des fluides, • l'étanchéité dynamique et statique, • le revêtement, • le dépôt électrolytique • la résistance aux efforts alternés...
4		Arrachement Marque d'outil, fente, piqûre... (apériodique)  Marque d'outil Arrachement		
Somme des écarts du 1 ^{er} au 4 ^e ordre	PROFIL TOTAL	Direction générale du profil  Profil anamorphosé	Ensemble des défauts de surface dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une fonction donnée.	Il ne sert à rien d'affiner la rugosité si l'écart de forme et l'ondulation ne sont pas réduits au niveau admissible pour une fonction donnée

I.2.4.3.2. La rugosité : Les relevés de la rugosité de surface usinée des composites constituent un bon indicateur sur l'évolution de son endommagement et de l'état d'usure des outils de coupe utilisés. On désignera par (Rugosité) le relief ou le phénomène conduisant à l'apparition d'un relief sur la surface d'un matériau. La figure suivante montre la présentation graphique de la rugosité [22].

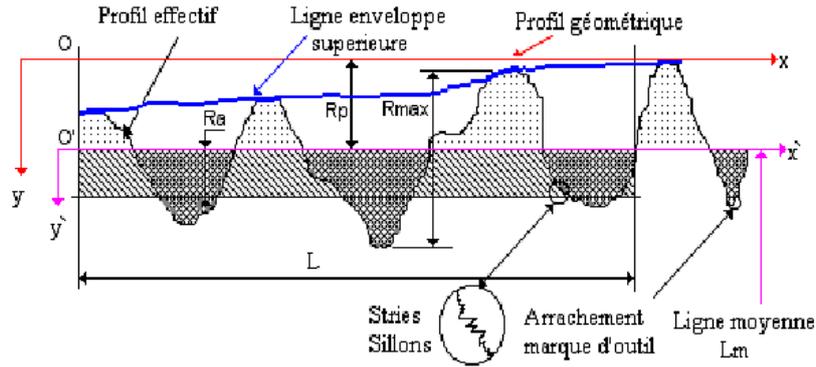


Fig.I.4. Présentation graphique de la rugosité.

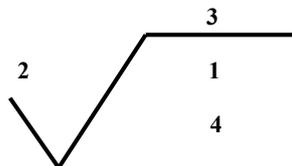
- Indication de la rugosité de surface

Généralement, la désignation de la rugosité de surface est codifiée selon des normes. Pour cela, les tableaux I.6 et I.7 présentent l'indication de la rugosité par des symboles [20] et des numéros de classe successivement.

Tableau I.6. Ancienne désignation de la rugosité de surface: Correspondance.

Désignation suivant NF E 05-016		Valeurs de Ra équivalentes (µm)	
Ancienne	ISO 1.302		
		Non défini	Surface usinée par enlèvement de la matière.
		10 < Ra < 50	
		3.2 < Ra < 10	
		0.8 < Ra < 2	
		0.1 < Ra < 0.25	

Symbole de base : Il est constitué de deux traits obliques de longueur inégale et d'un trait horizontal.



Avec :

- 1: abréviation de la fonction (frottement de glissement, frottement de roulement, étanchéité statique ou dynamique, ... etc.).
- 2: symboles et valeurs numériques des critères choisis.
- 3: abréviation du procédé d'élaboration.
- 4: spécifications complémentaires (conditions de mesure...).

Parfois la rugosité de surface est indiquée par un numéro de classe, le tableau ci-dessous donne les numéros de classe utilisés et les valeurs de la rugosité correspondantes.

Tableau I.7. Indication de la rugosité par des classes.

Valeurs de la rugosité Ra		Numéros de la classe de rugosité
μm	μin	
50	2000	N12
25	1000	N11
12.5	500	N10
6.3	250	N9
3.2	125	N8
1.6	63	N7
0.8	32	N6
0.4	16	N5
0.2	8	N4
0.1	4	N3
0.05	2	N2
0.025	1	N1

I.2.4.3.3. Critères de la rugosité de surface

Selon les méthodes de séparation des écarts géométriques, on peut déterminer ou distinguer de nombreux paramètres de la rugosité, qui sont définis suivant la ligne moyenne, les motifs et la courbe de portance du profil. En général, les paramètres de la rugosité sont codifiés dans les normes ISO 4288, 4287-1 et DIN 4768. Les paramètres suivants sont définis sur une longueur d'évaluation L qui comporte n longueurs de base l . Selon la normalisation ci-dessus, les principaux critères de la rugosité sont définis comme suite [18, 20, 21]:

- **Écart moyen arithmétique de la rugosité (Ra)** : est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées y (x) du profil à l'intérieur de la longueur d'évaluation L , comme le montre la figure suivante :

$$R_{aj} = (1/l) \int_0^l |y| dx \quad (\text{I.8})$$

$$Ra = 1/n \sum_{j=1}^n R_{aj} \quad (\text{I.9})$$

- **Hauteur maximale de saillie (Rp)**: Elle est définie par la formule suivante :

$$Rp = 1/n \sum_{j=1}^n Rp_j \quad (\text{I.10})$$

Avec, Rp_j : est la distance de la hauteur entre la ligne des saillies et la ligne moyenne du profil pour une longueur L .

- **La rugosité totale (R_t)**: est la distance maximale de la hauteur entre la ligne des saillies et la ligne des creux dans la longueur de base L , ou la somme de plus grande des hauteurs de saillie du profil et de la plus grande des profondeurs de creux du profil à l'intérieur de la longueur d'évaluation.

- **Maximum des irrégularités de la hauteur du profil (R_{max})**: généralement, on prend même définition mais la distance maximale de la hauteur est entre la ligne de saillies et de creux consécutifs.

- **Hauteur des irrégularités sur dix points (R_z)**: est la distance moyenne de la hauteur entre les cinq points les plus hautes des saillies et la profondeur des cinq points les plus bas des creux, se trouvant dans les limites de la longueur de base, mesurée à partir d'une ligne parallèle à la ligne moyenne et ne coupant pas le profil. Elle est définie selon la formule suivante :

$$R_z = 1/5 [(y_{p1} + y_{p2} + y_{p3} + y_{p4} + y_{p5}) - (y_{v1} + y_{v2} + y_{v3} + y_{v4} + y_{v5})] \quad (I.11)$$

Cette définition de R_z entre sous la norme ISO 4287/1, mais il existe une autre définition de R_z qui se trouve sous la norme DIN 4768. Sous cette norme, la rugosité moyenne R_z est la moyenne arithmétique des profondeurs de la rugosité de cinq zones d'évaluation successives d'une longueur égale à la longueur de base l .

On donne :

$$R_z = 1/5 \sum_{i=1}^5 Z_i \quad (I.12)$$

Avec, Z_i : est la distance de la hauteur entre deux points successifs des saillies et des creux.

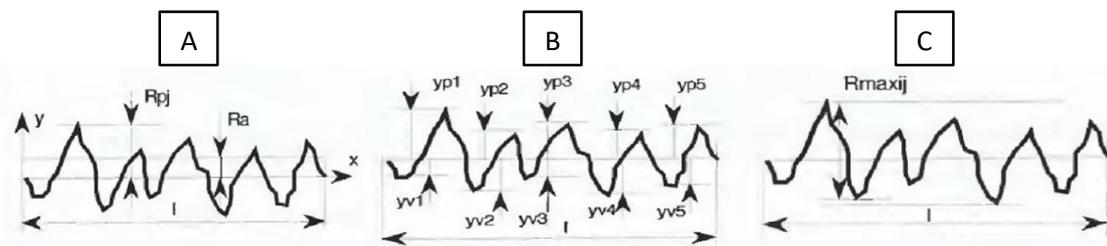


Fig.I.5. Illustration graphique de différents critères de la rugosité : (A) R_a et R_p , (B) R_z , (C) R_{max} .

I.2.4.3.4. Paramètres affectant la qualité de surface

La réalisation d'un usinage de qualité est liée de nombreux facteurs complexes et subintrants. Pratiquement, la qualité de surface obtenue lors de l'usinage se concerne principalement aux caractéristiques de la machine, de la structure de la pièce usinée, de la coupe et de la nature de des outils de coupe utilisés. Par exemple, la considération des amplitudes des vibrations de la machine, de la géométrie et de la matière des outils de coupe avec des revêtements compatible au matériau usiné (rayon de bec, rigidité, dureté,...), de la stratégie, des données et des conditions de coupe (finition, ébauches, avances, lubrification,...) relatives à l'objectif de la qualité sont des facteurs qui possèdent un rôle principal et décisif pour déterminer l'évolution de la qualité de surface désirée lors de l'usinage par l'enlèvement de la matière. Le diagramme d'Ishikawa (cause-effet) ci-dessous présente les différents paramètres qui peuvent influencer l'intégrité de la surface usinée [18].

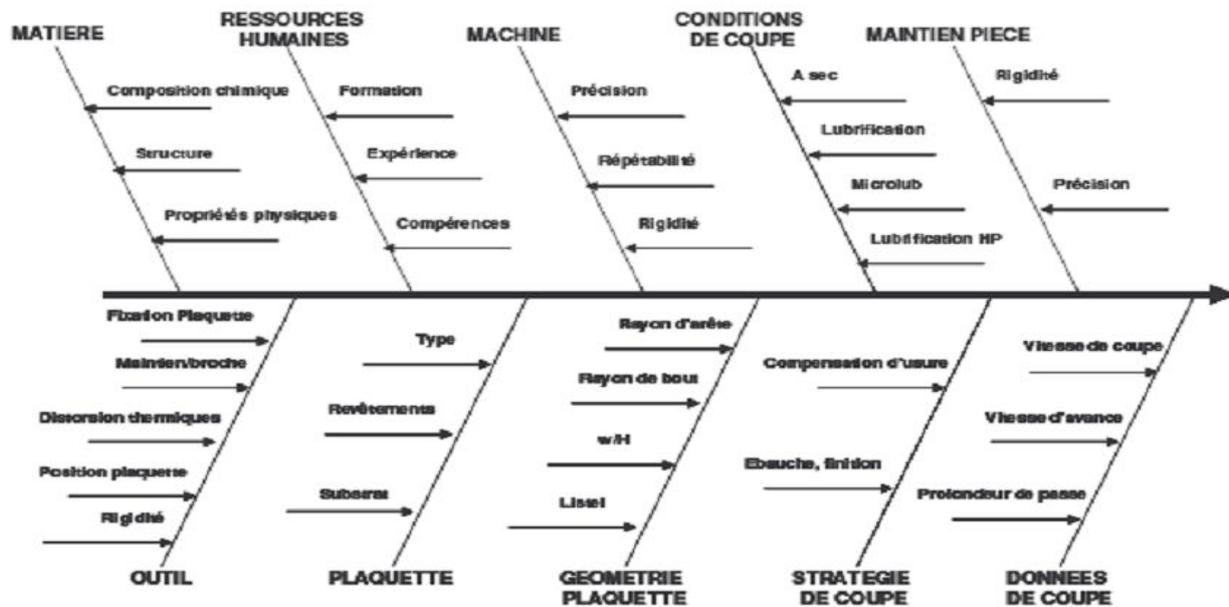


Fig.I.6. Différents facteurs influençant l'intégrité de surface lors de l'usinage [18].

I.3. Généralités sur la mise en forme par usinage des matériaux composites

I.3.1. Introduction

Malgré, le développement croissant enregistré dans les procédés d'élaboration des matériaux composites pour l'objectif d'assurer la forme désirée complètement avec des propriétés bien précises (densité, résistance mécanique). Cependant, la solution usinage des matériaux composites reste proposée, notamment lors des opérations de finition. La compréhension des mécanismes d'usinage de ces matériaux concerne principalement la connaissance de leurs propriétés structurales (type de matrice, type de fibre et l'interface fibre-matrice) et de leurs propriétés physiques, chimiques, mécaniques et thermiques. L'usinage des matériaux composites par des méthodes classiques propose de nombreux défis liés à l'hétérogénéité et l'anisotropie (cas des fibres orientées) de ces derniers. Les phénomènes qui s'attachent à l'usure des outils de coupe (en cas particulier les outils en acier rapide) en raison de l'effet abrasive des fibres de verre comme un exemple, l'arrachement et la fracture des fibres, la fusion d'une matrice thermoplastique et la carbonisation d'une matrice thermodurcissable, le délaminage ou décohésion de l'interface fibre-matrice peuvent se traduire à des obstacles ou difficultés réels pour atteindre à des états de surface usinée adoptés avec une usure des outils modérés.

I.3.2. Tournage des matériaux composites à matrice polymère et renfort fibreux (FRP)

L'usinage par enlèvement de la matière est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision à partir des pièces moulées ou extrudées. Parmi les procédés d'usinage les plus importants, on trouve le tournage qui concerne principalement à l'usinage des pièces de révolution. Nombreux pièces axisymétriques de structure des matériaux composites à matrice polymère et renfort fibreux (FRP) sont usinés en tournage par des opérations de finition. Ces derniers consistent à usiner plusieurs types des pièces mécaniques telles que les essieux, les arbres, les roues dentées, les paliers, les roulements, bielles de direction, et leviers d'arbres, ... Le développement dans la technologie d'enroulement ou de bobinage des filaments a facilité l'utilisation croissante de ces pièces dans l'industrie de la construction mécanique et des applications de transport. En conséquence, le tournage est devenu un processus important et nécessaire pour l'usinage de finition des pièces à haute précision et des zones de joint extrêmement précises. Pour cela, une connaissance approfondie du comportement des pièces composites lors du tournage est nécessaire pour leur application réussie. L'usinabilité des composites lors du tournage souvent a été étudiée en termes de l'usure des outils, les efforts de coupe, la température de coupe, et la qualité de surface, type et orientation des fibres, et la fraction du volume sont les propriétés les plus significatives qui influencent l'usinabilité de ce type des matériaux [3].

I.3.3. Comportement des matériaux composites lors de l'usinage

Les caractéristiques principales d'un matériau composite qui possèdent une influence sur la performance des opérations d'usinage sont les suivantes [23] :

I.3.3.1. Hétérogénéité : Généralement, un matériau composite se compose d'une matrice polymère contenant un réseau des fibres. C'est-à-dire, l'usinage des matériaux composites à l'échelle microscopique signifie l'usinage de deux matériaux de nature différente (matrice et fibre). D'autre part, un matériau composite peut contenir plus d'un type de renfort. Ce qui peut se traduire lors de la coupe à la création des poudres contrairement à l'usinage des matériaux traditionnels. Donc, il faut penser que l'usinage de ce type des matériaux peut conduire finalement à un court-circuit en raison de la conductivité électrique qui caractérise certains types de renfort tels que les fibres de carbone ou un effet très abrasif (fibres de verre). Ce qui propose des difficultés supplémentaires pendant l'usinage des composites.

I.3.3.2. Anisotropie : Pour les matériaux composites à fibres orientées, on peut distinguer un comportement différent selon le sens de coupe envisagé en raison de la structure anisotrope qui caractérise ce type des matériaux en comparaison avec d'autres matériaux (métaux, renforcement aléatoire,...). Par exemple, le sens de coupe envisagé par rapport à une orientation de fibres égale à 90° pose un problème de la rigidité plus important en comparaison avec celle obtenue pour une orientation de fibres nulles. Ce qui peut conduire lors de l'usinage à des phénomènes non souhaités tels que (délaminage, flambage, flexion,...).

I.3.3.3. Dégradation thermique : Les matériaux composites à matrice polymère se caractérisent par l'isolation thermique, sauf ceux chargés de particules métalliques ou renforcés par des fibres de carbone. Ce qui permet de concentrer la chaleur créée lors de l'usinage dans la zone de coupe. Le dégagement excessif de la chaleur pendant l'opération de l'usinage peut conduire à une déformation thermique importante et par conséquent à une fusion de la matrice thermoplastique et une carbonisation de la matrice thermodurcissable.

I.3.3.4. Usure des outils : Les études indiquent que les outils de coupe en carbures de tungstène ou en diamant polycristallin sont préférables pour la coupe des matériaux composites renforcés en fibres de verre ou de carbone. Particulièrement, la présence des fibres de verre dans les composites engendre une usure prématurée des outils traditionnels (aciers rapides,...).

I.3.4. Phénomènes lors de l'usinage des matériaux composites

Les efforts mécaniques et thermiques que subit la structure d'un matériau composite renforcé par des fibres engendrent des endommagements critiques lors de leur usinage. Ces endommagements se manifestent sous nombreuses formes et les plus fréquents sont [5] :

I.3.4.1. Peluchement : est un dommage apparaît lors de l'usinage des matériaux composites et plus particulièrement pendant l'usinage des composites renforcés par des fibres d'aramide. Il se caractérise principalement par une mauvaise découpe par l'outil. Généralement, les fibres coupées possèdent un aspect effiloché avec un flaconnage de la surface usinée. Ce phénomène se manifeste essentiellement pendant les opérations de fraisage et de perçage.

I.3.4.2. Arrachement des fibres : Avant que les fibres coupées ne soient rompues par cisaillement, l'orientation relative des fibres par rapport à la direction de l'arête de coupe peut conduire à l'apparition de l'arrachement des fibres. En d'autres termes, les fibres sont sous

l'impact des efforts importants, ce qui peut engendrer l'arrachement des morceaux de fibres et de la matrice. Ce dernier permet de la contribution dans l'apparition des cavités dans la surface usinée, et plus particulièrement, on trouve ce phénomène dans le cas du perçage où on remarque une détérioration critique dans la paroi du trou. Cet endommagement se manifeste de manière répétitive notamment lors de l'usinage des composites à fibres fortement orientées.

I.3.4.3. Décohésion de l'interface fibre-matrice : Le fléchissement des fibres sous l'impact de la poussée de l'arête de coupe au niveau de la surface usinée conduit à un déplacement relatif des fibres en comparaison avec la matrice assimilable à un glissement. Ce qui peut engendrer la décohésion de l'interface fibre-matrice. Ce phénomène se manifeste principalement sous forme de décollement de la matrice des morceaux de fibres entiers non rompus.

I.3.4.4. Délaminage : est un défaut de décohésion commun entre toutes les composites à forme stratifiée. Il apparaît soit entre les couches de renfort ou au niveau des interfaces où la résistance mécanique est le plus faible vis-à-vis à l'effort appliqué. Il est généralement entre au moins deux plis successifs d'un composite stratifié et peut être soit sous forme visible (arrachement de couches) ou interne (dissociation entre deux couches). Le mécanisme de délaminage se caractérise par la formation des fissures entre les plis dans la structure du matériau composite. Cet endommagement se manifeste particulièrement dans le cas des opérations de perçage et plus précisément dans l'entrée et la sortie du trou. Pendant l'entrée du foret dans la matière du composite, le mouvement de rotation concerné à l'inclinaison de l'hélice a tendance à pousser le matériau vers le haut. Ces actions combinées à créer une force de pelage verticale séparant les couches supérieures de la plaque. Le facteur qui définit l'apparition de délaminage à la sortie du foret est la valeur de l'effort de pénétration. Ce défaut peut apparaître aussi dans le cas de fraisage et peut prendre la forme de déchaussement complète des fibres, plus particulièrement au début et à la fin des prises de passe de contournage lorsque la fraise entre ou sort de la pièce. Le délaminage peut être représenté en fonction de l'orientation des fibres dans le cas de rabotage par des morceaux de fibres qui sont poussés et ne sont pas coupés ou écaillés à la fin de l'usinage. Particulièrement, on trouve ce phénomène pendant le perçage des abords des surfaces libres du composite, le délaminage qui conduit à la déchirure complète de morceaux de plis est appelé écaillage.

I.4. État de l'art sur l'usinage des matériaux composites

Dans cette partie, on va présenter principalement les travaux de recherche liés à l'usinage des matériaux composites à matrice polymère renforcée en fibres de verre en cas général et du polyamide renforcé en 30 % de fibres de verre en cas particulier. L'objectif de ce travail est de comprendre le cadre de cette étude et d'analyser les articles publiés dans ce domaine afin d'extraire les principaux résultats qui concernent l'usinage de ce type des matériaux. Dans ce cadre, on a trouvé que nombreux chercheurs ont étudié l'impact de la matière à usiner, de la géométrie, le type et l'usure des outils et les paramètres de coupe optimaux sur l'usinabilité de tels matériaux. Plusieurs articles ont été publiés dans ce domaine, parmi eux on cite :

Leonardo R. Silva et al. [24] ont présenté une recherche sur l'effet de la géométrie de l'outil sur l'usinabilité des polyamides (PA66) et leur composite (PA66-GF30). Ils ont comparé les performances des outils de carbure non revêtus avec une géométrie de coupe standard et des outils avec une préparation de bord modifiée lors du tournage de précision. Les résultats indiquent que, en général, les valeurs des efforts de coupe en tournage (l'effort de coupe tangentiel, l'effort d'avance, l'effort radial) sont réduites avec la diminution du rayon de bec de l'outil. Par contre, l'effort de coupe spécifique (K_s) est diminué lorsque l'avance par tour est élevée, présentant des valeurs comparables pour les alliages métalliques. En plus, le polyamide sans renforcement a présenté une multiplication par trois de l'effort de coupe spécifique (K_s) par rapport au composite renforcé. Enfin, la rugosité de surface augmente lorsque l'avance est élevée et le rayon de bec de l'outil est réduit. Le tableau I.8 illustre les différents paramètres de la géométrie des outils de coupe utilisés. Les résultats de l'effet de l'avance et du rayon de bec sur la rugosité de surface sont présentés dans la figure I.7.

Tableau I.8. Géométrie des outils de coupe.

La matière et la géométrie des outils	L'angle de coupe $\gamma(^{\circ})$	L'angle de dépouille $\alpha(^{\circ})$	L'angle de direction d'arête $X(^{\circ})$	L'angle d'inclinaison d'arête $\varphi(^{\circ})$	Rayon de bec r (mm)
Carbure non revêtu ISO K15 DCMW 11T3 04 H13A	0	7	93	0	0.4
Carbure non revêtu ISO K15 DCMW 11T3 02 SM10	0	7	93	0	0.2
Carbure non revêtu ISO K15 DCMW 11T3 02 SM10- (modif)	0	7	96	0	aigu

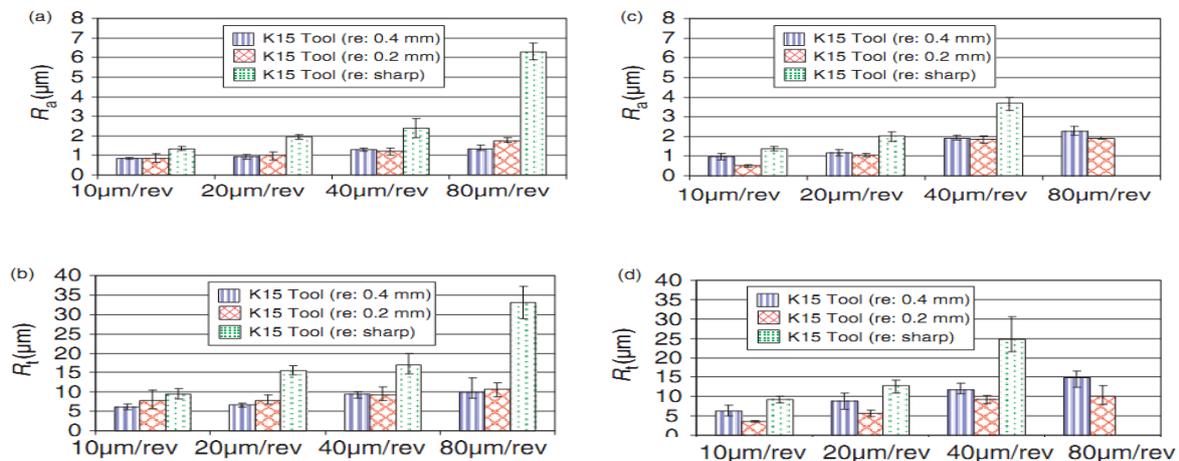


Fig.I.7. Effet de l'avance et le rayon du bec sur la rugosité de surface dans le cas du PA66-GF30 (a et b) et dans le cas du PA66 (c et d).

Leonardo R. Silva et al. [25] ont fait une étude expérimentale préliminaire basée sur la théorie de Merchant appliquée au tournage orthogonal de précision du (PA 66) polyamide avec et sans renforcement de 30% de fibres de verre. Les valeurs distinctes de l'avance ont été testées en utilisant l'outil de carbure non revêtu, catégorie K15 sans brise-copeaux. Le but de cette étude est d'évaluer le taux de compression des copeaux (R_c), la déformation de copeaux (ε), l'angle de frottement (ρ), l'angle de cisaillement (φ), la contrainte normale (σ) et la contrainte de cisaillement (τ). En général, les résultats indiquent que :

1. L'addition de 30% de fibres de verre du renfort en polyamide PA66 significativement affectée sur les paramètres analysés (l'effort principal de coupe et d'avance, taux de compression des copeaux, la déformation des copeaux, angle de plan de cisaillement, et les efforts normaux et de cisaillement).
2. En général, la force de coupe a présenté les valeurs les plus élevées. En plus, les forces enregistrées lors de la coupe du polyamide renforcé étaient inférieures comparé au polyamide sans renforcement de fibres de verre.
3. Les corrélations entre le taux de compression des copeaux et l'angle du plan de cisaillement ou de déformation des copeaux ont été obtenues pour les deux matériaux. L'angle de cisaillement a diminué avec le taux de compression des copeaux. En revanche, la déformation des copeaux augmente avec la compression des copeaux.
4. Le modèle de Merchant a fourni des valeurs proches de celles obtenues expérimentalement, en cas particulier lors de l'usinage du PA66-GF30 composite.
5. Les valeurs de contraintes normales qu'elles ont été obtenues plus élevées par rapport à la contrainte de cisaillement. Les contraintes ont diminué avec une augmentation de l'avance.

V. N. Gaitonde et al. [26] ont réalisé une étude afin d'évaluer le micro-usinage du polyamide renforcé par 30% de fibres de verre (PA66 GF30) dans le cas de tournage et en utilisant un outil de diamant polycristallin (PCD). Les expériences ont été planifiées selon un plan factoriel complet des expériences (FFD). Les effets de la vitesse de coupe et de l'avance sur l'effort de coupe, la rugosité de surface, la pression de coupe spécifique, et la puissance de coupe ont été étudiés. Aussi, un développement d'un modèle mathématique de second ordre en utilisant la méthodologie de la surface de réponse (RSM) a été proposé.

L'analyse paramétrique révèle que l'effort de coupe, la rugosité de surface et la puissance de coupe augmentent avec l'avance, tandis que l'effort de coupe spécifique diminue avec l'augmentation de l'avance. À la base des résultats expérimentaux trouvés, des conclusions sont tirées :

1. L'ANOVA indique que les modèles quadratiques obtenus des différents paramètres de sortie sont adéquats à 99 % de l'intervalle de confiance.
2. Les valeurs de l'effort de coupe augmentent avec l'avance pour toutes les valeurs de la vitesse de coupe testées. En outre, l'effort de coupe décroît avec l'élévation de la vitesse de coupe.
3. La rugosité de surface diminue avec les basses valeurs de l'avance et les valeurs élevées de la vitesse de coupe.
4. L'effort de coupe spécifique est minimale à une avance de 60 micromètres/tr et une vitesse de coupe de 200 m / min.

5. La puissance augmente avec l'avance pour une valeur donnée de la vitesse de coupe. Les valeurs inférieures de la vitesse de coupe et de l'avance sont nécessaires pour minimiser la puissance de coupe. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures I.8 et I.9.

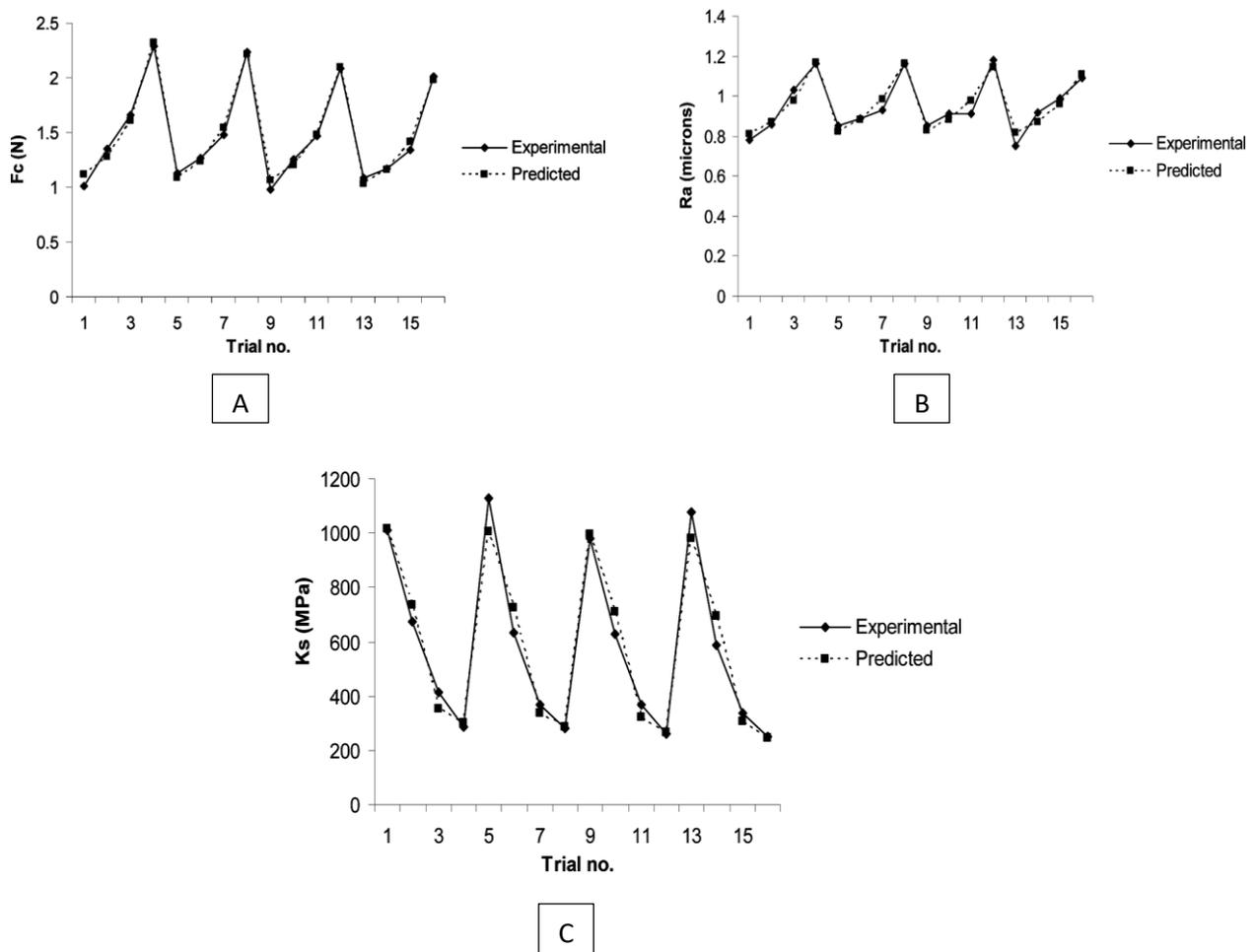


Fig.I.8. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour : (A) l'effort de coupe, (B) la rugosité de surface, (C) la force de coupe spécifique.

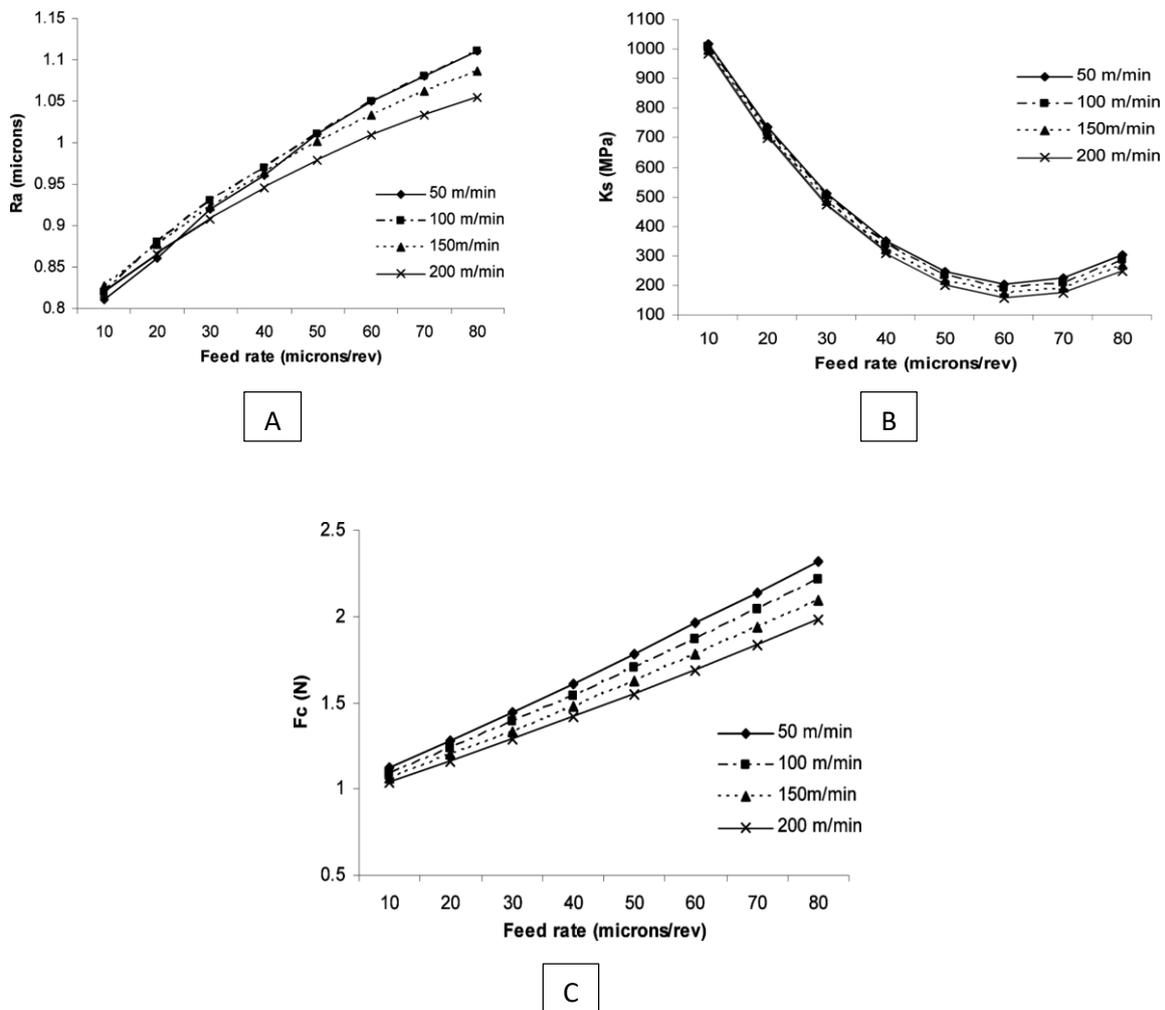


Fig.I.9. Effet de l'avance et de la vitesse de coupe : (A) sur la rugosité de surface, (B) sur la pression de coupe spécifique, (C) sur l'effort de coupe.

Vikki Franke [27] a présenté une étude qui concerne l'influence des paramètres de coupe, le contenu de fibres de verre dans la matière de la pièce et l'arête de coupe sur les résultats d'usinage pendant le perçage des thermoplastiques renforcés de fibres longues. L'arête de coupe a un grand impact sur la performance d'un outil de coupe lors du perçage des polymères renforcés par des fibres (FRP). Le délaminage, les bavures et les défauts à l'entrée et à la sortie du trou posent un défi lors du perçage de (FRP). Un modèle phénoménologique a été développé pour décrire l'influence de l'arête de coupe sur la qualité du trou. Le résultat le plus important est que les facteurs les plus significatifs qui influent sur la qualité du trou pendant le perçage des thermoplastiques renforcés de fibres longues sont l'effort d'avance et de séparation de fibres. Une augmentation de l'effort d'avance conduit à une diminution de la qualité du trou. Si le rayon de l'arête de coupe est plus grand que le diamètre des fibres, donc la séparation des fibres est sévèrement entravée. Ceci dégrade la qualité du trou. De toute évidence, et contrairement à la conception actuelle de perçage des métaux, l'application des outils avec une arête de coupe optimisée rondeur n'est pas la meilleure solution pour les

thermoplastiques renforcés de fibres. La haute qualité nécessaire pour percer LFT ne peut être réalisée avec des arêtes de coupe aiguës.

Else Eriksen [28] a abordé une recherche autour de l'influence des paramètres de production sur la rugosité de surface d'un matériau thermoplastique renforcé de fibres courtes (SFRTTP) lors de l'usinage. L'usinage relativement est une nouvelle méthode de fabrication pour les thermoplastiques renforcés de fibres courtes, et la théorie et l'expérience d'autres matériaux ne peuvent pas être directement appliquée. Il est donc nécessaire de mettre en place de nouvelles lignes directrices pour atteindre un résultat satisfaisant de l'usinage. Dans ce cadre, de nombreux essais ont été effectués par l'auteur pour étudier l'impact de l'avance, la vitesse de coupe, le rayon de bec de l'outil, l'orientation des fibres et les interactions entre eux sur la rugosité de surface d'un matériau SFRTTP pendant le processus de tournage. Les résultats obtenus sont résumés comme suit :

1. Il semble que possible de mettre en place des lignes directrices pour un usinage optimal de SFRTTP. Ces relations seront différentes de celles théoriques applicables pour la coupe des métaux.

L'influence des quatre paramètres étudiés sur la rugosité de surface a été comme suit :

2. La rugosité a augmenté pour une avance de supérieure à 0,1 mm/tr.

3. La rugosité a diminué pour un rayon croissant d'outil.

4. La rugosité a légèrement augmenté pour des vitesses de coupe jusqu'à 500 m/min. Pour des vitesses de coupe plus élevées jusqu'à 1500 m/min, la rugosité est indépendante de la vitesse de coupe.

5. La rugosité est indépendante de l'orientation des fibres.

6. Les résultats d'une opération d'usinage ne peuvent pas être applicables à un autre processus, même si le même outil est utilisé.

7. L'interaction entre les paramètres de production rend de plus compliqué à mettre en place des lignes directrices pour l'usinage.

Reedy Sreenivasulu [29] a fait une étude sur l'optimisation de la rugosité de surface et les dommages de délaminage d'un matériau composite à matrice polymère renforcée par des fibres de verre (GFRP) en fraisage de finition en utilisant la méthode de conception Taguchi et des réseaux de neurones artificiels (ANN).

Ce travail se concentre sur l'étude de l'influence de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur les dégâts de délaminage et la rugosité de surface. La méthode de Taguchi a été utilisée pour étudier les caractéristiques d'usinage de GFRP. D'après les résultats d'ANOVA, l'auteur a conclu que la vitesse de coupe et la profondeur de coupe sont les facteurs les plus importants qui affectent les réponses, leurs contributions ont été trouvées dans un ordre de 26,84 % et 40,44 % respectivement.

La comparaison des valeurs prédites avec les valeurs expérimentales à base de l'approche des réseaux de neurones artificiels a montré un bon accord entre les résultats des modèles prédictifs et les mesures expérimentales. Les méthodes utilisées et les principaux résultats obtenus sont exprimés dans les figures (I.10 à I.12) suivantes :

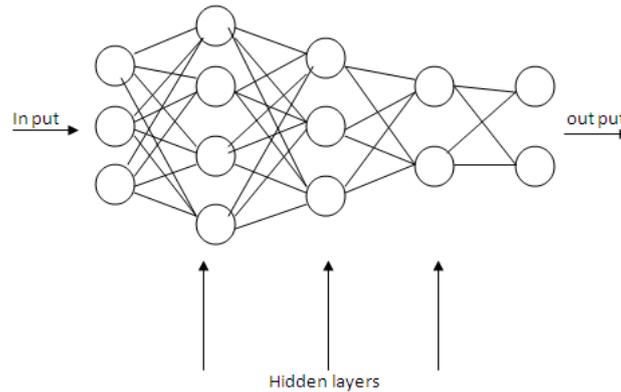


Fig.I.10. Architecture du réseau de neurone artificiel.

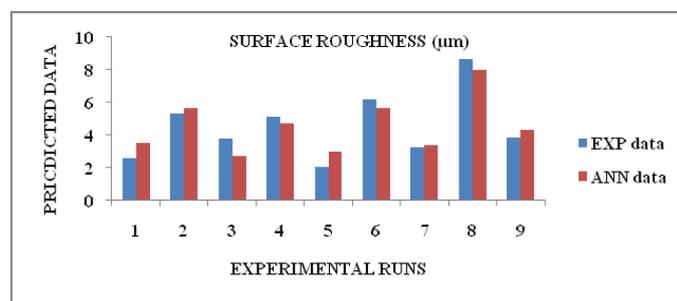


Fig.I.11. Comparaison entre les valeurs prédites et expérimentales de la rugosité de surface en utilisant ANN.

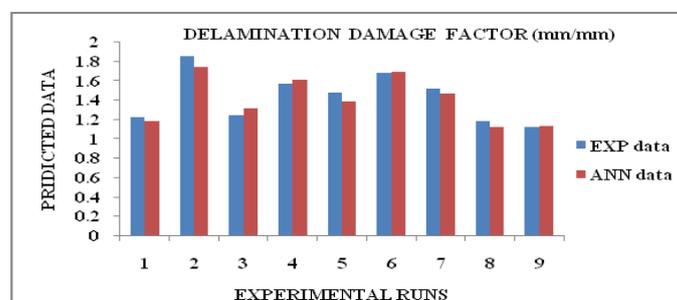


Fig.I.12. Comparaison entre les valeurs prédites et expérimentales pour le coefficient d'endommagement de délaminage en utilisant ANN.

Vinod kumar vankanti et Voncateswarlu Ganta [30] ont présenté une étude sur l'optimisation des paramètres du processus de coupe en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance, l'angle de pointe et la largeur du bord de pointe lors du perçage des polymères composites renforcés de fibres de verre (GFRP). La méthode de Taguchi a été utilisée pour étudier l'influence de diverses combinaisons des paramètres du processus sur la qualité du trou. Les résultats indiquent que l'avance est le facteur le plus important qui influe sur l'effort d'avance suivi par la vitesse de coupe, la largeur du bord de pointe et l'angle de pointe. La vitesse de coupe est le facteur le plus significatif qui affecte le couple de perçage suivi par l'avance, la largeur du bord de pointe et l'angle de pointe respectivement.

Cette étude est utile dans le choix des valeurs optimales de différents paramètres du processus qui non seulement de minimiser l'effort d'avance et de couple, mais aussi de réduire les dégâts de délaminage et d'améliorer la qualité du trou percé.

C. A. coceição Antonio et al. [31] ont étudié l'usinage des matériaux composites (polyéther éther cétone) en utilisant l'approche des réseaux de neurones artificiels (ANN) basée sur l'étude génétique. L'approche des réseaux de neurones artificiels a été utilisée pour modéliser le processus d'usinage pendant la coupe orthogonale des matériaux composites (PEEK). En considérant un ensemble des données expérimentales, la moyenne par rapport à l'erreur entre les résultats expérimentaux et numériques est utilisée pour surveiller le processus d'apprentissage afin d'obtenir l'intégralité de la modélisation du processus d'usinage. Cette approche d'apprentissage basée sur ANN et GA a présenté une faible moyenne d'erreurs relatives à l'apprentissage et la phase d'essai. Les principaux travaux et résultats obtenus durant cette étude ont été abordés dans les figures (I.13 à I.16) suivantes :

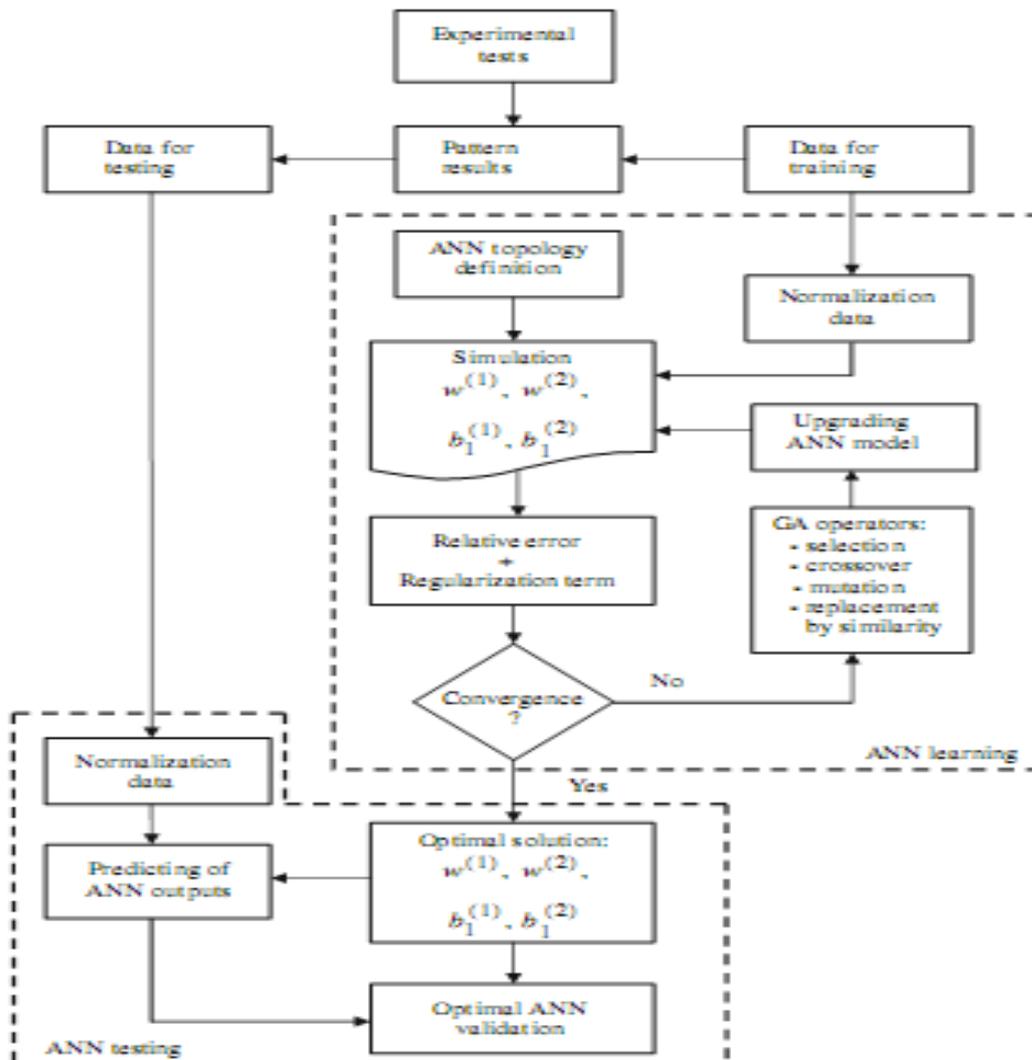


Fig.I.13. Organigramme d'étude et d'essai d'ANN.

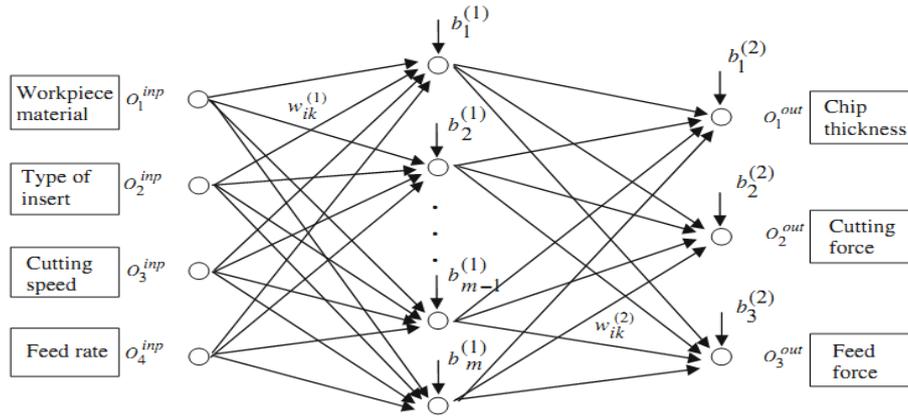


Fig.I.14. Topologie du réseau de neurone artificiel

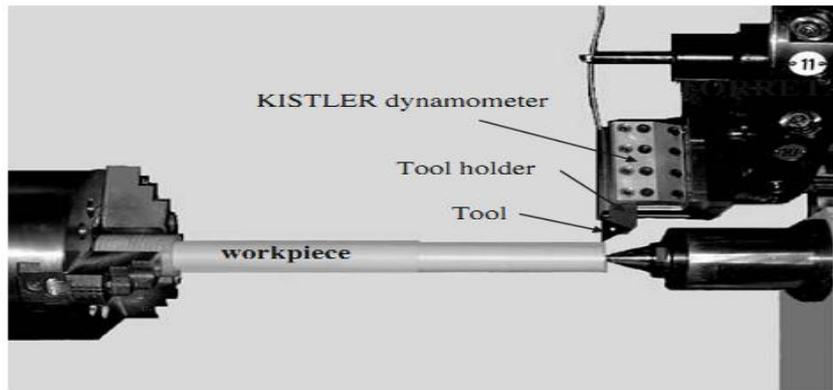


Fig.I.15. Appareils expérimentaux

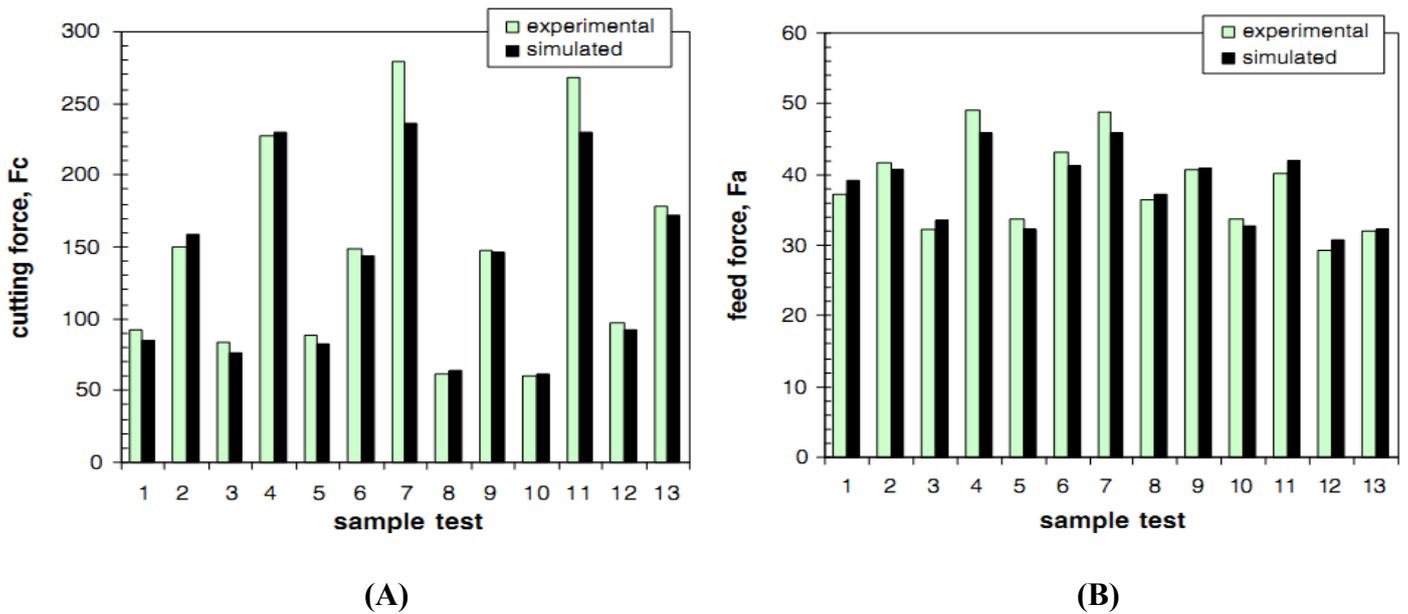


Fig.I.16. Processus d'essai d'ANN avec la topologie optimale : (A) comparaisons pour l'effort de coupe, (B) pour l'effort d'avance.

K. Palanikumar et al. [32] ont étudié l'impact de la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe, la matière de la pièce et l'angle d'orientation des fibres sur la rugosité de surface au cours de l'usinage des composites GFRP. Dans ce cadre, une procédure a été développée afin d'évaluer et d'optimiser les facteurs choisis pour atteindre au minimum de la rugosité de surface en incorporant: tableau et graphe de réponse, diagramme de probabilité, graphes d'interaction et la technique d'analyse de variance (ANOVA). Les principaux résultats ont été présentés comme suit :

1. Cette technique est utile pour prédire le principal effet et les effets d'interaction de différentes combinaisons affectant des paramètres d'usinage.
2. L'avance est le facteur qui possède l'effet le plus significatif sur la rugosité de surface, suivie par la vitesse de coupe.
3. L'interaction entre l'orientation des fibres de la pièce et la profondeur de passe possède l'impact le plus important en comparaison avec d'autres interactions sur la rugosité de surface pendant l'usinage des composites GFRP.
4. La procédure d'optimisation peut être utilisée pour prédire la rugosité de surface pendant le tournage des GFRP composites dans les plages des variables étudiées. Cependant, la validité de la procédure est limitée à la gamme de facteurs en considération pour l'expérimentation.

M. Vijaya Kini et AM Chincholkar [33] ont examiné l'effet de divers paramètres d'usinage sur la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de la matière (MRR) dans le cas du tournage de finition des tubes de polymère renforcé de 30% en fibres de verre et sans renforcement en utilisant des outils de carbure et de tungstène revêtu dans des conditions de coupe à sec. Un modèle empirique a été développé à 95 % de l'intervalle de confiance pour prédire la rugosité de surface et MRR en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe et du rayon de bec de l'outil. Les résultats obtenus indiquent que :

1. L'avance est le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface, suivie par la profondeur de passe. L'interaction de l'avance avec le rayon de bec et du rayon de bec avec la vitesse de coupe a la plus forte influence.
2. La profondeur de passe est le principal facteur qui influence sur le taux d'enlèvement de la matière, suivie par le rayon de bec. Pour les effets d'interaction, la vitesse de coupe avec le rayon de bec d'outil a l'effet le plus significatif.
3. Les expériences de vérification effectuées montrent que les modèles empiriques développés peuvent être utilisés pour l'usinage des tubes GFRP.
4. Les graphes de contour sont utiles dans la détermination des conditions de coupe optimales pour obtenir des valeurs particulières de la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de matière.
5. Les graphes de contour peuvent donner des informations utiles sur la rugosité de surface maximale atteignable pour un taux d'enlèvement de matière donné en fonction des quatre variables de coupe indépendantes.
6. Il est possible d'obtenir la même rugosité de surface pour des valeurs distinctes du taux d'enlèvement de la matière en utilisant le contour de superposition graphique.

Les principaux résultats obtenus durant cette étude ont été abordés dans les figures suivantes :

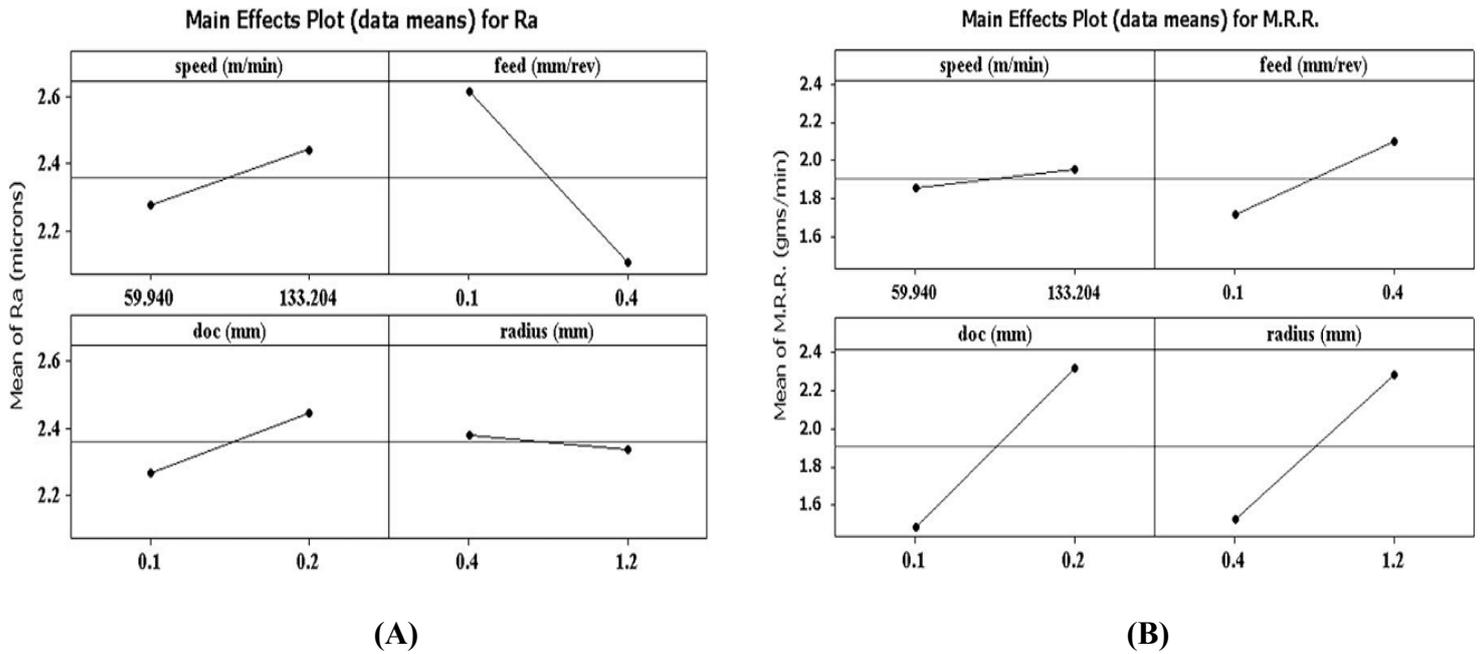
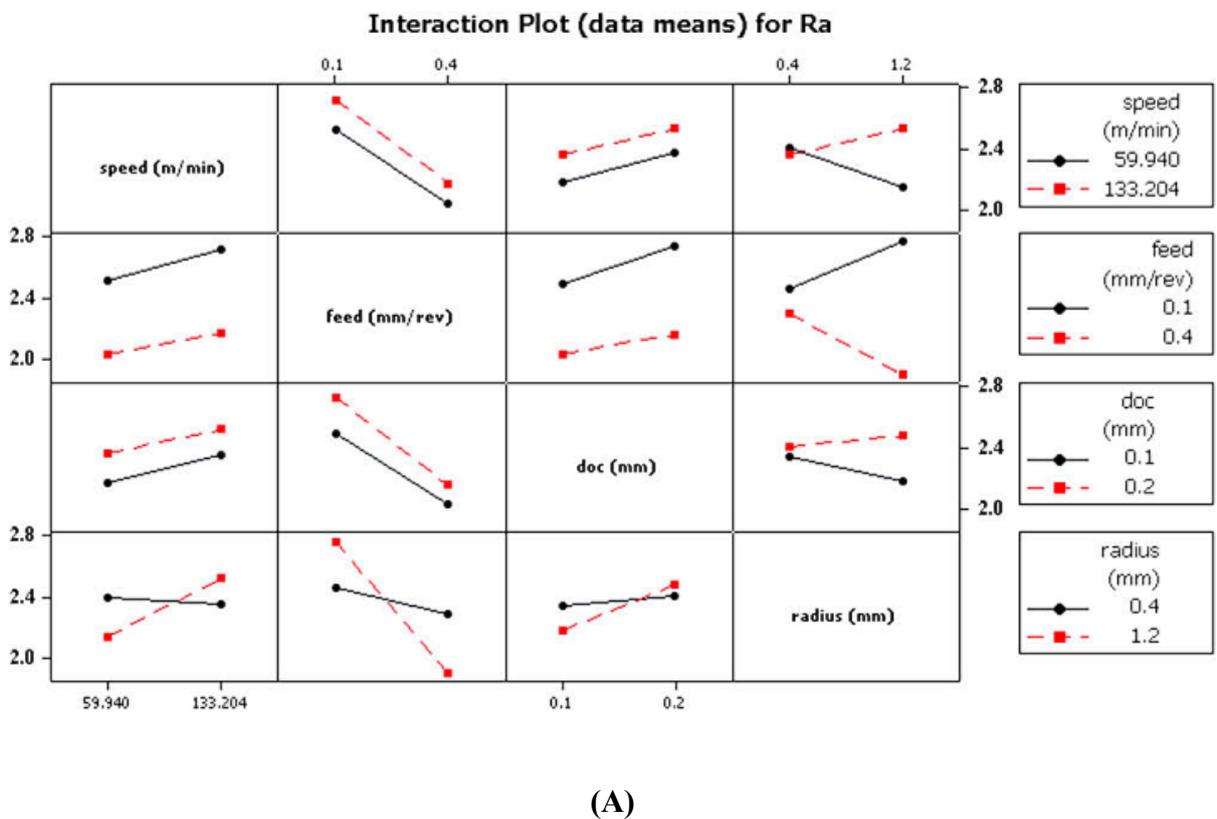


Fig.I.17. Diagramme des effets principaux : (A) pour la rugosité Ra, (B) pour MRR.



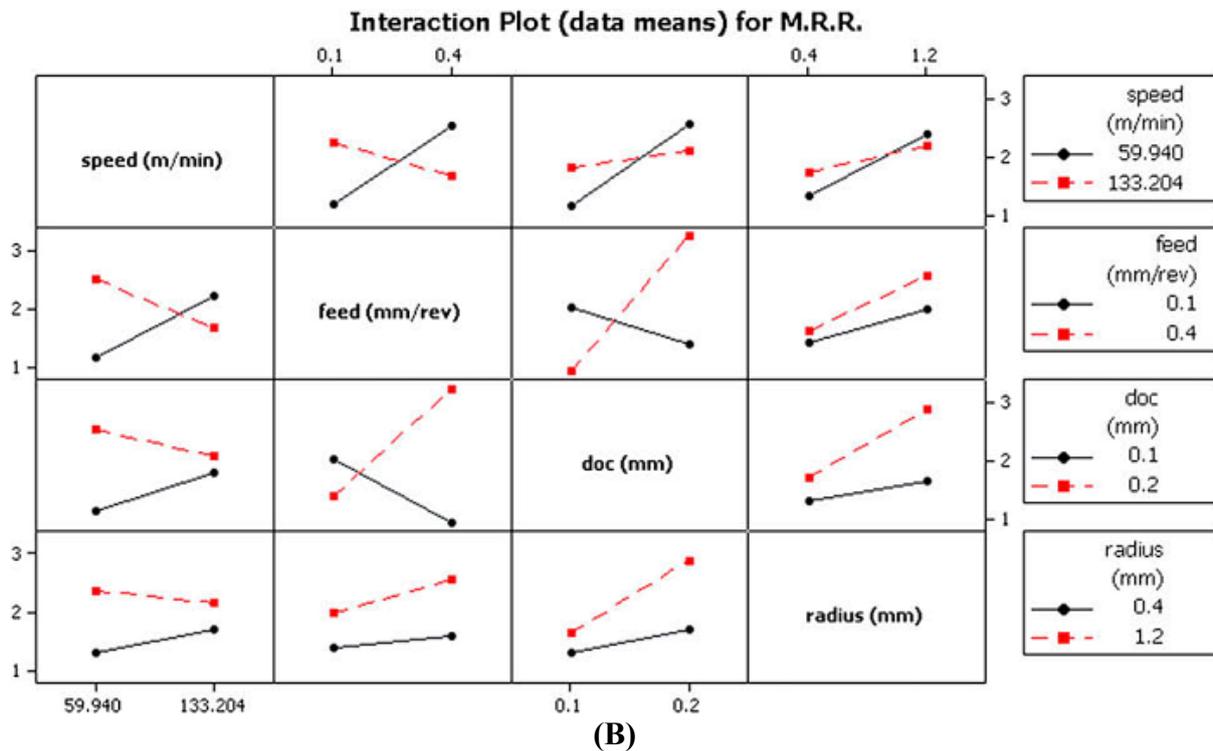


Fig.I.18. Diagrammes d'interaction : (A) pour la rugosité de surface Ra, (B) pour MRR.

Ömer Erkan et al. [34] ont présenté une étude focalisée sur la sélection des conditions d'usinage optimales pour les matériaux composites GFRP en utilisant la méthode de Taguchi et les systèmes du réseau de neurones artificiels optimisés à base des algorithmes génétiques (GONNs). Dans ce cadre, une série des opérations d'usinage ont été effectuées pendant le fraisage en bout pour étudier l'effet de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité de surface usinée. Les principaux résultats ont montré que :

1. Les résultats d'ANOVA indiquent que la vitesse de coupe est le paramètre le plus efficace sur la rugosité de surface. L'influence de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe étaient 68.88 %, 17.67 % et 3.67 % respectivement.
2. La rugosité de surface estimée par NNs après le fraisage de finition des plaques de GFRP a exprimé une erreur inférieure à 2 % après l'apprentissage. Cette observation confirme que les modèles développés représentent efficacement les résultats des essais.
3. La méthode de Taguchi et GONNs a été trouvée compatible avec les paramètres de coupe optimaux pour obtenir la meilleure rugosité de surface.
4. La méthode de Taguchi a montré que les valeurs des paramètres optimaux ont été enregistrées dans la limite de 113 m/min, 0.04 mm/tr et 3 mm pour la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe respectivement. La rugosité de surface minimum a été 1,626 μm avec une fraise de 4 arêtes de coupe.
5. Les estimations des GONNs étaient presque les mêmes pour la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe avec des valeurs de 113 m/min, 0.04 mm/tr et 2.214 mm respectivement. L'outil recommandé avait 4 arêtes de coupe et la rugosité était 1.658 μm .

Les figures (I.19 et I.20) présentent les différents résultats obtenus :

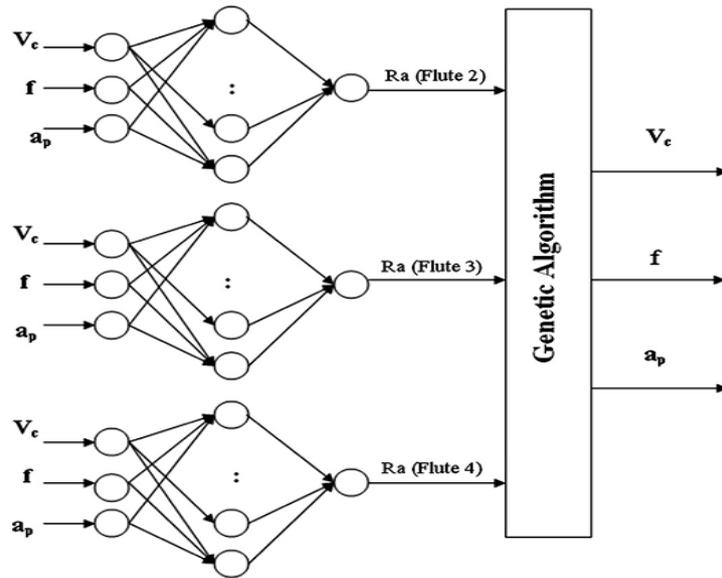


Fig.I.19. Structure de GONN

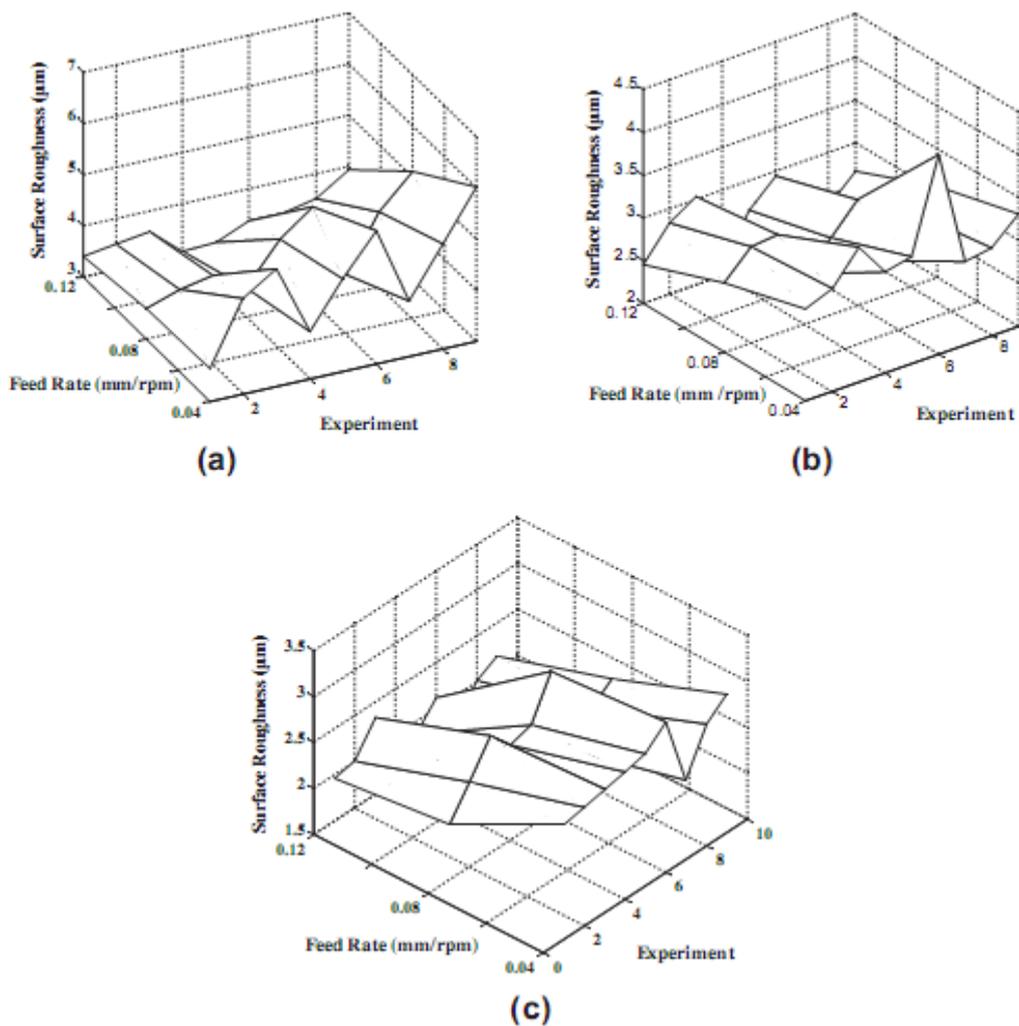


Fig.I.20. Résultats du réseau de neurone pour la rugosité de surface avec des outils de coupe distinctes: (a) 2 arêtes de coupe, (b) 3 arêtes de coupe, (c) 4 arêtes de coupe.

Carlos Santiuste et al. [35] ont abordé une étude liée au développement d'un modèle numérique à base des éléments finis (FEM) de l'usinage des composites à fibres longues pour les composants aéronautiques. Les mécanismes de formation des copeaux pour les polymères composites renforcés en fibres de verre et de carbone (PRF) ont été analysés lors de la coupe orthogonale. L'initiation et la formation complète des copeaux ont été simulées pour obtenir les efforts de coupe et les dommages induits sur la surface. Les différents effets et résultats observés révèlent que les dommages sont étendus largement en avance de l'interface et en dessous de la pointe de l'outil dans le cas des GFRP, par contre, l'endommagement a été situé dans une zone beaucoup plus petite dans le cas des CFRP. Les deux mécanismes de formation des copeaux et de l'endommagement induite sur la surface sont liés largement à l'influence d'orientation des fibres.

L'observation générale sur les résultats obtenus par l'auteur a montré que l'usinage des fragiles composites (CFRP) engendre des endommagements beaucoup plus réduits sur la surface que pour les composites ductiles (GFRP). Ceci est un avantage important de la CFRP par rapport à GFRP, lorsqu'on prend en compte de la haute responsabilité des composants structuraux des CFRP pour les applications aéronautiques. La figure I.21 présente l'évolution des dommages de la matrice dans le cas de deux matériaux (CFRP et GFRP) lors de la formation des copeaux.

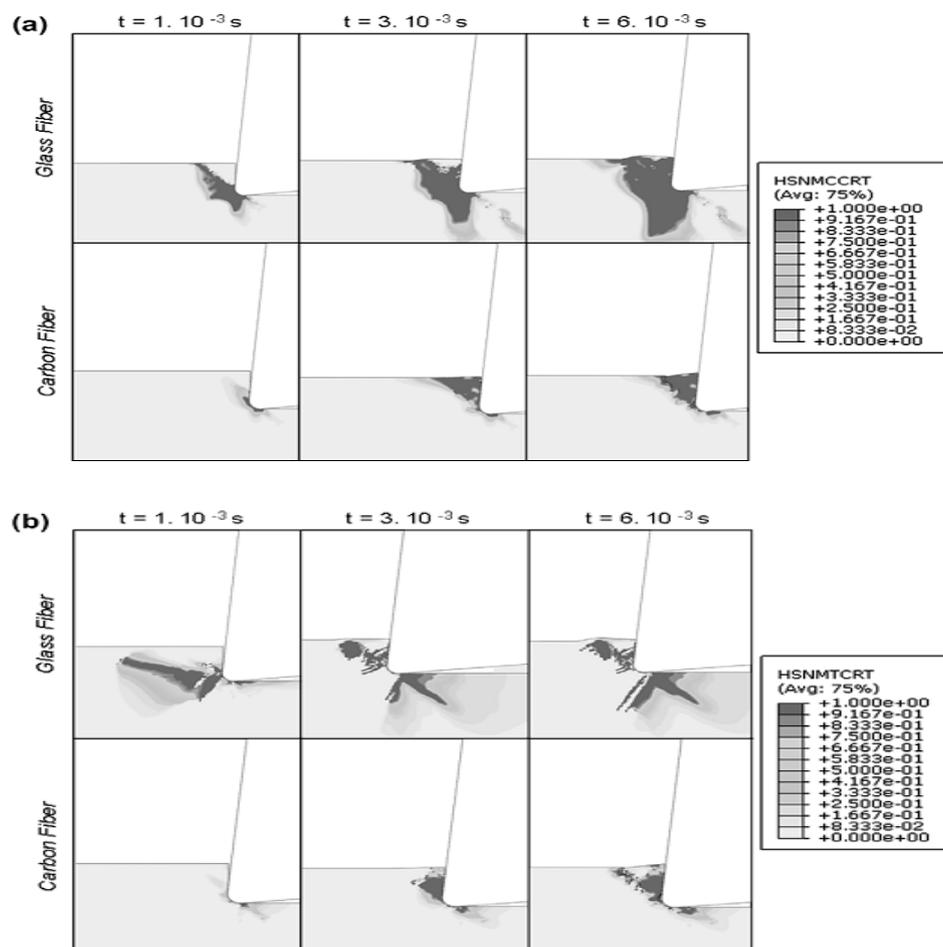


Fig.I.21. Évolution des dommages de la matrice CFRP et GFRP pendant la formation des copeaux : (a) écrasement, (b) fissuration, l'orientation de fibre 45°.

Le délaminage est un problème majeur dans le perçage des matériaux composites renforcés par des fibres. L'effort d'avance est un facteur important dans la propagation de délaminage pendant le processus de perçage. Une des méthodes efficaces pour réduire les efforts d'usinage est l'application des vibrations ultrasoniques. Dans ce cadre, P. Mehbudi et al. [36] ont réalisé une étude sur l'application des vibrations ultrasoniques pour diminuer le délaminage induit durant le perçage des stratifiés de GFRP. Le perçage assisté par des ultrasons a été appliqué dans le but de réduire l'effort d'avance. Pour cet objectif, une configuration a été conçue et fabriquée pour être capable de donner des rotations et des vibrations ultrasoniques de forêts. Une série d'expériences a été réalisée en utilisant la méthode de Taguchi et en considérant l'effet de la vitesse d'avance, la vitesse de rotation de la broche et l'amplitude des vibrations ultrasoniques. Les résultats ont montré que l'augmentation de l'amplitude des vibrations peut diminuer l'effort d'avance et les dommages de délaminage de manière significative. La comparaison entre les résultats obtenus lors du perçage assisté par des ultrasons et les résultats de perçage conventionnel des stratifiés GFRP a indiqué que l'application des vibrations ultrasoniques peut réduire l'effort d'avance et le délaminage induit jusqu'à 50 pour cent. Les résultats observés ont montré que l'utilisation de la méthode des vibrations ultrasoniques est un moyen efficace pour améliorer la qualité du trou pendant le perçage des stratifiés de GFRP (Figure I.22).

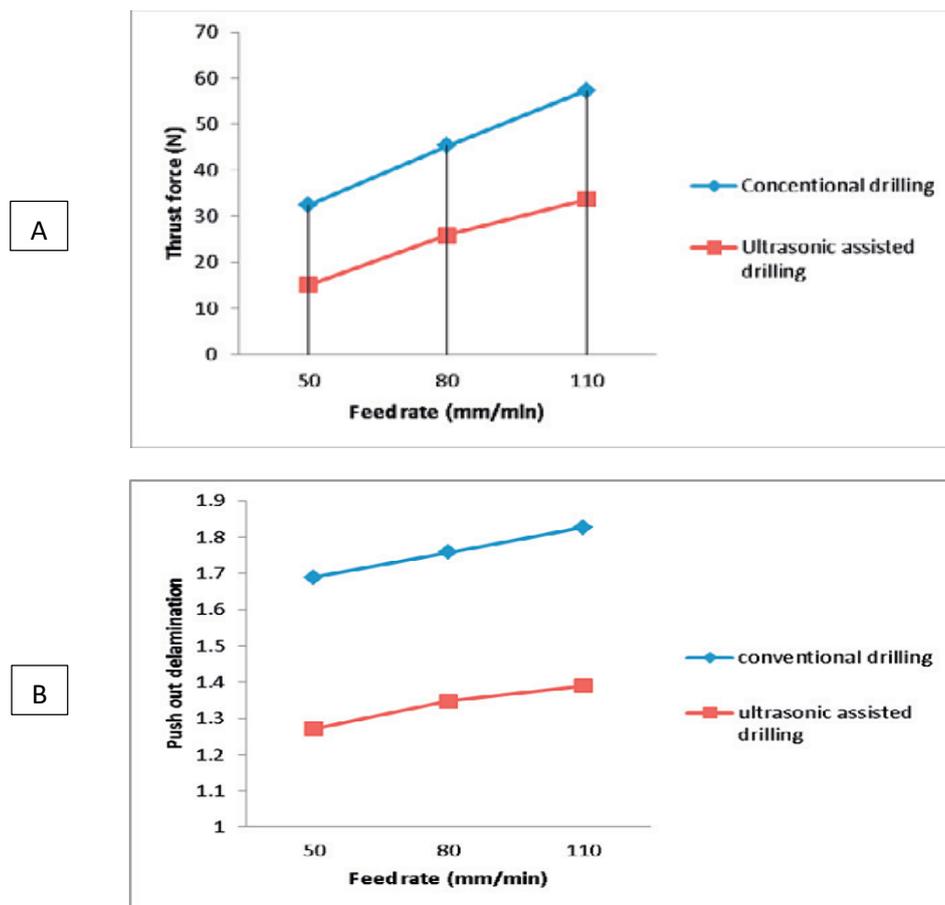


Fig.I.22. Comparaison avec différentes vitesses d'avance pour : (A) l'effort d'avance, (B) le coefficient de délaminage.

Mennu Gupta et Surinder Kumar [37] ont étudié l'usinabilité des polymères composites renforcés par des fibres de verre unidirectionnelles (UD-GFRP) pendant le processus de tournage en utilisant l'analyse des composantes principales (ACP) et la méthode de Taguchi. Le plan des expériences L18 de Taguchi a été utilisé pour la conception expérimentale. L'influence du rayon de bec, de l'angle de coupe, de l'avance par tour, de la vitesse de coupe, de l'environnement de coupe (sec, humide et froid) et de la profondeur de passe sur la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de la matière MRR a été étudiée à l'aide de la modélisation d'ACP.

Les résultats expérimentaux révèlent que la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de la matière augmentent avec l'élévation de l'avance. Par contre, les résultats d'analyse de variance indiquent que l'avance est le facteur le plus significatif qui possède une influence sur les réponses étudiées suivie par la profondeur de passe et la vitesse de coupe. L'avance = 0.2 mm/tr, la profondeur de coupe = 1.4 mm et la vitesse de coupe = 159.66 m/min produisent la valeur optimale de la rugosité de surface ($R_a=1.498 \mu\text{m}$) et du taux d'enlèvement de matière ($MRR = 330.267 \text{ mm}^3/\text{s}$). Les figures (I.23 et I.24) montrent les principaux résultats obtenus :

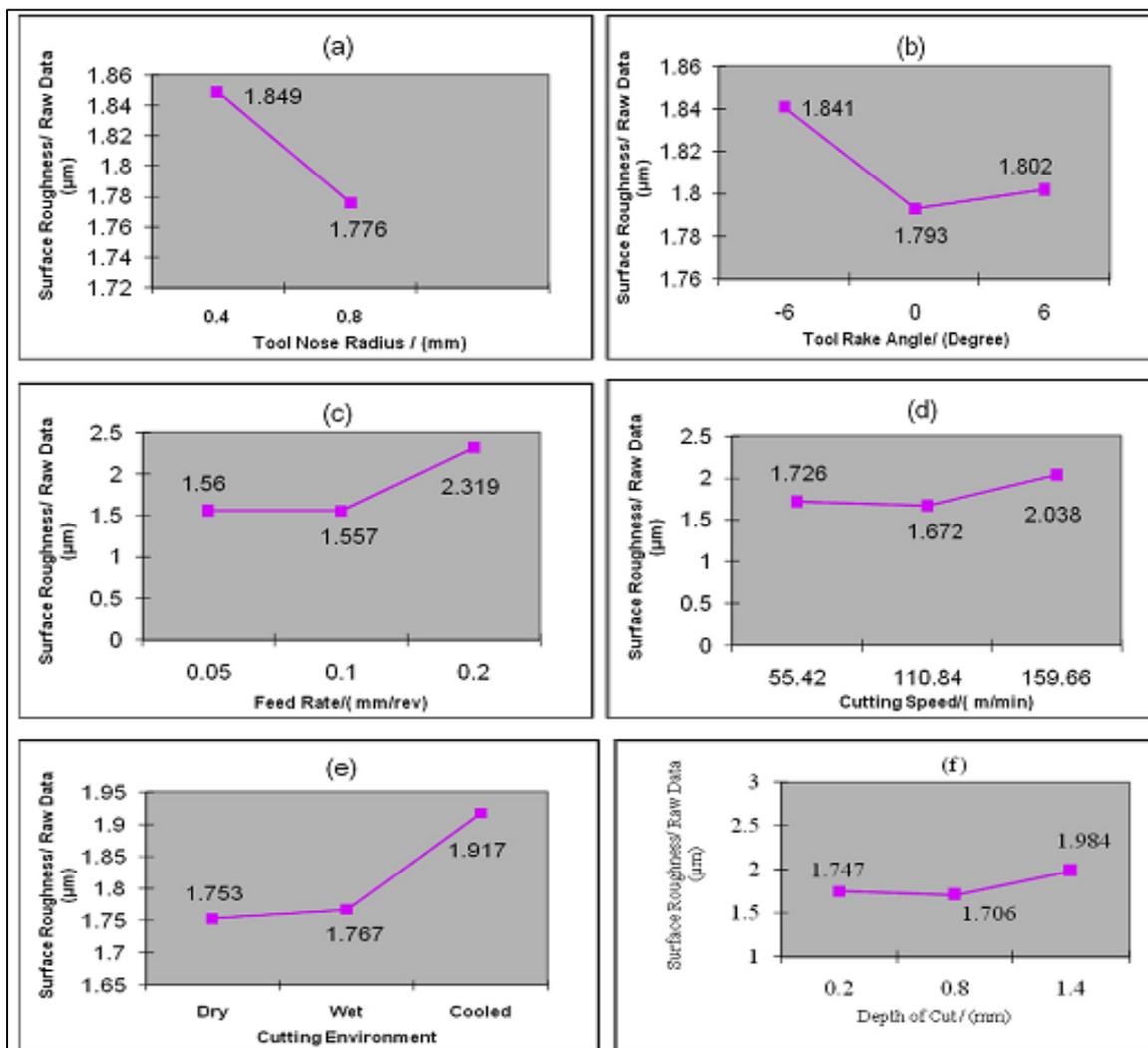


Fig.I.23. Graphes de réponse de la rugosité de surface (effet de six paramètres).

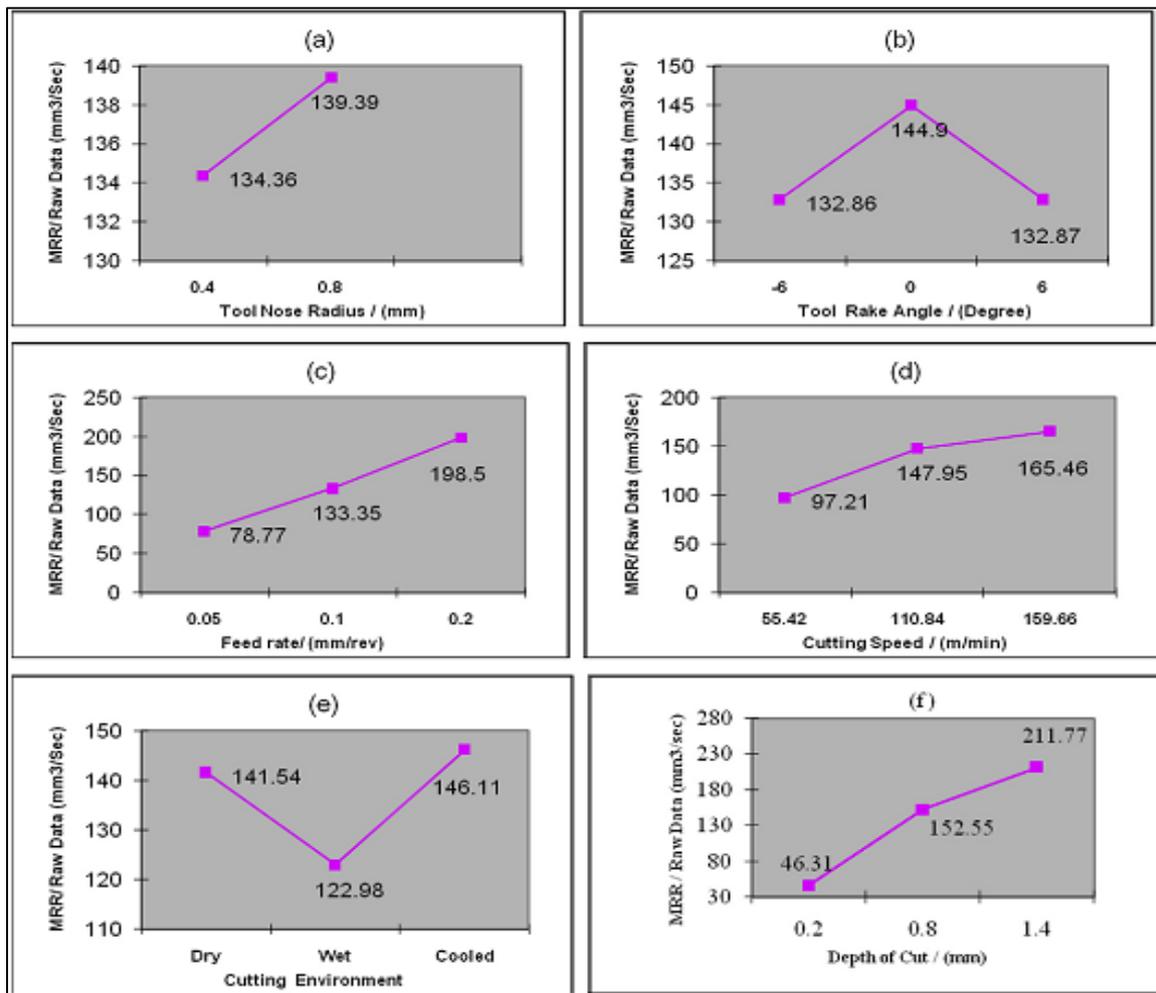


Fig.I.24. Graphes de réponse de MRR : (a) l'effet du rayon de bec, (b) l'angle de coupe de l'outil, (c) l'effet de l'avance par tour, (d) l'effet de la vitesse de coupe, (e) l'effet d'environnement de coupe (froid, chaude, humide), (f) l'effet de la profondeur de passe.

À partir de l'importance des polyamides composites et leur application, J. Paulo Davim et al. [38] ont fait une étude focalisée sur la recherche à une meilleure compréhension de l'usinabilité du polyamide PA66 avec et sans renforcement de 30% de fibres de verre lors du tournage de précision à différentes avances et en utilisant quatre matériaux d'outils distincts. Les résultats ont indiqué que l'effort radial présente les valeurs les plus élevées, suivi par l'effort principal de coupe et l'effort d'avance. L'outil PCD a donné les valeurs les plus faibles des efforts associés à la meilleure finition de surface, suivie par l'outil de qualité ISO K15 en carbure non revêtu avec brise-copeaux lors de l'usinage du polyamide renforcé. La continuité des micro-copeaux hélicoïdaux a été produite, indépendamment des paramètres de coupe et le matériau des outils de coupe employés.

Les résultats expérimentaux obtenus pendant le tournage de précision du PA66 et PA66 GF30 ont indiqué que :

1. L'addition de 30% des fibres de verre en renfort au polyamide PA66 a influencé significativement les performances des outils utilisés en comparaison avec le matériau sans renforcement.
2. L'effort radial présente les valeurs les plus élevées, suivi par les efforts de coupe et d'avance, en raison du fait que la profondeur de passe est plus petite que le rayon de bec d'outil, conduisant ainsi à un plus petit angle de direction d'arête efficace.
3. En général, l'outil PCD est responsable sur les valeurs les plus faibles des efforts pendant le tournage de deux matériaux, suivi par l'outil de carbure K15, qui a donné des résultats intermédiaires. Pendant la coupe du polyamide, l'outil K15-KF conduit à des efforts supérieurs, bien que l'outil CVD de diamant revêtu a fourni les efforts les plus élevés durant l'usinage du polyamide renforcé.
4. L'effort de coupe spécifique diminue avec l'élévation de l'avance et les résultats obtenus ont présenté des valeurs comparables aux alliages métalliques. Néanmoins, le polyamide PA66 a présenté une triple augmentation de K_s par rapport au composite renforcé (PA66-GF30).
5. Concernant l'état de surface, en général, les matériaux d'outils et les conditions de coupe sont responsables sur les efforts inférieurs qui donnent des bons états de surface et des outils sans brise-copeaux (PCD et K15 carbure) ont fourni de meilleurs résultats, sans doute en raison de leur rayon le plus petit aiguisé. En outre, dans la gamme de découpage testée, la rugosité de surface du polyamide renforcé est insensible aux variations de l'avance. Ce comportement n'a pas été observé pour le polyamide sans renforcer, où la rugosité augmente avec l'avance.
6. Les micro-copeaux produits ont été présentés sous une forme enroulée continue, aucunement affectée par les paramètres de coupe ou le matériau d'outil, exceptionnellement pour l'outil CVD de diamant revêtu, qui a des copeaux tendance à poudre, sans doute en raison de la présence d'un brise-copeaux. Les figures (I.25 à I.27) présentent les différents résultats obtenus concernant la rugosité de surface et les efforts de coupe :

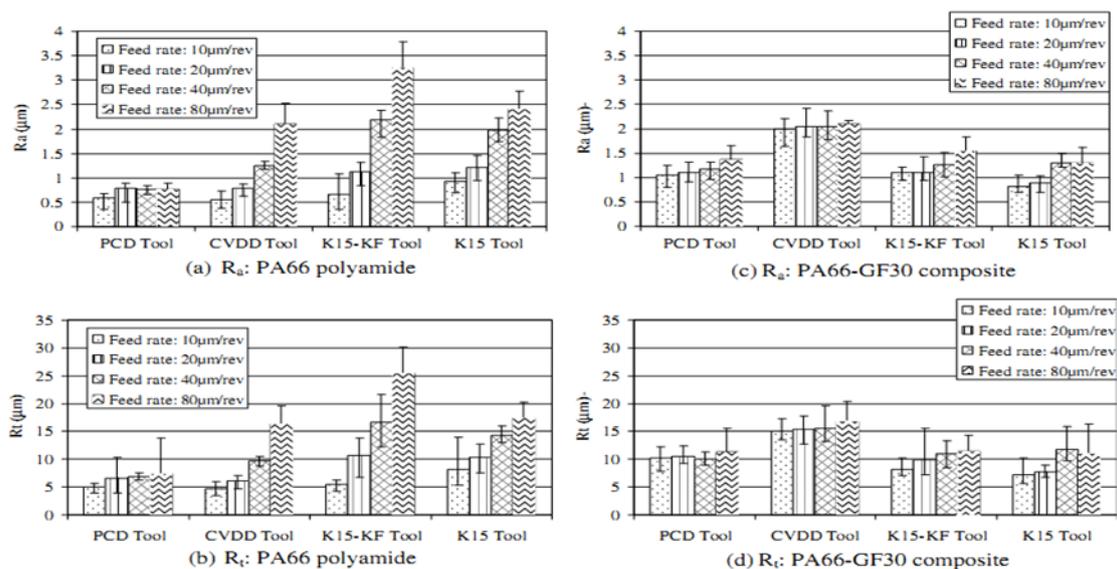


Fig.I.25. Rugosité de surface pendant le tournage du PA66 (a et b) et PA66-GF30 (c et d).

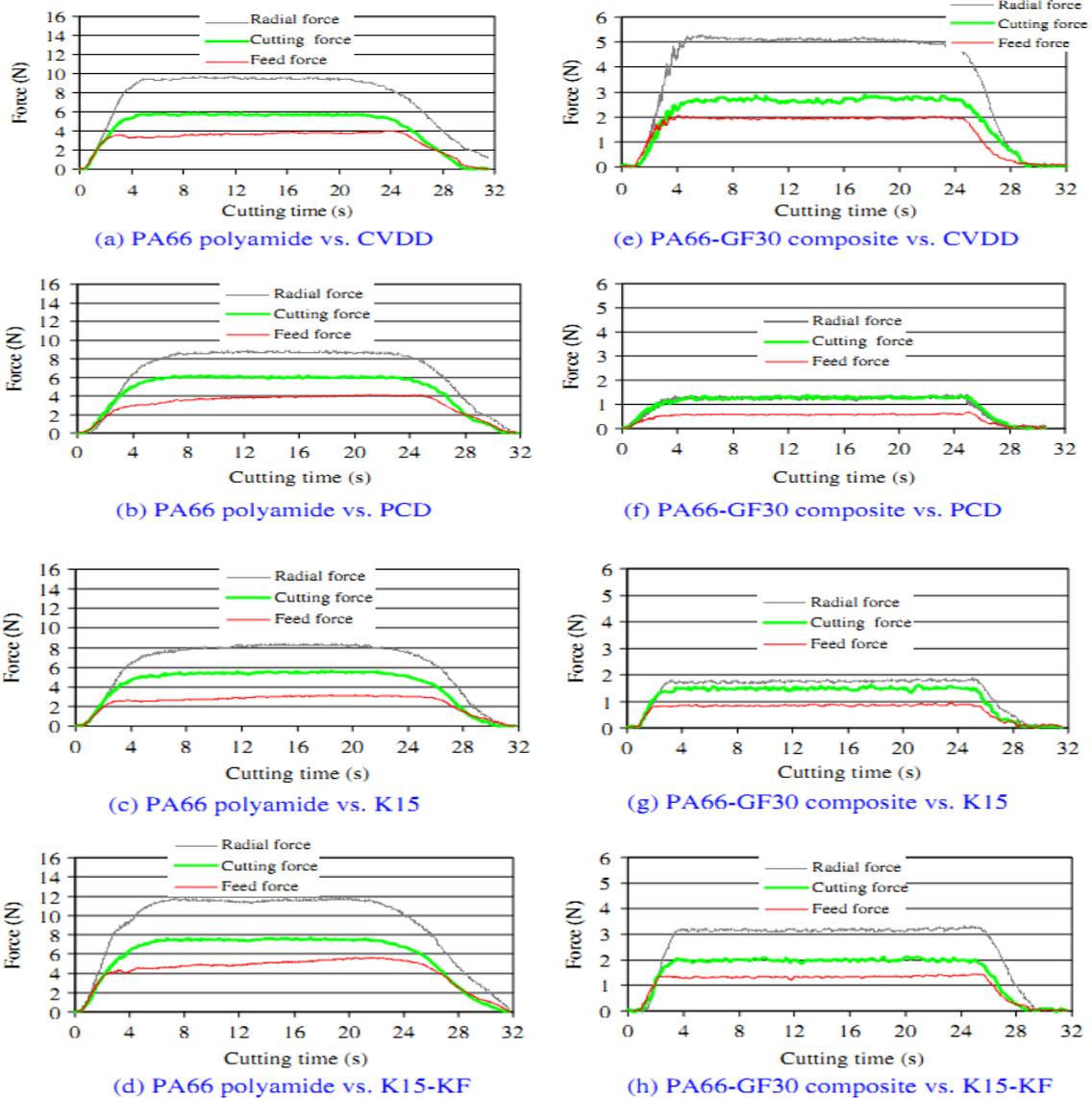


Fig.I.26. Évolution des efforts de coupe pendant le tournage du PA66 et PA66-GF30 avec $V_c=70$ m/min, $f=10$ $\mu\text{m}/\text{tr}$, $a_p=150$ μm pour les outils suivants : carbure revêtu de diamant, CVDD, PCD, carbures (K15 et K15-kf).

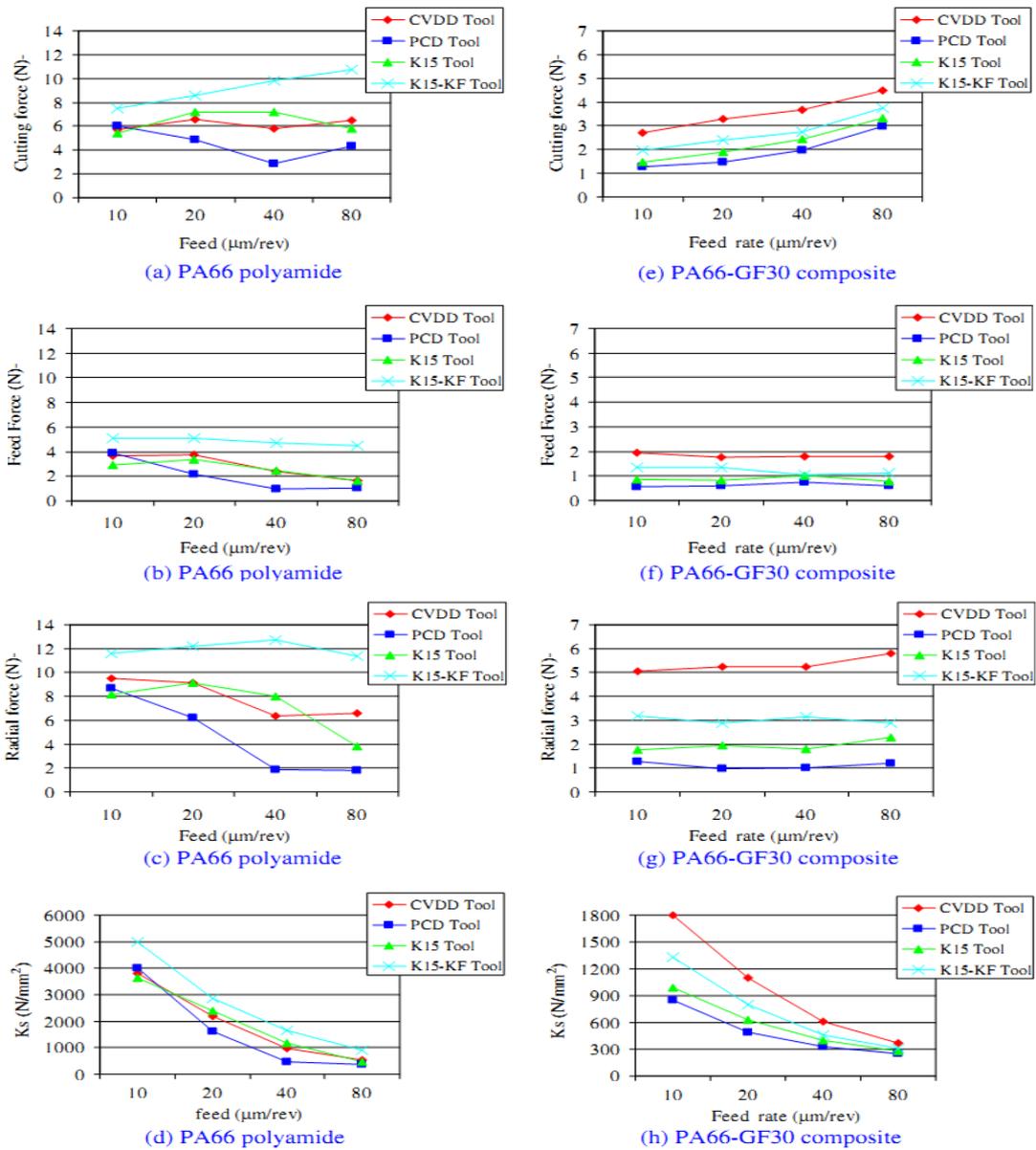


Fig.I.27. Effet de l'avance sur les efforts de coupe et la force de coupe spécifique pendant le tournage du PA66 et PA66-GF30 avec $V_c=70$ m/min, $a_p=150$ μm et les outils précédents.

M. Adam Khan et A. Senthil Kumar [39] ont étudié l'usinabilité d'un matériau composite (GFRP) à une matrice de polyester insaturé renforcé de fibres de verre E. Pour cela, les performances des outils de coupe d'alumine ont été évaluées par la mesure de l'usure du bord et de la rugosité de surface usinée du matériau composite GFRP en fonction de la vitesse de coupe, et à l'aide de deux outils de coupe d'alumine différents: outil de coupe d'oxyde d'aluminium mélangé avec Ti [C, N] à savoir de (CC650) et un outil de coupe d'oxyde d'aluminium renforcé par les filaments de SiC (CC670). Les résultats montrent que :

1. L'usure par abrasion est très lisse et moins avec l'outil de coupe d'alumine renforcé par des filaments SiC par rapport à l'outil de coupe mélangé avec Ti [C, N] qui est dû à la présence de fibres hautement abrasives pendant l'usinage d'un matériau GFRP composite.
2. Les variations des valeurs de la rugosité de surface ont été remarquées en raison de la variation inhérente à la rugosité de surface de la matrice et des fibres.
3. L'outil de coupe d'alumine renforcé par des filaments SiC produit une meilleure finition de surface par rapport à l'outil de coupe d'alumine mélangé avec Ti [C, N].
4. Enfin, la performance des outils de coupe d'alumine renforcés par SiC est supérieure à celle des outils de coupe d'alumine mélangés avec Ti [C, N] dans le cas de l'usinage des GFRP composites.

Dans les figures (I.28 à I.30), on présente les principaux résultats obtenus qui concernent les performances des outils de coupe utilisés pendant l'usinage d'un matériau composite GFRP :

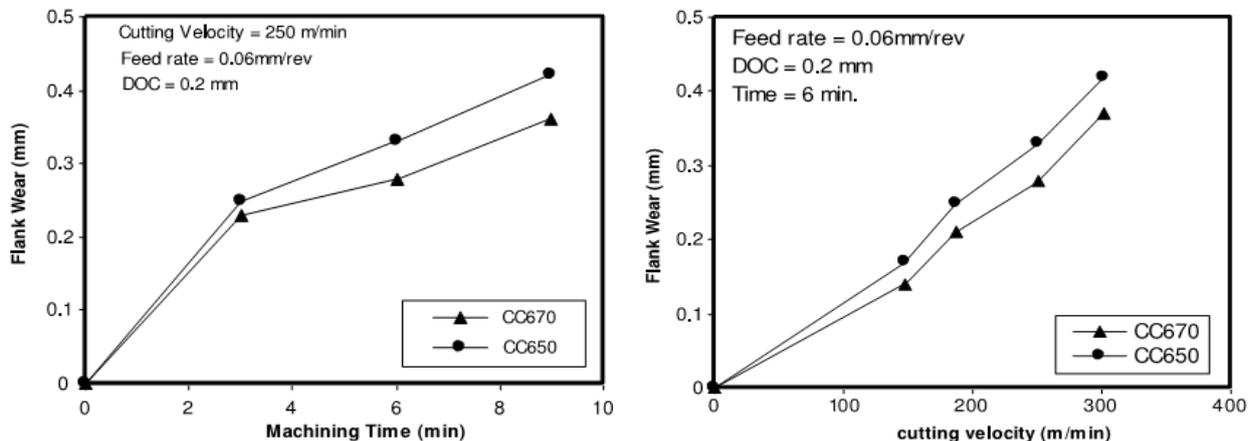


Fig.I.28. Usure des flancs des outils d'alumine en fonction du temps d'usinage et la vitesse de coupe.

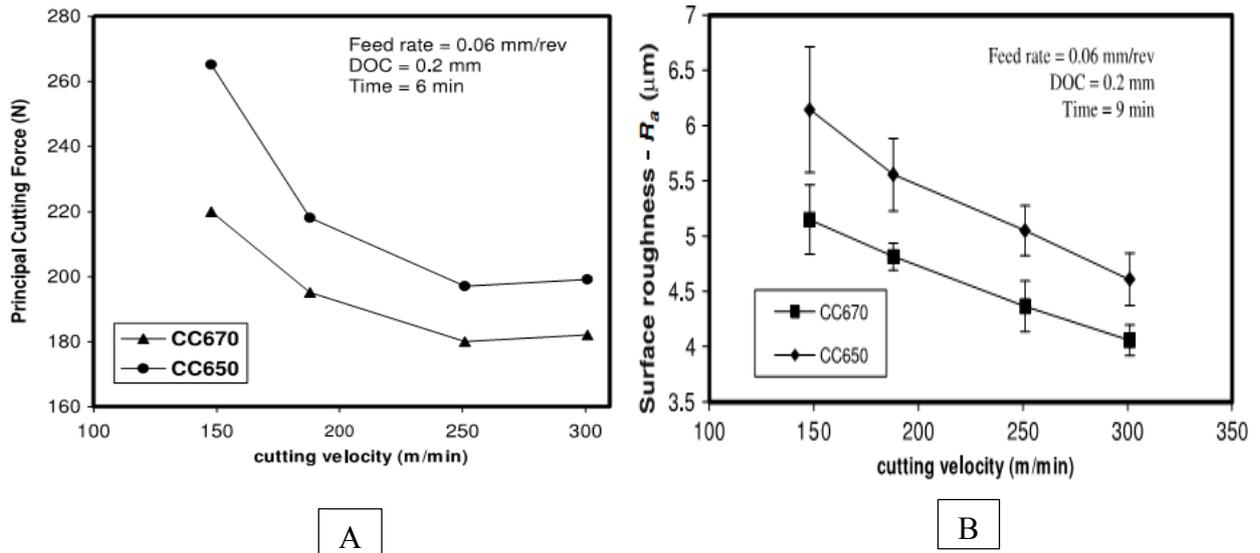


Fig.I.29. Effet de la vitesse de coupe sur : (A) l'effort principal de coupe, (B) la rugosité de surface, lors de l'usinage d'un matériau composite GFRP pour les deux types des outils de coupe d'alumine.

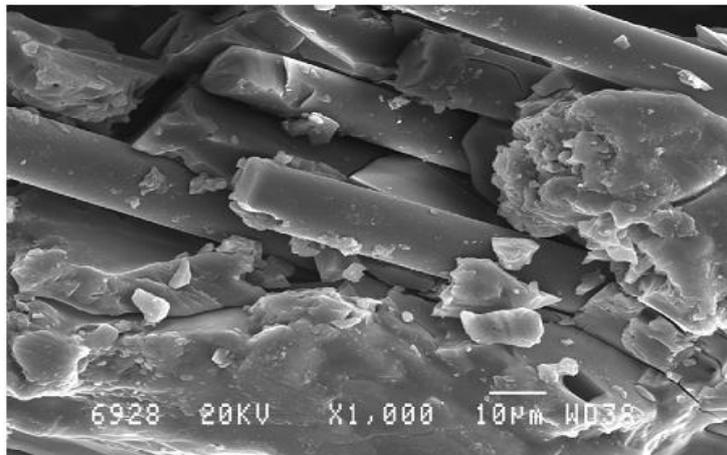


Fig.I.30. Modèle sur le profil observé de la surface usinée pendant l'usinage d'un matériau composite GFRP.

V. N. Gaitonde et al. [40] ont présenté l'application de l'approche du réseau de neurones artificiels (ANN) pour évaluer les critères d'usinabilité du polyamide non renforcé (PA6) et avec un renforcement de 30% en fibres de verre (PA66 GF30). Les effets de la matière de la pièce à usiner, la matière de l'outil (PCD, carbure non revêtu K10), la vitesse de coupe et l'avance sur les efforts d'usinage, la puissance de coupe et l'effort de coupe spécifique ont été analysés et modélisés pendant le processus de tournage (Fig.I.31).

L'analyse du modèle qui concerne les résultats des efforts d'usinage a révélé que ces derniers sont minimums avec les valeurs faibles de l'avance et indépendants de la vitesse de coupe, tandis que la puissance de coupe est minime lorsque les deux vitesses de coupe et l'avance sont à faibles niveaux pour l'usinage des polyamides (PA6 et PA66 GF30) indépendamment de l'outil de coupe utilisé. D'autre part, la force de coupe spécifique est minimale à faible vitesse de coupe et à une avance élevée dans le cas du matériau PA6, tandis que les valeurs élevées de la vitesse de coupe et de l'avance sont essentielles pour minimiser la force de coupe spécifique lors de l'usinage du PA66 GF30.

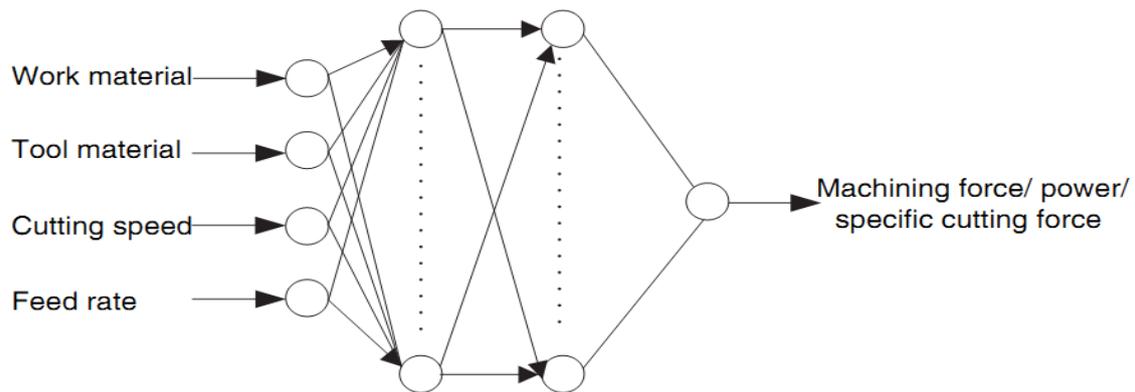


Fig.I.31. Architecture d'ANN.

V. N. Gaitonde et al. [41] ont fait aussi une étude consacre l'application de l'approche de Taguchi pour atteindre une meilleure usinabilité en termes de la puissance de coupe et l'effort de coupe spécifique pendant le tournage du polyamide non renforcé (PA6) et avec un renforcement de 30% en fibres de verre (PA66 GF30). Pour cet objectif, l'analyse des moyens (ANOM) et l'analyse de variance (ANOVA) sur le rapport du signal-bruit (S/N) multi réponses ont été utilisées pour déterminer les niveaux des paramètres optimaux et afin d'identifier le niveau de l'importance de chaque facteur. Les résultats d'analyse de variance ont montré que la vitesse de coupe est le facteur le plus important qui influe sur l'usinabilité des matériaux. Les résultats d'optimisation de Taguchi suggèrent que la valeur optimale de l'avance et la vitesse de coupe doit être maintenue à un niveau bas, tandis que l'outil de diamant poly cristallin (PCD) est plus performant que celui de carbure cimenté (K10) lors de l'usinage des deux matériaux (PA6 et PA66 GF30) pour atteindre une meilleure usinabilité (Figure I.32).

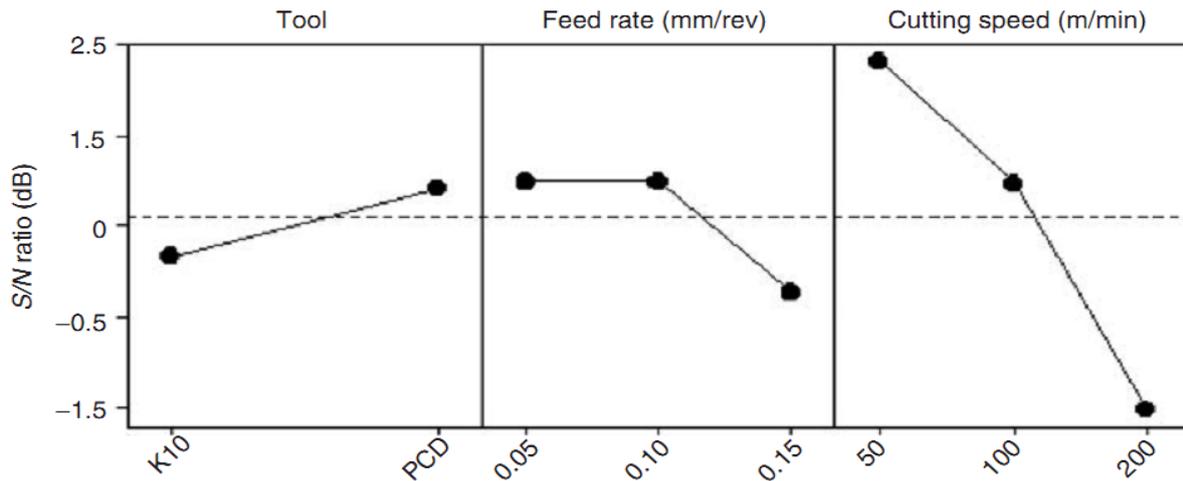


Fig.I.32. Diagramme des effets principaux du rapport S/N pour l'usinabilité du polyamide renforcé PA66 GF30.

V. N. Gaitonde et al [42] ont étudié aussi l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur les efforts d'usinage, la puissance de coupe et la force de coupe spécifique pendant le tournage des polyamides PA6 et PA66 GF30 en utilisant un outil de carbure K10. La méthodologie de la surface de réponse (RSM) basée sur l'analyse paramétrique révèle que l'effort d'usinage et la puissance de coupe augmentent avec l'avance, tandis que la pression de coupe spécifique diminue avec l'augmentation de l'avance pour une valeur donnée de la vitesse de coupe lors de l'usinage du PA6 et PA66 GF30. Les figures (I.33 à I.35) résument les principaux résultats obtenus :



Fig.I.33. Préparation expérimentale pour mesurer les efforts de coupe.

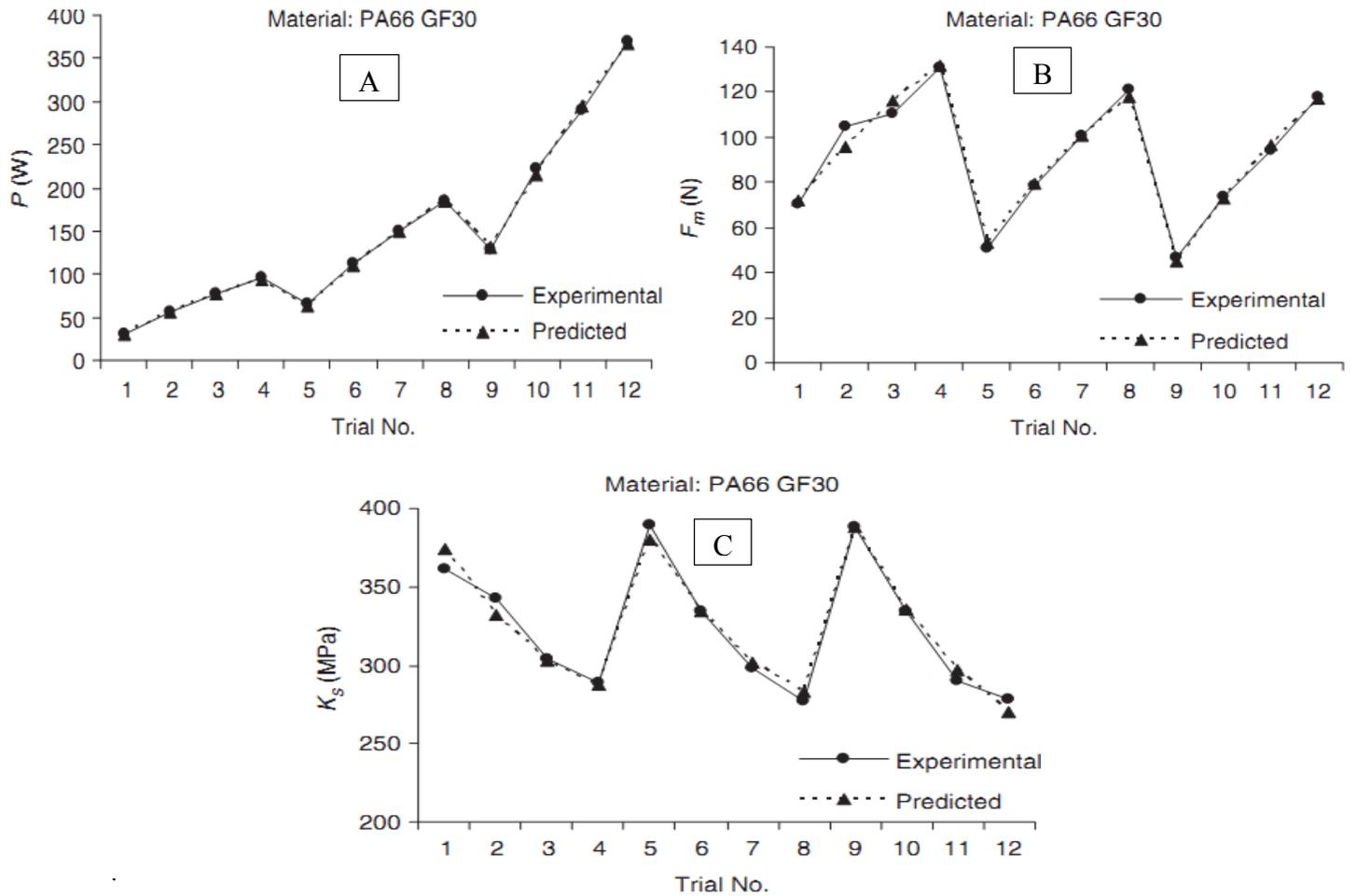


Fig.I.34. Valeurs expérimentales et prédites du model basé sur RSM pour : (A) la puissance de coupe, (B) l'effort de l'usinage, (C) la pression de coupe spécifique.

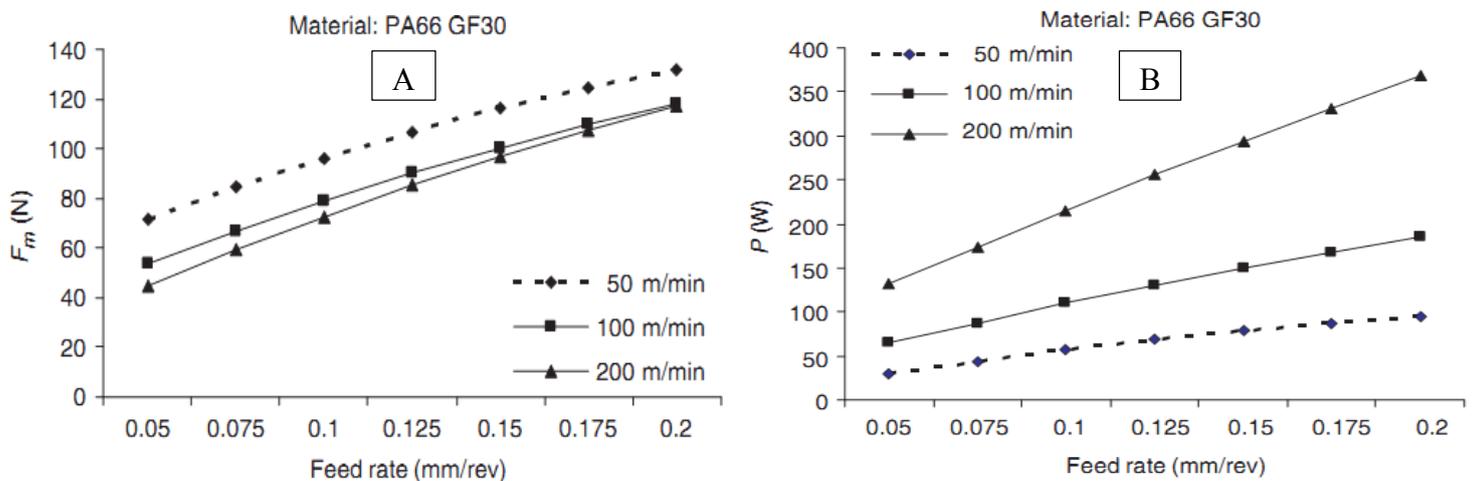


Fig.I.35. Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur : (A) l'effort de l'usinage, (B) la puissance de coupe.

M. Madic et al. [43] ont discuté l'application d'une approche couple qui concerne le réseau de neurones artificiels et l'algorithme de recherche harmonie amélioré (ANN-IHSA) pour l'optimisation de la rugosité de surface pendant le tournage du polyamide (PA6). Pour cet objectif, un modèle basé sur l'approche ANN a été développé pour la rugosité de surface (R_a) en fonction de la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le rayon de bec d'outil. Le modèle développé a été utilisé pour déterminer les paramètres de coupe optimaux en utilisant l'algorithme de recherche harmonie amélioré (IHSA) afin d'obtenir au minimum de la rugosité de surface.

Les résultats ont montré que l'approche d'optimisation proposée peut être utilisée de manière efficace pour l'optimisation des paramètres de coupe lors du tournage des polyamides. Les résultats d'optimisation et différentes comparaisons sont résumés dans le tableau I.9.

Tableau I.9. Comparaison et résultats d'optimisation

Les paramètres de coupe optimaux				R_a (μm)	$\overline{R_a}$ (μm)
V (m/min)	f (mm/tr)	a (mm)	r (mm)	ANN+IHSA	Expérimentale
65.03	0.049	1	0.8	0.6507	0.7274

Nicolas A. Fountas et al. [2] ont présenté l'influence de l'avance et la vitesse de coupe sur l'effort principal de coupe (F_T), l'effort d'avance (F_V) et l'effort de coupe radial (F_R) lors du processus de tournage longitudinal du PA66-GF30, et à l'aide d'un outil de coupe en carbure cimenté. L'analyse de variance (ANOVA), les approches statistiques et les techniques du calcul informatique (le réseau de neurones artificiels) ont été appliqués afin de formuler des modèles stochastiques qui relient les facteurs de réponse avec les principaux paramètres de coupe.

Les résultats obtenus ont indiqué que les techniques du calcul informatique proposées peuvent être utilisées effectivement pour prédire les composantes des efforts de coupe (F_T , F_V et F_R) et pour faciliter la décision lors de la planification du processus. L'avance est le facteur le plus important qui possède une influence sur les paramètres de réponse avec une contribution de 73.81 % jusqu'à 97.71 %. Tandis que, la vitesse de coupe joue un rôle moins significatif par rapport à l'avance. Elle possède généralement une contribution entre 1.66 % et 21,33 %, les principaux résultats sont exprimés dans la figure I.36.

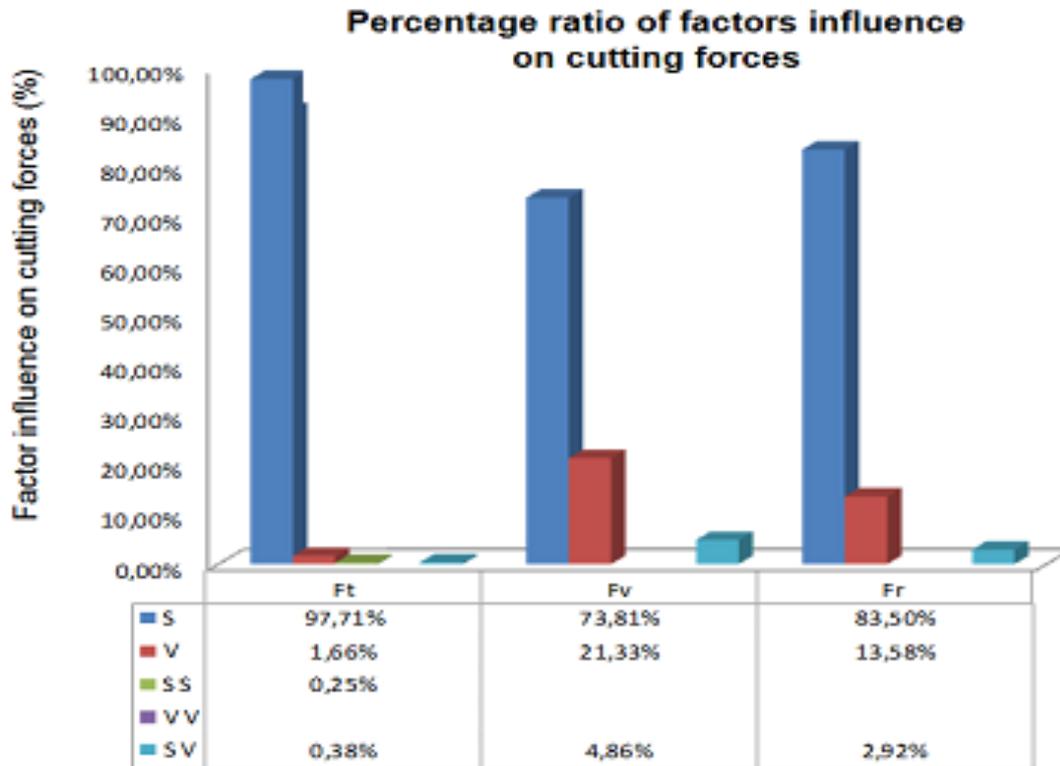


Fig.I.36. Pourcentage de contribution des facteurs affectants sur les efforts de coupe.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les connaissances nécessaires pour comprendre le cadre de cette étude. Ce travail se compose principalement de quatre axes, le premier concerne les notions de base sur la structure et les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux composites et de différentes constituantes (la matrice, les fibres et l'interface fibre-matrice). D'autre part, la deuxième partie se focalise sur les principes d'usinage des métaux et quelques définitions relatives à l'usinabilité et les phénomènes de coupe étudiés. En outre, la troisième partie est consacrée à une introduction sur la mise en forme des matériaux composites et le comportement résultant de ces derniers lors du processus d'usinage tels que l'hétérogénéité, l'anisotropie, la dégradation thermique de la matrice polymère, l'usure des outils et les différents phénomènes et des endommagements qui affectent l'usinage des composites. Finalement, les différents travaux de recherche liés à l'usinage des matériaux composites GRFP et PA66-GF30 ont été abordés pour mieux comprendre l'influence de différentes conditions d'usinage sur l'usinabilité de ce type des matériaux. Ce travail a montré clairement que le comportement des matériaux composites lors de l'usinage est différent totalement que celui enregistré pendant l'usinage des métaux ou des polymères, cependant, on peut observer la possibilité de trouver une relation limitée entre eux. D'une part, la nature de la structure d'un matériau composite, le type et les propriétés de la matrice, des fibres, de

l'interface fibre- matrice et le taux de renforcement des fibres dans la matrice jouent un rôle décisif dans le comportement des matériaux composites pendant l'usinage et l'évolution des phénomènes de coupe distincts et les endommagements engendrés. D'autre part, les travaux de recherche abordés montrent que le choix des paramètres d'usinage et des outils de coupe compatibles avec la nature du matériau composite usiné reste une des principaux facteurs qui possèdent une influence importante sur les paramètres technologiques étudiés notamment lorsqu'on prend en compte la grande diversité des matériaux élaborés. Par ailleurs, le type des méthodes de la modélisation et d'optimisation utilisées peut limiter considérablement l'efficacité et la précision des modèles développés et des paramètres optimisés.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes méthodes et matériels utilisés pour la réalisation des essais et d'extraire les résultats obtenus. La connaissance précise des phénomènes qui se produisent lors de l'usinage d'un matériau composite est liée principalement aux procédures expérimentales adoptées. Généralement, ces phénomènes peuvent être influencés aux différents facteurs tels que la démarche de l'étude, la stabilité d'usinage et la puissance fournie qui sont limités à la base du choix et des performances de la machine, la matière et la géométrie des outils de coupe utilisés, la structure et les propriétés du matériau usiné (type de la matrice et des fibres), la conception expérimentale et les méthodes de l'étude exploitées. D'autre part, la nature d'observations et d'essais et la précision des appareils et des méthodes de mesure appliquées sont des facteurs qui nous permettent de connaître profondément l'évolution des paramètres technologiques étudiés tels que (la puissance de coupe nécessaire, la qualité de surface usinée, l'effort de coupe généré et le débit de copeaux enlevés,...). L'analyse et la présentation de ces facteurs sont considérées comme un objet d'étude dans cette partie de la thèse.

II.2. Machine-Outil

Les opérations de chariotage relatives aux expériences ont été réalisées à l'aide d'un tour parallèle (Fig.II.1), modèle SN 40 C, fabriqué par la société (TROS TRONCIN). Il développe une puissance sur la broche égale 6.6 KW et une vitesse de rotation maximale de 2000 tr/min. Les fréquences de rotation de la broche disponibles sont : (45, 63, 90, 125, 180, 250, 355, 500, 710, 1000, 1400, 2000) tr/min. Les avances possibles sont : (0.08, 0.10, 0.11, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20, 0.22, 0.24,...,0.8) mm/tr.



Fig.II.1. Tour parallèle SN 40 C.

II.3. Outils de coupe utilisés

Deux plaquettes amovibles en carbure revêtu de nuance (GC3215) avec des géométries différentes (SPUN 12 03 04 et SPUN 12 03 08) fabriquées par la société SANDVIK ont été utilisées comme des outils de coupe lors de l'usinage du PA66-GF30. Ce type de plaquette se caractérise par la bonne résistance à l'usure mais pas très tenace, avec une plage de vitesses de coupe et des avances généralement moyenne dans des conditions de coupe favorables, et supporte des températures de coupe élevées. Le porte outil utilisé porte la désignation suivante ISO (CSDPN 25 25 M12) avec un angle de direction principale égal à 45° . Les différentes caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe et du porte-outil utilisé sont résumées dans le tableau II.1 et les figures II.2 et II.3.

Tableau II.1. Description dimensionnelle des plaquettes de coupe utilisées.

Désignation	Forme de la plaquette	Angle de dépouille	Type de plaquettes	Longueur de l'arête de coupe	Épaisseur de la plaquette	Rayon du bec
SPUN 12 03 04	carré	11°		12 mm	3.18 mm	0.4 mm
SPUN 12 03 08	carré	11°		12 mm	3.18 mm	0.8 mm

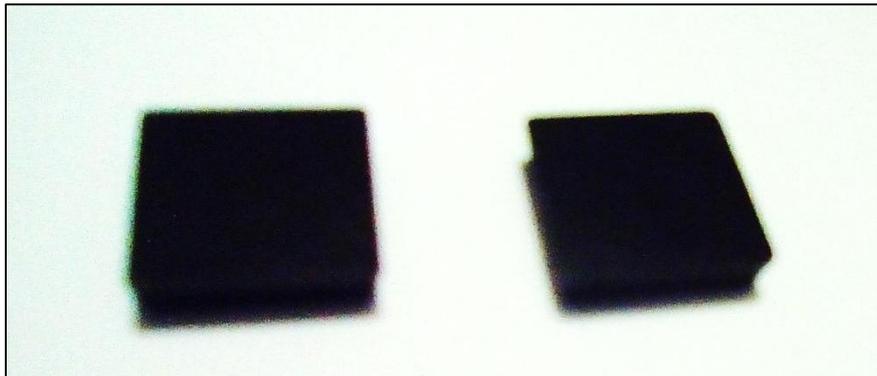


Fig. II.2. Plaquettes de coupe utilisées.



Fig. II.3. Porte-outil utilisé.

II.4. Matériau des éprouvettes

Les polyamides sont des polymères thermoplastiques semi-cristallines résultant de la polymérisation par condensation de l'hexaméthylène diamine et d'acide adipique conduisant par une réaction équilibrée à la formation de l'eau et du polyamide. Les groupes amide des chaînes du polyamide formé donnent des liaisons hydrogènes entre les molécules selon la figure II.4. Ce qui confère aux polyamides une bonne résistance mécanique et thermique et une tenue aux solvants et aux hydrocarbures. Ce type des réactions donne la création d'une phase très orientée et très compacte appelée phase cristalline. L'absence totale ou partielle de cette charpente de densité maximale est appelée phase amorphe [15]. Le PA66 est un exemple sur les polyamides les plus utilisés dans de nombreuses structures. Il a remplacé certains métaux et matériaux traditionnels à cause de ses propriétés. Il se caractérise par une très bonne usinabilité, résistance et dureté exceptionnellement élevées avec une vaste plage de température d'utilisation. Il possède des bonnes propriétés mécaniques, bonnes caractéristiques de glissement, haute résistance à l'abrasion, grand pouvoir d'amortissement, très bonne résistance aux hydrocarbures (substances alcalines, graisses, huiles, carburants, éthers, esters, cétones) et bonnes caractéristiques de collage [41,44]. L'addition des charges ou de renforts contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques et thermiques du PA66 polyamide [45,46]. La fibre de verre court est la plus utilisée et la plus efficace pour le renforcement du PA66, avec un taux de renfort généralement comprise entre 15 et 50 % en volume. L'addition de 30 % de fibres de verre accroît considérablement les propriétés mécaniques du polyamide (résistance en traction et flexion, module de Young), diminue notablement la reprise d'humidité, le retrait, le coefficient de dilatation thermique, et par conséquent, améliore sensiblement la stabilité dimensionnelle des pièces. En raison de leurs propriétés favorables, les polyamides composites et plus particulièrement les (PA66-GF30) sont plus utilisés globalement dans les pièces soumises à des efforts mécaniques et à de fortes températures d'utilisation. On trouve leur application dans nombreux secteurs de l'industrie tels que la construction mécanique (les cages de roulements à billes, coussinets, bagues, roues dentées), la construction des automobiles (pièces sous capots, pièces extérieures) et l'aéronautique [38, 46,47]. Dans le tableau II.2, on présente les caractéristiques principales du PA66-GF30.

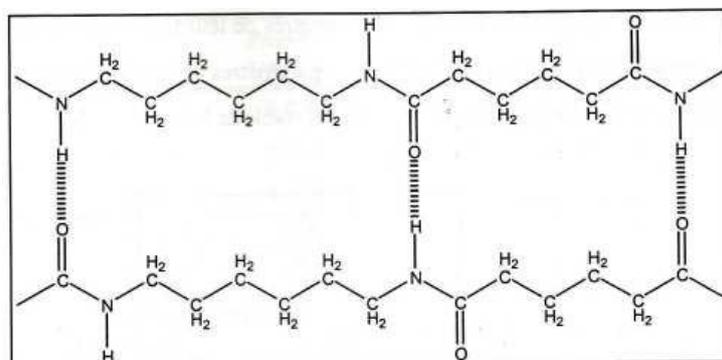


Fig. II.4. Nature des liaisons chimiques dans le polyamide 66 (phase cristalline) [15].

Tableau II.2. Caractéristiques mécaniques et thermiques du PA66-GF30 [48].

Caractéristiques générales	Normes	Valeurs	Unités
Densité	DIN EN ISO 1183-1	1.32	g/cm ³
Absorption d'humidité	DIN EN ISO 62	1.7	%
Caractéristiques mécaniques	Normes	Valeurs	Unités
Résistance à la traction	DIN EN ISO 527	100	MPa
Allongement à la rupture	DIN EN ISO 527	5	%
Module d'élasticité à la traction	DIN EN ISO 527	5000	MPa
Résistance au choc (4)	DIN EN ISO 179	6	Kj/m ²
Dureté à la bille	DIN EN ISO 2039-1	210	MPa
Dureté shore D	DIN EN ISO 868	86	Echelle D
Caractéristiques thermiques	Normes	Valeurs	Unités
Température de fusion	ISO 11357-3	260	°C
Conductivité thermique	DIN 52612-1	0.24	W/(m*k)
Capacité thermique spécifique	DIN 52612	1.5	Kj/(kg*k)
Coefficient de dilatation thermique linéaire	DIN 53752	50	10 ⁻⁶ K ⁻¹
Température d'utilisation à long terme	Moyenne	-20 à 120	°C
Température d'utilisation à court terme	Moyenne	200	°C
Température de déformation sur charge	DIN EN ISO 75 méthode A	150	°C

Dans notre étude, les essais d'usinage ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques du PA66-GF30. Pour les essais liés au plan de Taguchi, on a utilisé des éprouvettes à une longueur de 330 mm et un diamètre de 80 mm. Par contre, des éprouvettes de même longueur et un diamètre de 60 mm avec des paliers presque de 20 mm de longueur ont été utilisées pour les essais uni-factoriels. La figure II.5 montre un exemple sur les éprouvettes utilisées pour les essais d'usinage.

**Fig. II.5.** Exemple des éprouvettes utilisées du PA66 GF30.

II.5. Plan expérimental et conditions de coupe

II.5.1. Introduction

Afin d'étudier l'influence d'un ou plusieurs facteurs d'entrée sur les paramètres de réponse lors du processus d'usinage, on peut distinguer généralement deux types des

méthodes pour la conception du plan d'expérience selon l'objectif de l'étude. Ces types concernent la méthode uni-factorielle et multifactorielle. La première méthode a été utilisée pour déterminer l'impact d'un seul facteur d'entrée x sur l'évolution d'un paramètre de réponse Y . Pour cela, on fait la variation du paramètre concerné x avec les autres facteurs restent constants et simultanément, on fait les mesures du paramètre technologique Y_i . Ce qui permet d'extraire la nature de la relation qui décrit l'évolution de la réponse Y en fonction de la variable d'entrée x ($Y=f(x)$). Dans cette étude, la méthode uni-factorielle a été appliquée pour trois plans expérimentaux afin d'analyser l'effet de chaque paramètre de coupe qui dépend de la vitesse de coupe, de l'avance par tour, de la profondeur de passe, du rayon de bec et de la lubrification sur l'usinabilité du matériau en termes de la rugosité de surface et des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z). La deuxième méthode a été utilisée pour comprendre l'influence de la combinaison des plusieurs facteurs en même temps ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) sur l'évolution du paramètre de réponse étudié. Ce qui permet d'extraire le modèle selon la relation $Y_i=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. Pour cet objectif, cette méthode a été exploitée pour la planification d'un plan expérimental de Taguchi L18 afin de connaître l'impact de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe et du rayon de bec sur chaque paramètre de réponse (R_a , F_z , P et MRR).

II.5.2. Plan de Taguchi L18

La planification des expériences est une étape intéressante et peut réduire considérablement le nombre des essais. L'élévation dans le nombre des paramètres du processus conduit à un nombre d'essais important. Pour cela, la méthode de Taguchi a été utilisée dans la planification des expériences pour étudier le nombre entier des paramètres avec minimum d'essais.

Le plan sélectionné pour faire les expériences est un plan de Taguchi L18. Il se compose de 18 essais et quatre facteurs d'entrée. Trois niveaux ont été identifiés pour la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p) et deux niveaux pour le rayon du bec de l'outil (r). Les paramètres d'entrée du processus et le plan sélectionné sont présentés dans les tableaux II.3 et II.4.

Tableau II.3. Valeurs et niveaux des facteurs d'entrée.

Facteurs d'entrée	Unités	Niveaux		
		1	2	3
Rayon de bec (r)	mm	0.4	0.8	
Vitesse de coupe (V_c)	m/min	125	175	245
Avance par tour (f)	mm/tr	0.08	0.12	0.16
Profondeur de passe (a_p)	mm	0.8	1.6	2.4

Tableau II.4. Plan d'expériences de Taguchi L18.

Nombre d'essais	Niveaux des paramètres d'entrée du processus				Valeurs des paramètres de processus			
	r	Vc	f	ap	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	1	1	1	1	0.4	125	0.08	0.8
2	1	1	2	2	0.4	125	0.12	1.6
3	1	1	3	3	0.4	125	0.16	2.4
4	1	2	1	1	0.4	175	0.08	0.8
5	1	2	2	2	0.4	175	0.12	1.6
6	1	2	3	3	0.4	175	0.16	2.4
7	1	3	1	2	0.4	245	0.08	1.6
8	1	3	2	3	0.4	245	0.12	2.4
9	1	3	3	1	0.4	245	0.16	0.8
10	2	1	1	3	0.8	125	0.08	2.4
11	2	1	2	1	0.8	125	0.12	0.8
12	2	1	3	2	0.8	125	0.16	1.6
13	2	2	1	2	0.8	175	0.08	1.6
14	2	2	2	3	0.8	175	0.12	2.4
15	2	2	3	1	0.8	175	0.16	0.8
16	2	3	1	3	0.8	245	0.08	2.4
17	2	3	2	1	0.8	245	0.12	0.8
18	2	3	3	2	0.8	245	0.16	1.6

II.5.3. Plan des essais uni factoriels

II.5.3.1. Plan des essais de l'effet des facteurs de coupe

Dans le but de connaître le comportement du matériau et d'étudier l'effet de chaque facteur d'entrée sur les paramètres de réponse, une série des essais uni factoriels a été planifiée selon le plan représenté dans le tableau II.5. Le but est d'étudier l'influence de la vitesse de coupe (V_c), de l'avance (f) et de la profondeur de passe (ap) sur les critères de la rugosité de surface (R_t , R_a , R_q et R_z) et les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z).

Tableau II.5. Conditions de coupe et plan d'expériences pour les essais uni-factoriels.

Paramètres constants	Valeurs	Paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	157	f (mm/tr)	0.08, 0.12, 0.16, 0.2
ap (mm)	1		
r (mm)	0.8		
Vc (m/min)	157	ap (mm)	0.5, 0.1, 1.5, 2
f (mm/tr)	0.08		
r (mm)	0.8		
f (mm/tr)	0.08	Vc (m/min)	78.5, 111, 157, 220
ap (mm)	1		
r (mm)	0.8		

II.5.3.2. Plan des essais de l'effet du rayon de bec

Afin de comprendre l'impact du rayon de bec d'outil (r) pour différentes avances (f) et vitesses de coupe (V_c) sur les efforts de coupe et la rugosité de surface, une série des expériences a été adoptée selon le plan expérimental suivant :

Tableau II.6. Plan d'expériences pour les essais de l'effet du rayon de bec de l'outil.

Facteurs constants	Valeurs	Facteur variable	Valeurs
f (mm/tr)	0.08	r (mm)	0.4, 0.8
ap (mm)	1		
Vc (m/min)	157		
f (mm/tr)	0.16	r (mm)	0.4, 0.8
ap (mm)	1		
Vc (m/min)	157		
f (mm/tr)	0.08	r (mm)	0.4, 0.8
ap (mm)	1		
Vc (m/min)	78.5		
f (mm/tr)	0.08	r (mm)	0.4, 0.8
ap (mm)	1		
Vc (m/min)	157		

II.5.3.3. Plan des essais de l'effet de la lubrification

Afin d'analyser l'influence de la lubrification sur les phénomènes de coupe étudiés, une série des essais a été adoptée selon le plan expérimental présenté dans le tableau II.7, et cela, pour réaliser quatre objectifs. Le premier objectif lié à l'étude de l'effet de la lubrification avec des avances par tour différentes sur les efforts de coupe (F_x , F_y , F_z). D'autre part, la deuxième partie concerne la discussion de l'évolution de différents critères de la rugosité de surface en fonction de type d'usinage et l'avance par tour. Par contre, le troisième objectif est focalisé sur l'étude de l'impact de la lubrification simultanément avec des vitesses de coupe différentes sur les trois composantes de l'effort de coupe. Finalement, la dernière partie est consacrée l'analyse de l'influence de type d'usinage sur l'évolution de la qualité de surface usinée pour des vitesses de coupe distinctes.

Tableau II.7. Plan d'expériences pour les essais de l'impact de type d'usinage.

paramètres constants	Valeurs	paramètres variables	
		Type d'usinage	
f (mm/tr)	0.08	A sec	Avec lubrification
ap (mm)	1		
Vc (m/min)	157		
r (mm)	0.8		
f (mm/tr)	0.16	A sec	Avec lubrification
ap (mm)	1		
Vc (m/min)	157		
r (mm)	0.8		
f (mm/tr)	0.08	A sec	Avec lubrification
ap (mm)	1		
Vc (m/min)	78.5		
r (mm)	0.8		
f (mm/tr)	0.08	A sec	Avec lubrification
ap (mm)	1		
Vc (m/min)	157		
r (mm)	0.8		

II.6. Instruments et méthodes de mesure

II.6.1. Mesure des efforts de coupe

Le dynamomètre Kistler 9257B a été utilisé pour la mesure de l'effort de coupe principal (F_z), l'effort d'avance (F_x) et l'effort radial (F_y) en cours de l'usinage. Ce dernier est monté sur la plateforme ou la table qui se pose sous l'outil de coupe. Un amplificateur de charge 5011B et un PC basé sur un système de traitement des données avec un logiciel dynware Kistler ont été utilisés pour générer et traiter les signaux obtenus pendant les expériences de tournage. Il a une plage de mesure entre -5 KN et 5 KN, une plage des températures de travail à partir de 0 C° à 70 C°, une longueur de 170 mm, une largeur de 100 mm et une hauteur de 70 mm. Les principales caractéristiques du capteur utilisé pour mesurer les sollicitations mécaniques sont présentées dans le tableau II.8 [15].

Le principe de la mesure est basé sur l'effet piézo-électrique. Sous l'effet des efforts mécaniques exercés sur l'outil de coupe par la pièce lors de la coupe en tournage, la déformation des quatre cristaux de quartz transforme et engendre une charge électrique proportionnelle aux efforts exercés. Le signal induit a été amplifié à l'aide de l'amplificateur de charge qui convertit la charge à une tension proportionnelle. Le seuil de réponse est très sensible aux variations de la grandeur mesurée. Les opérations d'acquisition et de traitement des signaux sont liées à chaque composant des efforts de coupe. Un exemple sur les relevés des efforts générés lors de l'usinage et mesurés par ce capteur et les composantes du capteur utilisé sont abordés dans les figures II.6 et II.7.

Tableau II.8. Caractéristiques du dynamomètre Kistler 9257 B [15].

Direction de la composante	Gamme de mesure (KN)	Seuil de réponse (N)	Sensibilité (PC/N)	Rigidité (KN/ μm)
X	-5 à 5	<0.01	≈ -7.5	>1
Y	-5 à 5	<0.01	≈ -7.5	>1
Z	-5 à 10	<0.01	≈ -3.7	>1

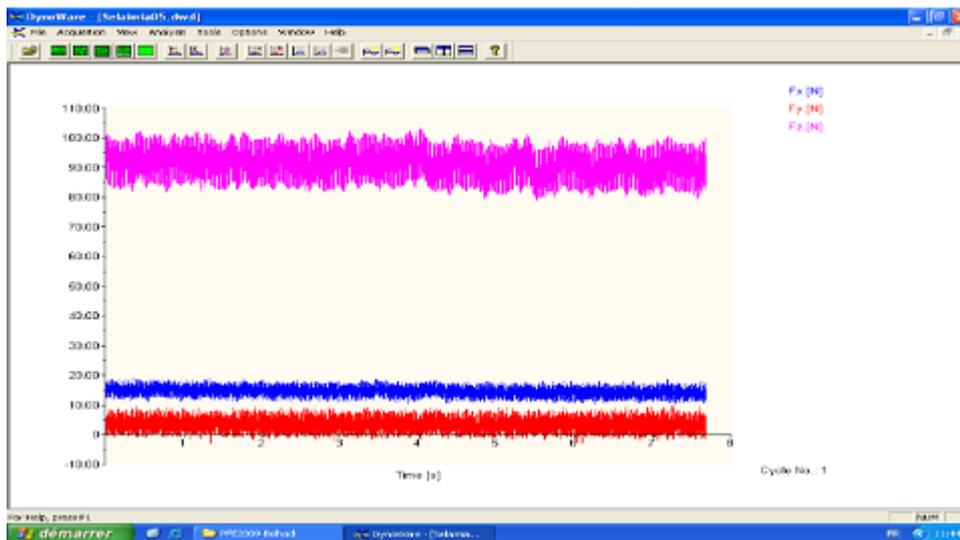


Fig. II.6. Exemple d'acquisition des composantes de l'effort de coupe lors de l'usinage [76].

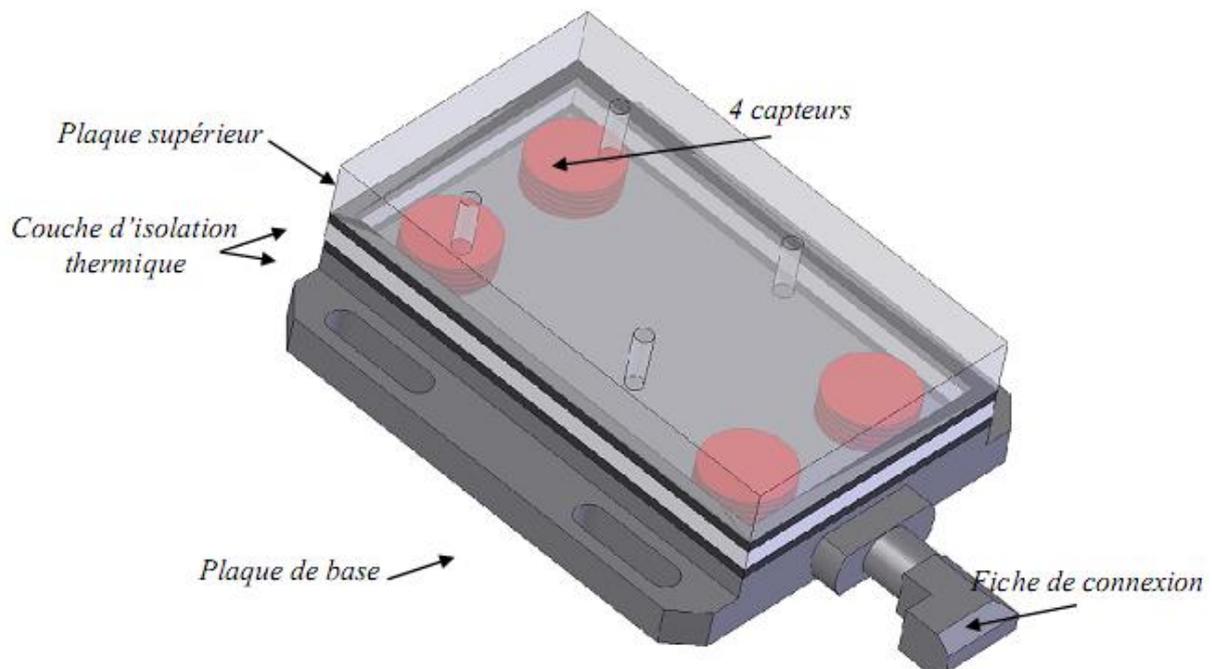


Fig. II.7. Vision interne sur les composants du capteur Kistler [18].

II.6.2. Mesure de la rugosité

La performance des pièces usinées pour une fonction donnée est liée considérablement à la qualité et aux spécifications de la surface usinée. Les critères de la rugosité sont considérés comme un indicateur sur l'évolution des endommagements enregistrés dans la structure du matériau usiné. Pour mesurer les différents critères de la rugosité, nous avons utilisé le rugosimètre SurfTest 201 (Mitutoyo) (Fig.II.8). Ce dernier possède un système de mesure composé d'une pointe de diamant (palpeur) avec un rayon d'extrémité de $5\ \mu\text{m}$ et se déplace linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation examinée est de 4 millimètres avec une longueur de base de 0.8 millimètre. La valeur mesurée du R_a est dans la marge de 0.05 à $40\ \mu\text{m}$ et de 0.3 jusqu'à $160\ \mu\text{m}$ pour R_t et R_z . Pour la précision des mesures de la rugosité, on fait trois mesures sur chaque palier et la moyenne des mesures sera considérée.

La figure II.9 présente l'organigramme de l'étude qui se compose de différents équipements pour la réalisation de la partie expérimentale afin de mesurer et d'analyser l'évolution des efforts de coupe et la rugosité de surface durant l'usinage du PA66 GF30. Aussi les méthodes de traitement statistique, de modélisation et d'optimisation appliquées dans cette étude.

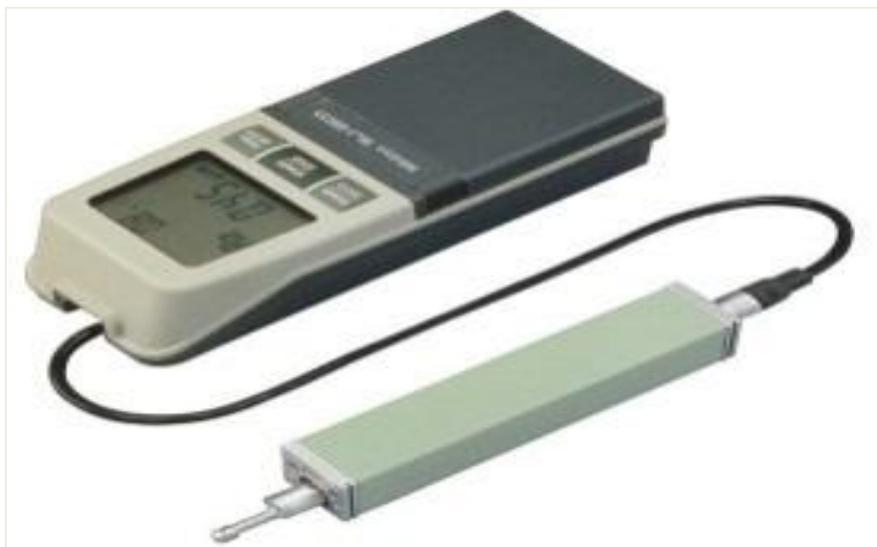


Fig. II.8. Rugosimètre 2D (surfTest mitutoyo (SJ-201)).

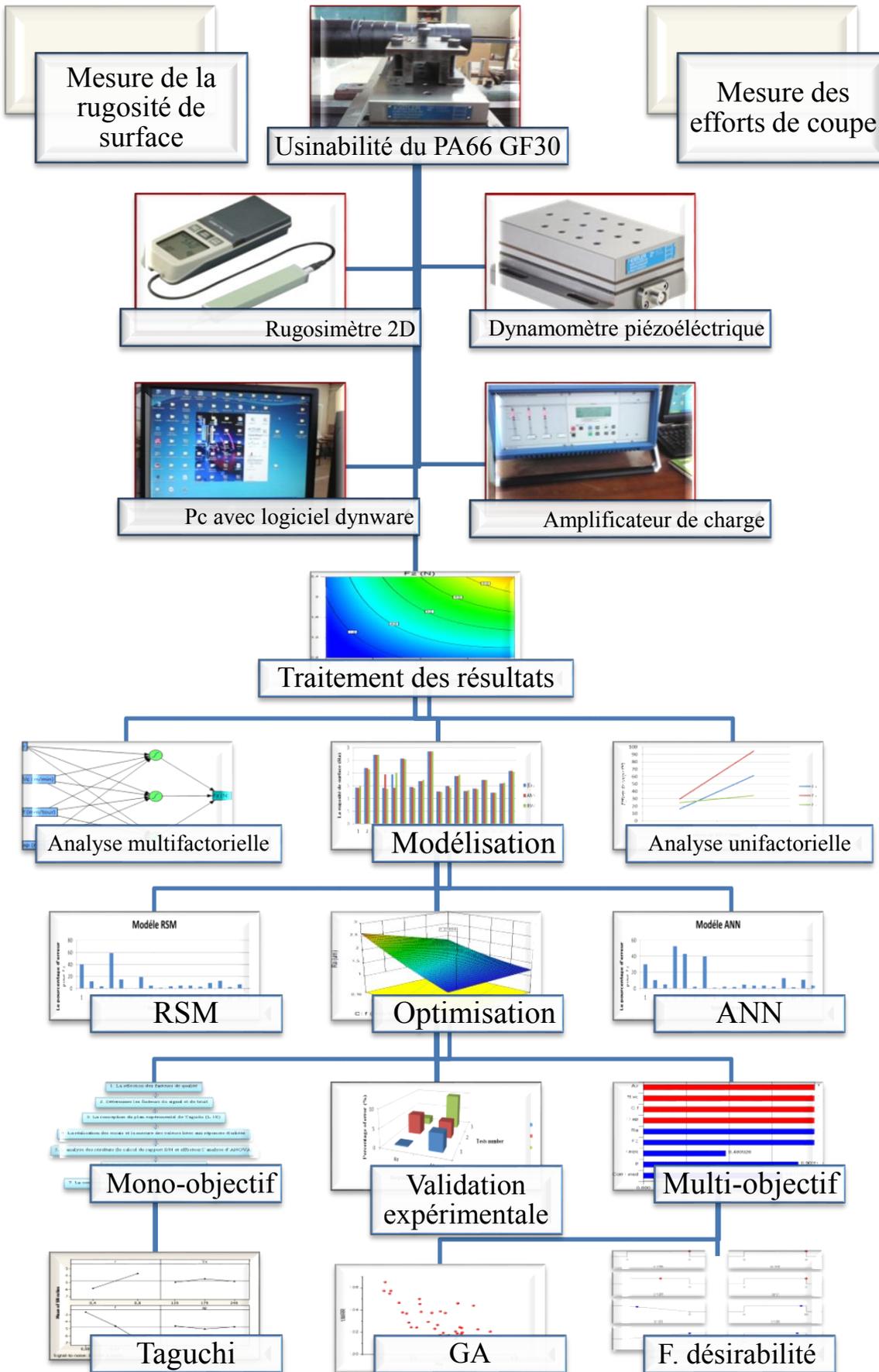


Fig. II.9. Configuration expérimentale et organigramme de l'étude.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les machines et les plans expérimentaux adoptés pour cette étude. Aussi, nous avons analysé les propriétés et les caractéristiques des outils de coupe, du matériau usiné et des instruments de mesure. D'une part, nous avons discuté les méthodes de l'analyse des résultats expérimentaux. D'autre part, l'organigramme de l'étude a été proposé dans ce cadre.

Chapitre III

Impact des conditions de coupe sur les paramètres technologiques pendant l'usinage du PA66-GF30

III.1. Introduction

Afin de comprendre l'impact de chaque facteur d'entrée du régime de coupe sur le comportement des paramètres de sortie étudiés et par suite définir les limites de bon fonctionnement du couple outil-matière, trois plans expérimentaux ont été planifiés, comme il est indiqué au chapitre II. Donc, le contenu de ce chapitre présente les résultats d'une étude expérimentale paramétrique focalisée sur l'usinabilité du PA66-GF30 en termes de la rugosité de surface et des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) en fonction du rayon de bec de l'outil (r), de l'avance par tour (f), de la vitesse de coupe (V_c), de la profondeur de passe (a_p) et de la lubrification. Pour étudier l'effet de chaque facteur d'usinage sur les paramètres de réponse, on fait quatre essais selon les valeurs liées aux variables d'entrée. La première série d'essais uni-factoriels a été réservée pour analyser l'effet des éléments du régime de coupe (f , V_c et a_p). Par contre, la deuxième série concerne l'étude de l'impact du rayon de bec de l'outil avec la variation de l'avance et de la vitesse de coupe. La dernière série d'essais considère l'influence de la lubrification simultanément avec la variation des vitesses de coupe et des avances sur l'évolution des paramètres technologiques étudiés.

III.2. Évolution des efforts de coupe

III.2.1. Influence de l'avance

La figure III.1 illustre l'évolution des efforts de coupe obtenus en fonction de la variation de l'avance (f) durant le tournage du PA66-GF30. On peut observer que l'élévation de l'avance par tour de 0.08 à 0.2 mm/tr conduit à une augmentation de 34.64 % et 25.79 % pour l'effort radial et tangentiel (F_y et F_z) respectivement. Concernant l'effort axial, on remarque que (F_x) reste constant avec des faibles valeurs de (f) et l'élévation de ce dernier commence à partir d'une valeur de l'avance par tour égale à 0.12 jusqu'à 0.2 mm/tr. Le taux enregistré de la variation a été dans la limite de 22.75 %. Généralement, avec l'augmentation de l'avance par tour, la surface de contact entre la pièce et l'outil augmente. Cela conduit à un volume de matière enlevée plus important, ce qui entraîne à l'élévation des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z). Des résultats comparables ont été obtenus lors de l'usinage du polyamide composite par la référence [42]. D'autre part, on peut remarquer que l'effet de l'avance par tour sur les composantes (F_x et F_z) est très faible pour les valeurs de (f) entre (0.08 et 0.12 mm/tr).

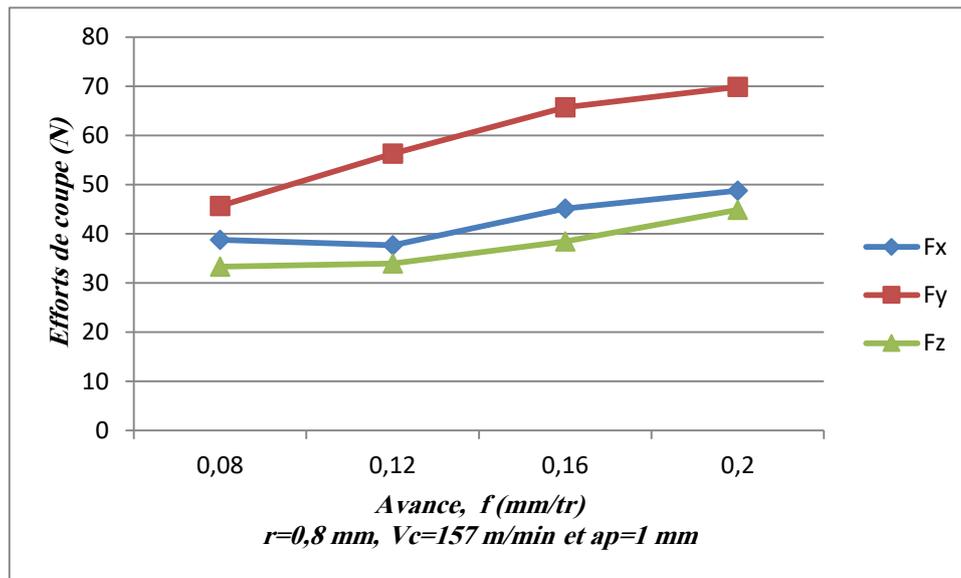


Fig. III.1. Évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance par tour

III.2.2. Influence de la vitesse de coupe

La figure III.2 expose les résultats des essais paramétriques de l'effet de la vitesse de coupe (V_c) sur les trois composantes de l'effort de coupe étudiées avec ($r=0.8$ mm, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=1$ mm). D'une façon générale, les résultats indiquent que l'effort de coupe tangentiel (F_z) est le plus affecté par la variation de (V_c), une variation de (V_c) entre 78.5 et 157 m/min entraîne une augmentation de l'effort (F_z) dans la limite de 33.9 %. D'autre part, les valeurs élevées de la vitesse de coupe entre 157 et 220 m/min peuvent contribuer à une diminution de 34.36 % dans l'effort de coupe (F_z). Par contre, on remarque que l'évolution de l'effort de coupe axial et radial en fonction de (V_c) est presque négligeable (5-7%). L'augmentation de l'effort de coupe principal peut être expliquée par l'effet abrasif le plus important des fibres de verre et la croissance du frottement outil-copeaux par rapport à la chaleur créée dans la zone de coupe, ce qui se traduit à des efforts de coupe importants pendant l'usinage. D'autre part, l'élévation de (V_c) au-delà de 157 m/min conduit à l'augmentation de la température dans la zone de coupe. Aussi, avec la faible conductivité thermique du matériau usiné, ce dernier a tendance à se ramollir, ce qui conduit finalement à la diminution de l'effort de coupe concerné.

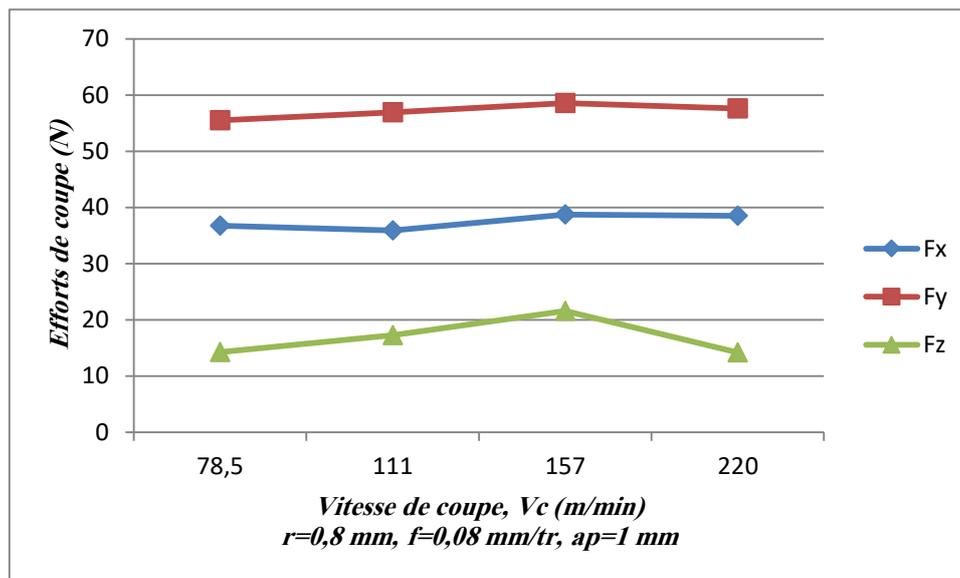


Fig. III.2. Évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse coupe

III.2.3. Influence de la profondeur de passe

La figure III.3 illustre l'effet de la variation de la profondeur de passe sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z). L'analyse des résultats indique que lorsque la profondeur de passe (a_p) augmente de 0.5 à 2 mm, les trois composantes de l'effort de coupe augmentent aussi avec un taux de 73.16 %, 65.03% et 51.66 % pour (F_x , F_y et F_z) respectivement. On peut observer que l'effort axial (F_x) est la composante la plus affectée par la variation de (a_p). D'autre part, on peut remarquer que la plus grande valeur de l'effort est enregistrée avec la composante radiale (F_y) avec une profondeur de passe (a_p) égale à 2 mm. Cette augmentation des trois composantes de l'effort de coupe peut être expliquée par l'élévation de la section du copeau lorsque (a_p) varie. Cela contribue à l'augmentation du volume de la matière à déformer, et par conséquent à des efforts élevés liés à la résistance de la matière sous l'action de coupe. Concernant, l'observation liée à la prépondérance de la composante radiale (F_y) par rapport aux deux autres composantes (F_x et F_z), on peut expliquer cela par la pression de la pièce sur l'outil sous l'impact des dilatations thermiques qui deviennent importantes lorsque la profondeur de passe prend des valeurs élevées [49]. D'autres parts, les résultats montrent que l'effort axial prend les valeurs les plus faibles pour des valeurs de (a_p) inférieures à 1.1 mm en comparaison avec les deux autres composantes. Au-delà de (a_p) égale 1.1 mm, l'effort axial devient prépondérant à l'effort tangentiel. Concernant la première remarque, le comportement peut s'expliquer par le fait que l'outil en tournage a un rayon de bec supérieur aux valeurs de la profondeur de passe [38]. Pour les valeurs de (a_p) supérieures à un rayon de bec de 0.8 mm, la coupe se fait en dehors de la limite du rayon de bec de l'outil et la pièce présente une résistance importante à la pénétration de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et particulièrement dans le sens de l'effort axial. Et par conséquent, la longueur de l'arête tranchante en contact avec la pièce augmente.

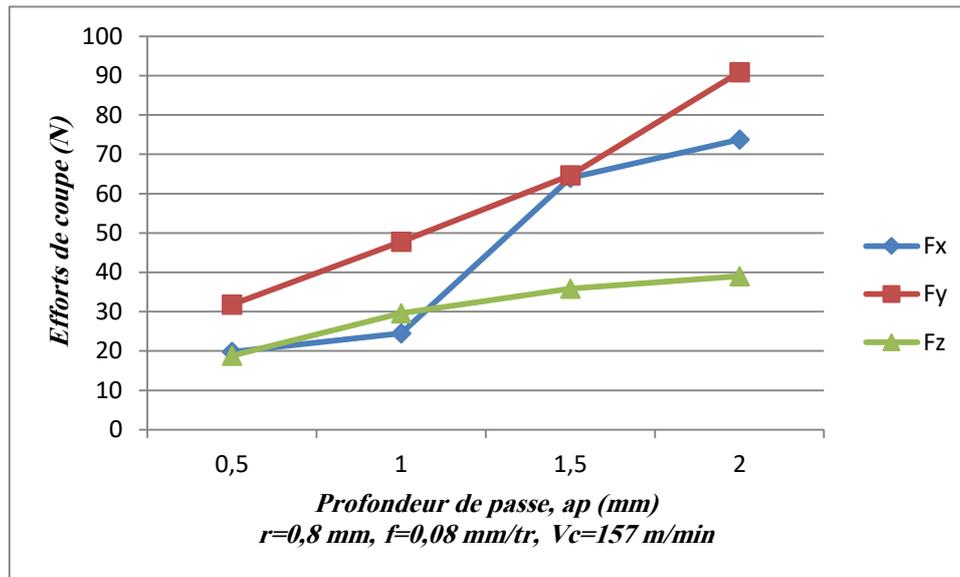


Fig. III.3. Évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe

III.3. Évolution de la rugosité de surface en fonction des paramètres du régime de coupe

III.3.1. Effet de l'avance

Dans le but de connaître l'impact de l'avance par tour (f) sur la variation de différents critères de la rugosité de surface, on présente les résultats obtenus dans la figure III.4. L'analyse de l'évolution de la qualité de surface usinée montre que l'augmentation de l'avance par tour entre 0.08 et 0.2 mm/tr conduit à une croissance pour les critères de la rugosité (R_a , R_q et R_z) égale à (29.04 %, 28.46 % et 26.1 %) successivement. La discussion et la comparaison des résultats expérimentaux démontrent que l'avance par tour est le facteur le plus significatif qui possède une influence sur la détérioration de la rugosité de surface pendant le tournage du polyamide renforcé en fibres de verre, mais le degré de l'influence et la nature de la relation est différente de celle applicable pour les métaux en raison de la microstructure hétérogène des matériaux composites renforcé par des fibres de verre (GFRP). D'une façon générale, on peut expliquer les conséquences liées à la détérioration de la qualité de surface usinée par trois facteurs, le premier concerne l'augmentation dans la zone de coupe et le volume de la matière éliminée, ce qui implique des efforts de coupe élevés pour l'enlèvement de la matière [50,51]. Ces efforts représentent la cause principale qui conduit à l'augmentation de la rugosité de surface. D'une part, le choix des avances élevées engendre une grande quantité de la chaleur dans la zone de coupe, ce qui peut conduire à une usure accélérée des outils de coupe qui se traduit finalement par un état de surface médiocre. D'autre part, l'augmentation des avances induit la croissance des vibrations (broutage) et la création d'une forme d'usinage incomplète. Toutes les causes précédentes peuvent conduire à

une qualité de surface mauvaise. Des résultats similaires ont été obtenus lors de l'usinage des composites renforcés en fibres de verre dans la littérature [52, 28, 32,38].

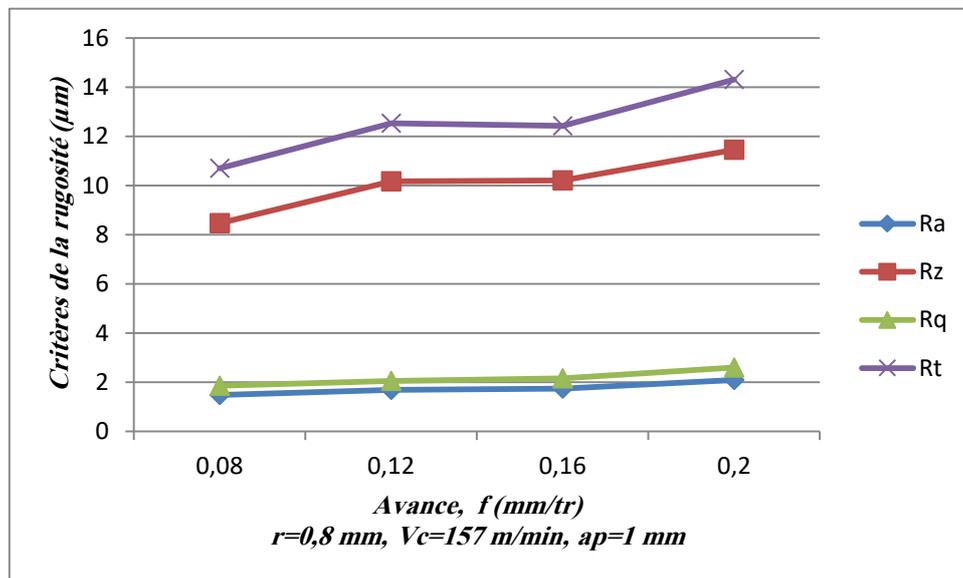


Fig. III.4. Évolution de la rugosité de surface en fonction de l'avance par tour

III.3.2. Effet de la vitesse de coupe

La figure III.5 présente les différents résultats obtenus qui concernent l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface. L'analyse des résultats montre que la variation de la vitesse de coupe entre 78.5 et 157 m/min conduit à une élévation de 16.87 % pour la rugosité de surface (Ra) et de 6.26 % pour la rugosité totale (Rt). D'une part, l'évolution de la vitesse de coupe entre 111 et 157 m/min engendre une diminution de 26.25 % et 8.32 % pour la rugosité de surface (Ra et Rt) respectivement. D'autre part, les valeurs élevées de la vitesse de coupe supérieures à 157 m/min contribuent à la croissance de la rugosité de surface (Ra et Rt) successivement à un taux de 19.37 % et 19.9 %. Au début, l'augmentation de la rugosité de surface a été expliquée par le dégagement d'une grande quantité de la matière et des fibres coupées, ce qui permet de créer un état de surface médiocre lors du tournage. La diminution de la rugosité de surface après une valeur de la vitesse de coupe égale à 111 m/min peut être expliquée par le contenu des copeaux qui se constitue principalement à une petite déformation de la matière de la matrice et des fibres coupées. Pour des valeurs élevées de la vitesse de coupe supérieures à 157 m/min, le taux de déformation des fibres de verre dans la matière et des vibrations augmentent, ce qui conduit à une usure accélérée des outils de coupe et par conséquent à la dégradation de la qualité de surface usinée [52].

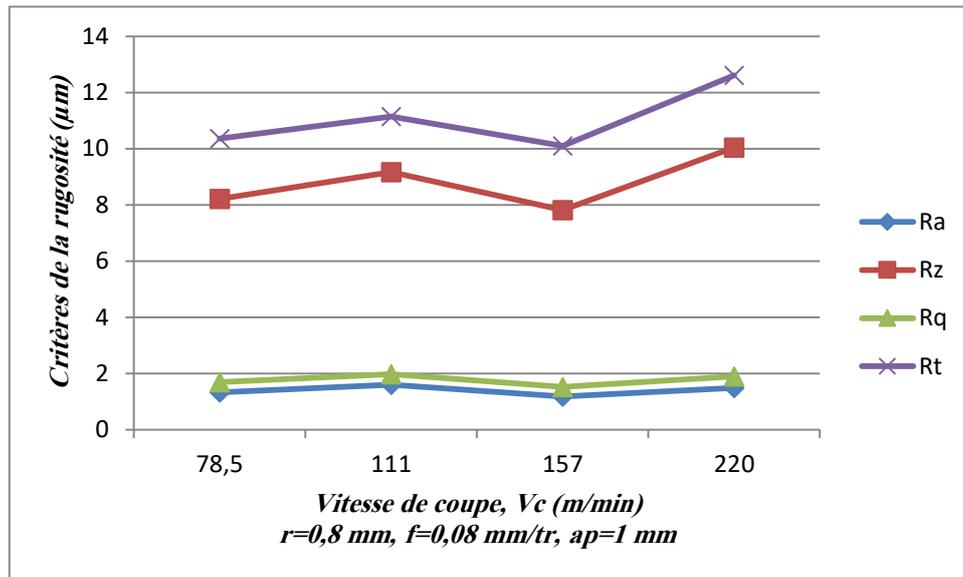


Fig. III.5. Évolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe

III.3.3. Effet de la profondeur de passe

Afin d'analyser l'effet de la profondeur de passe sur les différents critères de la rugosité de surface, les résultats obtenus liés à cet objectif sont exprimés dans la figure III.6. D'après cette figure, on peut conclure que la variation de la profondeur de passe entre 0.5 et 1.5 mm conduit à un taux d'élévation de la rugosité de surface (Ra) égal à 6.33 %. Par contre, les valeurs élevées de la profondeur de passe entre 1.5 et 2 mm entraîne une diminution de la rugosité de surface (Ra) égale à 2.81 %. Pour la rugosité de surface (Rt), on remarque que lorsque la profondeur de passe prend des valeurs entre 0.5 et 2 mm, cette dernière contribue à l'augmentation de (Rt) dans la limite de 8.82 %. Ces résultats montrent clairement que l'effet de la profondeur de passe sur la qualité de surface lors de l'usinage du PA66- GF30 est faible. Des résultats similaires ont été obtenus dans la référence [52] lors de l'usinage des composites à matrice polymère renforcée par des fibres de verre GFRP. Concernant l'accroissement léger de différents critères de la rugosité, on peut expliquer cette observation par l'augmentation des efforts de coupe. Par contre, la croissance dans la longueur de contact entre l'outil et la pièce peut améliorer les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe, ce qui contribue à la réduction de l'usure des outils et d'améliorer la qualité de surface usinée [53].

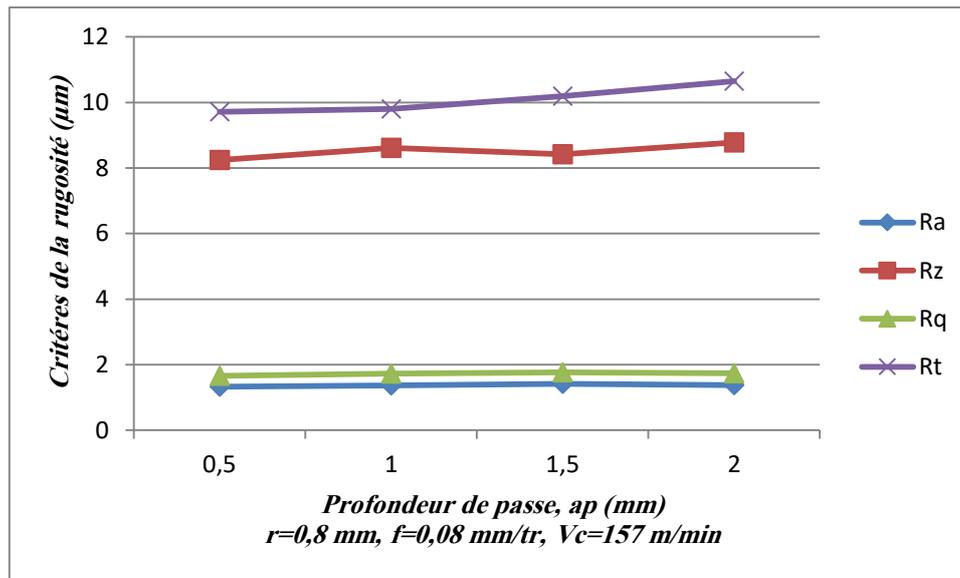


Fig. III.6. Évolution de la rugosité de surface en fonction de la profondeur de passe

III.4. Impact du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe et la rugosité de surface

III.4.1. Impact du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe avec des avances par tour différentes

La figure III.7(a et b) illustre l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe lors de l'usinage du PA66-GF30 en utilisant deux plaquettes de coupe en carbure revêtue avec une géométrie différente (SPUN 12 03 04 et SPUN 12 03 08) pour des avances par tour ($f=0.08$ et $f=0.16$ mm/tr). D'après la figure III.7a, on remarque que lorsque le rayon de bec accroît entre (0.4 et 0.8 mm), les composantes (axiale et radiale) augmentent aussi avec un taux de variation égal à 39.59 % et 49.46 % respectivement. Concernant l'effort de coupe principal (F_z), on peut noter que la variation du rayon de bec entre 0.4 et 0.8 mm engendre une diminution de 52.52 %. D'autre part, il est évident que l'effort radial est le facteur qui porte les valeurs les plus importantes que les autres composantes de l'effort de coupe suivi par l'effort axial et tangentiel. L'augmentation des composantes (F_x et F_y) en fonction du rayon de bec a été démontrée par la croissance dans la surface de contact entre l'outil et la pièce notamment dans la direction du mouvement d'avance et radial.

D'après la figure III.7.b et pour une avance par tour de 0.16 mm/tr, on peut observer que la variation du rayon de bec entre 0.4 et 0.8 mm conduit à une augmentation de 73.82 %, 68.54 % et 28.03 % pour les efforts axial, radial et tangentiel respectivement. L'analyse statistique de ces résultats montre clairement l'effet le plus important du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe à une valeur élevée de l'avance par tour notamment lors de l'utilisation d'un grand rayon de bec. D'autre part, la comparaison liée à l'évolution de l'effort de coupe principal montre la croissance de ce dernier avec l'élévation du rayon de bec entre 0.4 et 0.8 mm, contrairement aux résultats obtenus pour une faible valeur de l'avance par tour, ce qui confirme le rôle le plus important de l'avance sur l'évolution de l'intensité et le sens de l'effort tangentiel en fonction du rayon de bec. Ce résultat a été expliqué par la

relation proportionnelle entre l'avance par tour et l'effort de coupe tangentiel, l'augmentation de l'avance par tour permet d'augmenter la surface des copeaux enlevés, ce qui conduit finalement à la contribution dans la croissance de l'effort de coupe (F_z). D'autre part, pour des valeurs du rayon de bec inférieures à 0.5 mm, on peut observer que l'effort axial prend les valeurs les plus faibles en comparaison avec d'autres composantes. Par contre, pour des valeurs du rayon de bec supérieures à 0.5 mm, l'effort axial devient prépondérant à l'effort tangentiel.

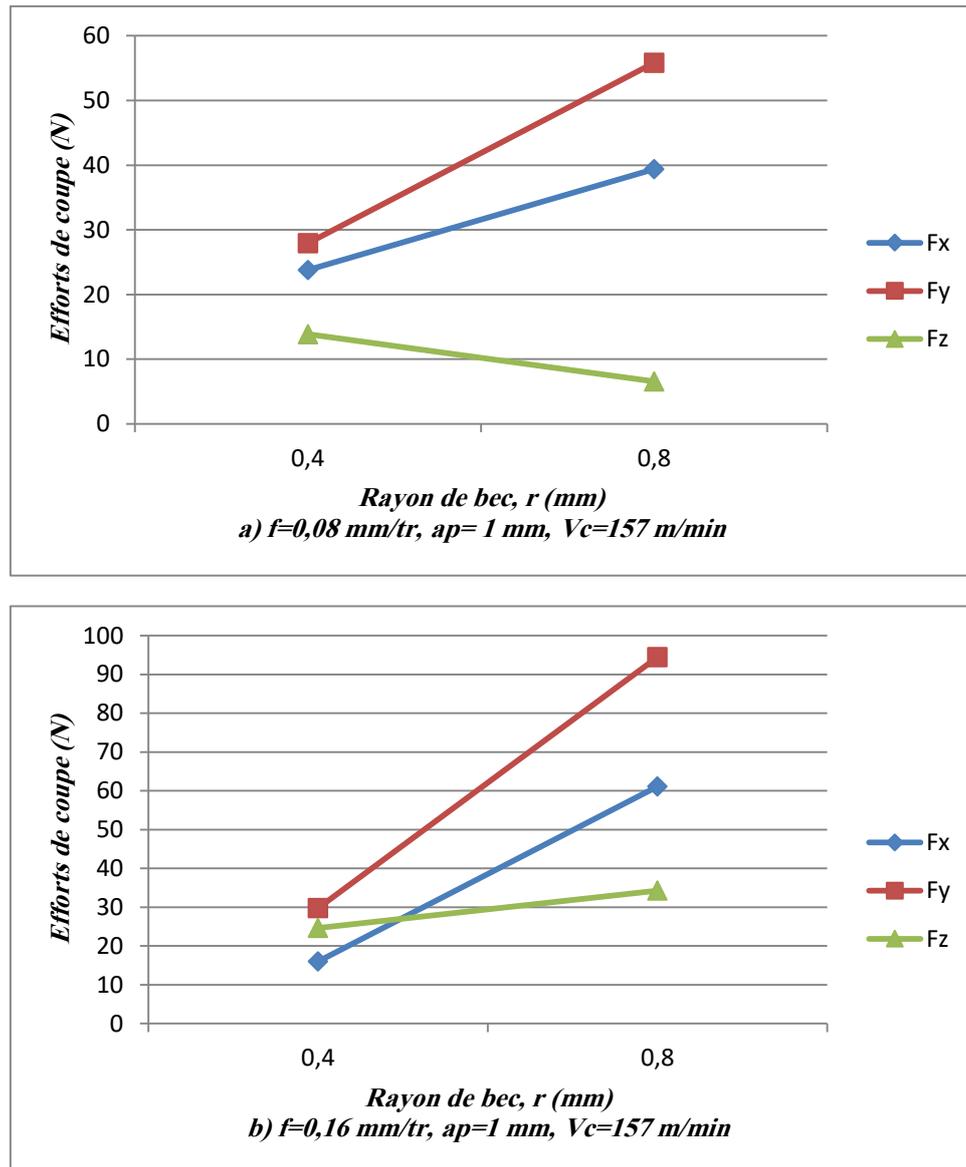
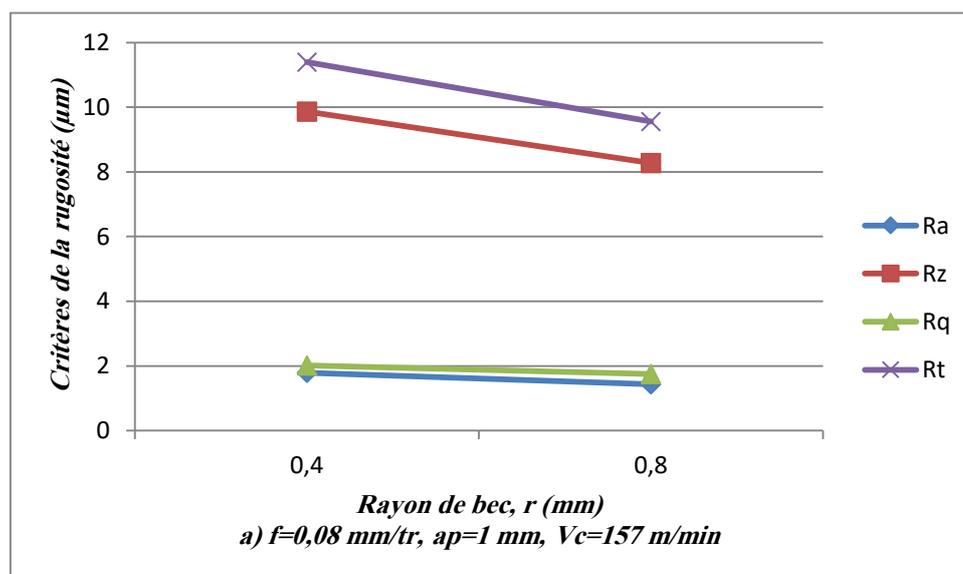


Fig. III.7. Évolution des efforts de coupe en fonction du rayon de bec-avance par tour

III.4.2. Impact du rayon de bec sur l'évolution de la rugosité de surface avec des avances par tour différentes

Les différents résultats liés à l'évolution de la rugosité de surface en fonction de la variation du rayon de bec sont exprimés dans la figure III.8 (a et b). On peut remarquer que lorsque le rayon de bec augmente entre 0.4 et 0.8 mm pour une valeur de l'avance par tour égale à 0.08 mm/tr, la rugosité de surface diminue avec un taux de 20.11 %, 16.12 %, 12.93 % et 16.06 % pour la rugosité de surface (Ra, Rz, Rq et Rt) respectivement. Par contre, pour une valeur élevée de l'avance par tour égale à 0.16 mm, la figure III.8.b illustre que la variation du rayon de bec entre 0.4 et 0.8 mm permet de diminuer la rugosité de surface (Ra, Rz, Rq et Rt) avec un taux de 24.24 %, 8.55 %, 20.25 % et 0.71 % respectivement. Les résultats obtenus montrent clairement que le rayon de bec possède un effet moins significatif que l'avance par tour. D'une part, on peut conclure que le taux de variation de la rugosité de surface en fonction du rayon de bec pour une faible valeur de l'avance est plus significatif par rapport à une valeur élevée de l'avance par tour, mais la direction de l'influence reste la même. L'amélioration enregistrée dans la qualité de surface en fonction du rayon de bec peut être en raison de la relation inverse entre la dimension du rayon de bec d'outil et l'état de surface usiné. D'autre part, l'interaction entre le rayon de bec et l'avance par tour est reliée principalement à la hauteur des pics du profil de la rugosité de surface. Pour cela, l'augmentation de l'avance signifie que la quantité de la matière enlevée à partir du pic de la révolution précédente est réduite. Par contre, l'utilisation d'un outil de coupe à grand rayon de bec permet de limiter cet effet. Ce qui explique la différence enregistrée dans la détérioration de la rugosité de surface entre les deux rayons de bec en fonction de l'augmentation de l'avance par tour.



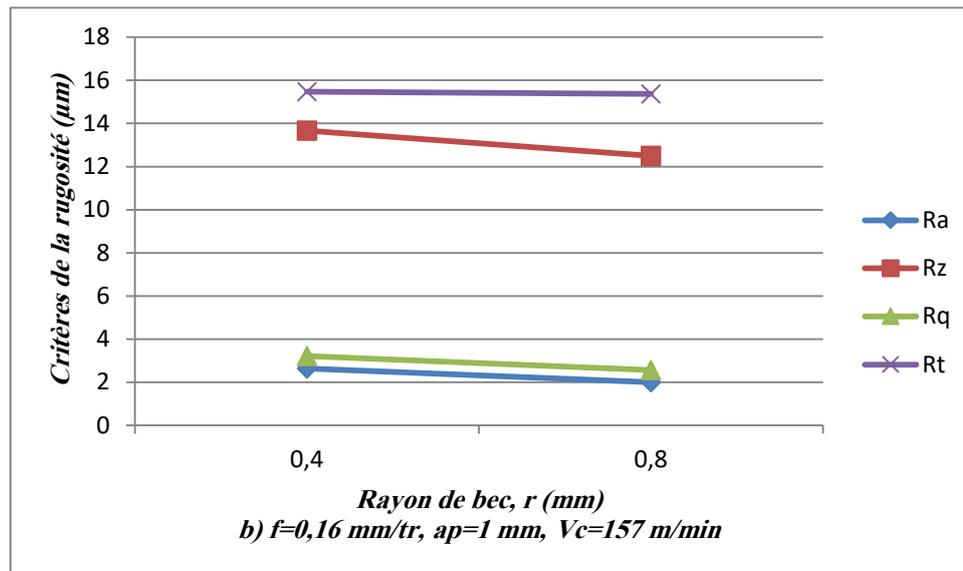
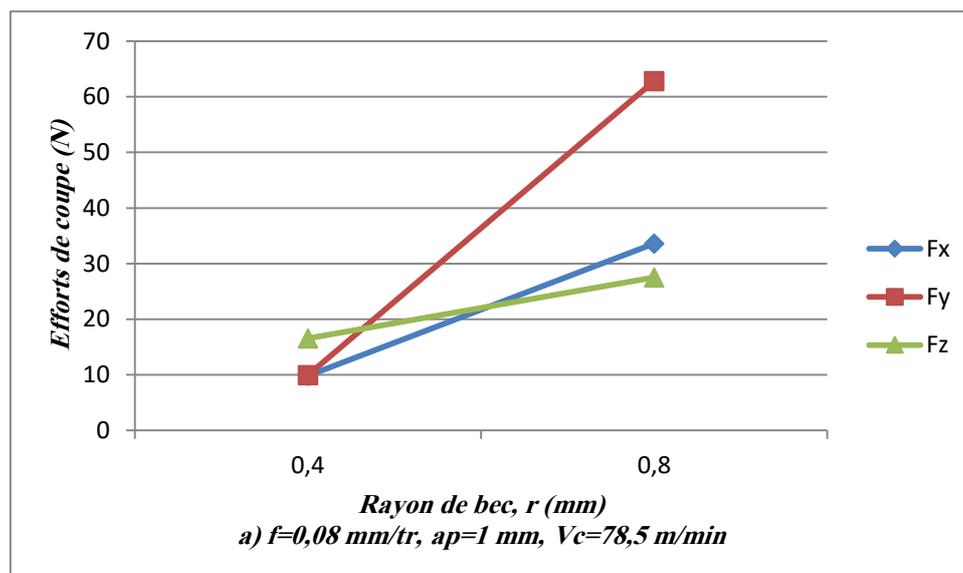


Fig. III.8. Évolution de la rugosité de surface en fonction du rayon de bec-avance par tour

III.4.3. Impact du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe avec des vitesses de coupe différentes

Les résultats obtenus qui concernent l'influence du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) avec des vitesses de coupe différentes sont exprimés dans la figure III.9 (a et b). D'une façon générale, les résultats observés dans la figure III.9.a indiquent que l'utilisation d'un grand rayon de bec contribue dans la croissance de trois composantes de l'effort de coupe avec un taux de variation égal à 70.66 %, 84.11 % et 39.97 % pour l'effort axial, radial et tangentiel respectivement. D'une part, il est à noter que l'effort axial prend les valeurs les plus faibles pour une dimension du rayon de bec réduite inférieure à 0.6 mm. À partir d'une valeur du rayon de bec supérieure à 0.6 mm, l'effort tangentiel prend les valeurs les plus petites par rapport aux autres composantes. D'autre part, à une faible valeur du rayon de bec près de 0.4 mm, l'effort tangentiel porte les valeurs les plus importantes en comparaison avec l'effort axial et radial. Avec l'augmentation du rayon de bec, l'effort radial devient prépondérant sur les autres composantes de l'effort de coupe. Pour une vitesse de coupe élevée ($V_c=157$ m/min), la figure III.9.b indique que lorsque le rayon de bec accroît, les trois composantes de l'effort de coupe augmentent successivement de 35.82 %, 46.51 % et 9.69 %. L'analyse statistique des résultats montre clairement que la variation de (r) entre 0.4 et 0.8 mm possède une influence plus significative sur l'évolution des efforts de coupe à une faible valeur de la vitesse de coupe ($V_c=78$ m/min) par rapport à des valeurs élevées ($V_c=157$ m/min). Par ailleurs, on peut conclure que l'effet de (r) sur l'évolution de l'effort de coupe tangentiel est faible pour une valeur élevée de la (V_c) en comparaison avec une faible valeur de (V_c). Aussi, on peut observer que lorsque (r) prend des petites valeurs ($r=0.4$ mm) pour une (V_c) minimale, les trois composantes de l'effort de coupe portent les valeurs les plus faibles que celles obtenues à une (V_c) élevée. Pour une grande valeur du rayon de bec ($r=0.8$ mm), on peut noter que les efforts de coupe en général sont plus

importants à une faible valeur de (V_c) par rapport à des (V_c) élevées. D'une façon générale, l'augmentation de (r) signifie que la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente, ce qui implique des efforts de coupe élevés. D'autre part, l'augmentation de (V_c) indique que le frottement outil-coupeaux accroît en raison de la quantité de la matière enlevée notamment lorsqu'on prend en compte l'effet et la nature des fibres coupées, ce qui peut conduire finalement à des efforts de coupe importants. Par contre, l'augmentation de (V_c) à une valeur maximum ($V_c=157$ m/min) permet de créer une quantité de la chaleur élevée dans la zone de coupe, ce qui rend le matériau plus plastique ou malléable (matrice polymère) et par conséquent le matériau devient moins résistant. Ce qui contribue à la réduction du taux d'augmentation des efforts de coupe. Cependant, on peut observer exceptionnellement la différence dans la direction de l'influence entre les deux types des plaquettes utilisées. Ce phénomène peut être en raison de la dimension du rayon de bec, avec un grand rayon de bec, l'outil est plus résistant à l'endommagement de la rupture et d'usure, ce qui contribue dans la réduction des efforts enregistrés en comparaison avec un rayon de bec minimum ($r=0.4$ mm) pour une vitesse de coupe maximum.



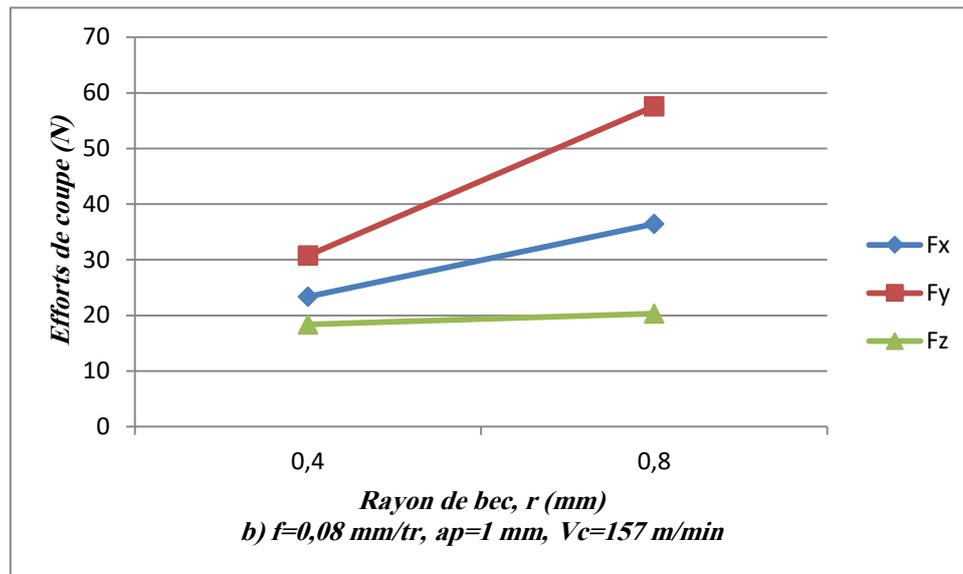


Fig. III.9. Évolution des efforts de coupe en fonction du rayon de bec-vitesse de coupe

III.4.4. Impact du rayon de bec sur l'évolution de la rugosité de surface avec des vitesses de coupe différentes

La figure III.10.a illustre l'évolution de différents critères de la rugosité de surface en fonction de (r) à ($Vc=78.5$ m/min). Les résultats observés indiquent que l'élévation dans la valeur de (r) entre 0.4 et 0.8 mm induit une diminution de 16.66 %, 11.53 %, 18.04 % et 17.32 % pour la rugosité de surface (Ra , Rz , Rq et Rt) respectivement. D'autre part, la figure III.10.b présente les résultats obtenus liés à l'évolution de la rugosité de surface à ($Vc=157$ m/min). Les résultats montrent que la variation de (r) entre 0.4 et 0.8 mm conduit à une diminution de 4.63 %, 2.43 % et 4.76 % pour la rugosité (Ra , Rz et Rq) respectivement. L'analyse des résultats indique que l'effet du rayon de bec sur l'évolution de la rugosité de surface à ($Vc=78.5$ m/min) est plus significatif par rapport à une vitesse de coupe. Aussi, la comparaison entre les résultats obtenus illustre que la rugosité de surface porte les valeurs les plus élevées avec un rayon de bec minimum égal à 0.4 mm (sauf Ra) pour une valeur minimale de la vitesse de coupe ($Vc=78.5$ m/min) en comparaison avec ($Vc=157$ m/min). Par contre, la rugosité de surface porte les valeurs les plus faibles à un rayon de bec élevé ($r=0.8$ mm) pour une faible valeur de (Vc) que celle obtenue avec une vitesse élevée. L'augmentation de (r) signifie que la forme du bec est plus arrondie, ce qui se traduit à un profil de la rugosité amélioré sur la surface usinée par rapport à un rayon de bec réduit. Pour ($Vc=78$ m/min), le dégagement des copeaux à grande largeur avec des fibres coupées conduit à la détérioration de la rugosité de surface. Avec l'augmentation de (Vc), la largeur des copeaux diminue avec un bon dégagement et une petite déformation des fibres dans la matière, ce qui permet d'améliorer la rugosité de surface. Par contre, la différence enregistrée dans la direction de l'influence entre les deux rayons de bec pour une valeur maximum de (Vc) par rapport à une (Vc) minimale a été démontrée par l'augmentation des vibrations pour une vitesse élevée. Par contre, l'utilisation d'un outil à un rayon de bec réduit permet de limiter cet impact.

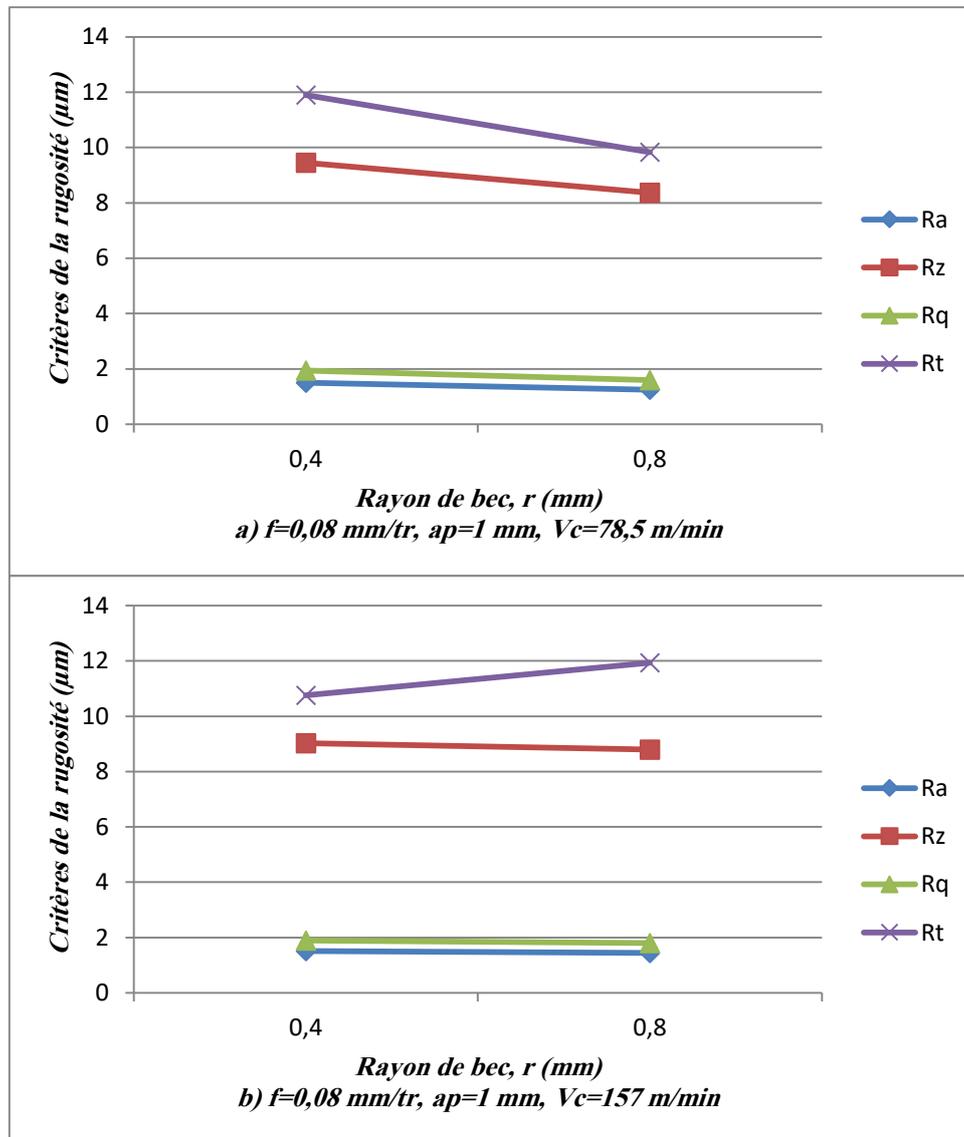


Fig. III.10. Évolution de la rugosité de surface en fonction du rayon de bec-vitesse de coupe

III.5. Impact de la lubrification sur l'évolution des efforts de coupe et de la rugosité de surface

La formation des copeaux lors de l'usinage est toujours liée au dégagement de la chaleur résultante de frottement du copeau glissant sur la face de coupe et la surface de contact entre la face de dépouille de l'outil et la pièce. La quantité de la chaleur engendrée dans la zone de coupe influe considérablement sur la partie active de l'outil et la résistance du matériau usiné. Parmi les principaux facteurs qui contribuent dans la croissance de la température de coupe durant l'usinage sont la vitesse de coupe et l'avance par tour. Par contre, la solution usinage avec lubrification représente un outil principal permettant de limiter le frottement et l'échauffement dans la zone de coupe, ce qui conduit finalement à des conséquences importantes relatives aux différents phénomènes de coupe étudiés comme les efforts de coupe, l'usure des outils et la qualité de surface usinée. Pour cela, cette optique s'inscrit dans ce cadre.

III.5.1. Influence de la lubrification sur l'évolution des efforts de coupe avec des avances par tour différentes

Les résultats relatifs à l'effet de la lubrification sur les trois composantes de l'effort de coupe avec des avances différentes sont présentés dans la figure III.11 (a et b). Les résultats obtenus montrent que les valeurs les plus importantes des efforts de coupe ont été enregistrées lors de l'usinage avec lubrification par rapport à celles obtenues pendant l'usinage à sec. Ce comportement a été démontré par l'effet de lubrification qui contribue dans la réduction de la chaleur créée dans la zone de coupe. Ce qui rend le matériau plus résistant et par conséquent les efforts nécessaires pour l'enlèvement de la matière aussi augmentent.

Avec une avance élevée de 0.16 mm/tr, généralement on peut observer une légère diminution dans les efforts de coupe sauf pour (F_z) lors de l'utilisation d'un liquide lubrifiant avec un taux de variation de 11.84 % et 4.08 % pour l'effort axial et radial respectivement. L'augmentation de l'avance signifie que le volume et la largeur des copeaux et de la matière enlevée accroît et les efforts de coupe résultants sont importants. Par contre, l'utilisation d'un lubrifiant permet de limiter l'effet de la chaleur créée. Mais contrairement aux résultats relatifs à une avance minimum ($f=0.08$ mm/tr), le sens de l'influence reste vers la diminution en raison de la grande quantité de la chaleur résultante en comparaison avec une avance par tour minimum notamment lorsqu'on prend en compte la nature de la matrice polymère qui permet de concentrer la chaleur dans la zone de coupe. D'une part, l'efficacité insuffisante de la lubrification sur les phénomènes de coupe étudiés peut être en raison de la pression la plus faible d'arrosage. Pour cela, le contact de liquide lubrifiant avec la surface commun entre la face de coupe et les copeaux est réduit et en conséquence l'effet de la lubrification sur la réduction de l'échauffement de la partie active de l'outil de coupe et des copeaux sont limités.

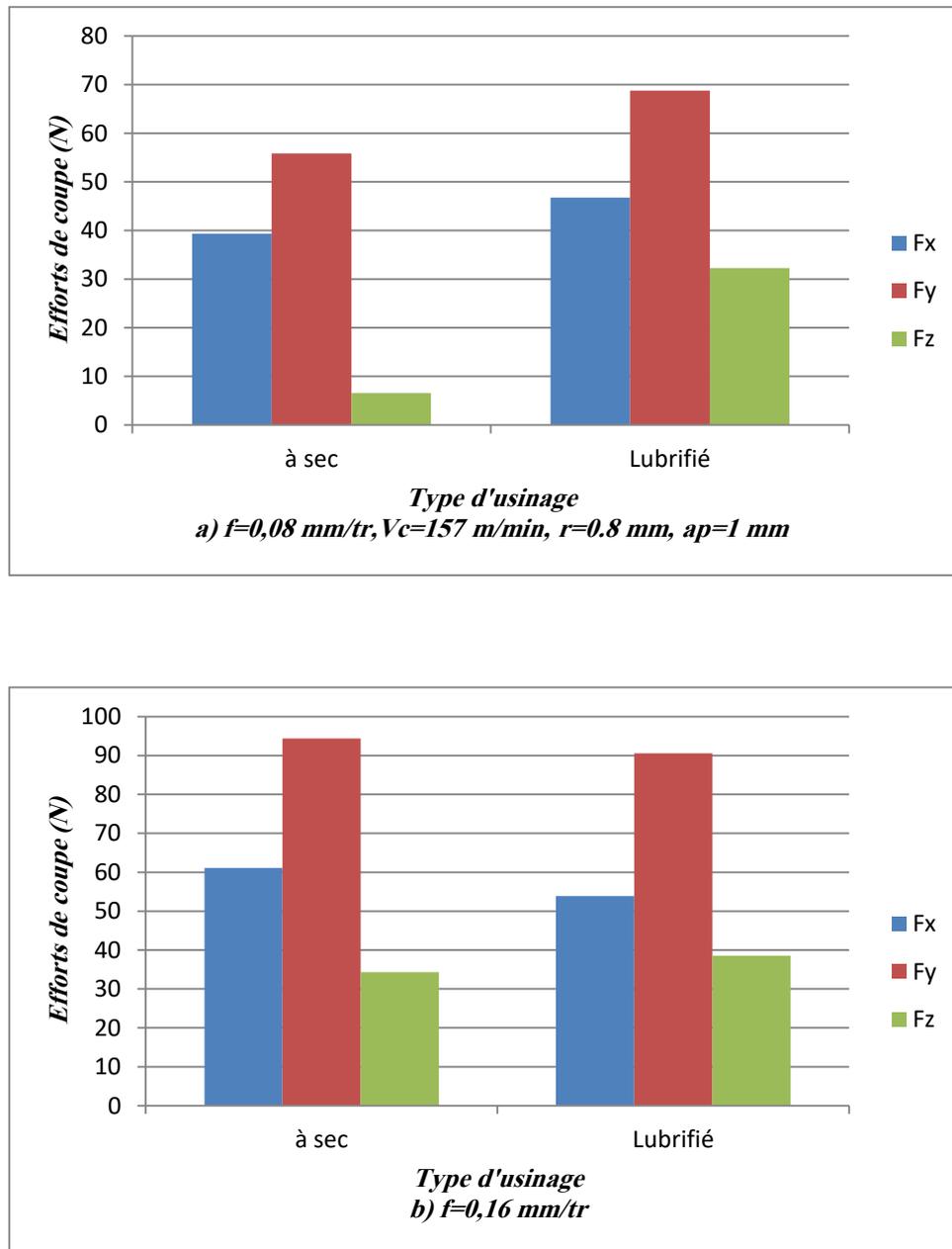


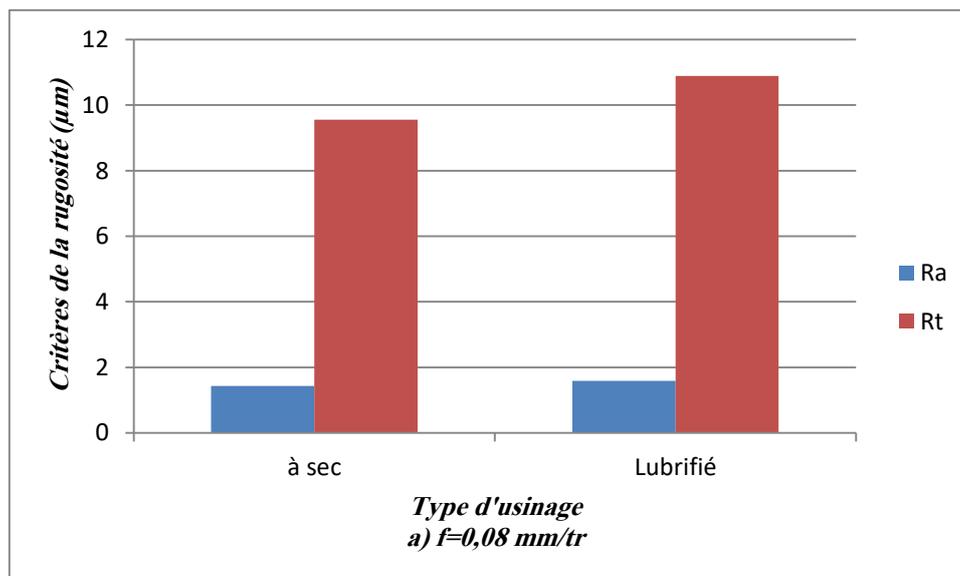
Fig. III.11. Évolution des efforts de coupe en fonction de la lubrification-avance par tour

III.5.2. Influence de la lubrification sur l'évolution de la rugosité de surface avec des avances par tour différentes

Les résultats expérimentaux liés à l'impact de la lubrification sur l'évolution de différents critères de la rugosité de surface pour des avances différentes sont exprimés dans la figure III.12 (a et b). D'après la figure III.12.a, on peut noter que l'utilisation d'un liquide lubrifiant lors de l'usinage pour une avance par tour égale à 0.08 mm/tr contribue à la détérioration de la rugosité de surface avec un taux d'augmentation égal à 10.06 % et 12.21 % pour (R_a et R_t) respectivement. D'autre part, pour une avance de 0.16 mm/tr, la figure III.12.b

illustre que l'usinage avec lubrification permet d'améliorer la qualité de surface usinée en comparaison avec l'usinage à sec, la diminution de la rugosité de surface a été enregistrée dans la limite de 18.5 % et 18.59 % pour la rugosité (Ra et Rt).

Avec une petite avance, le volume de la matière enlevée est minimum, ce qui contribue à la réduction du frottement dans la zone de coupe, de la chaleur générée et de l'usure des outils. Toutes les causes précédentes peuvent engendrer un bon état de surface usiné. Cependant, l'effet le plus important de la température de coupe est lié à la résistance de la matrice polymère du matériau usiné, l'utilisation de lubrification pendant l'usinage permet de diminuer l'effet de la température de coupe. Ce qui rend le matériau plus résistant sous l'effet de coupe et par conséquent, il contribue dans la croissance des efforts de coupe et de la rugosité de surface concernée. D'autre part, l'augmentation de l'avance à une valeur de 0.16 mm/tr signifie que le volume de la matière coupée est maximum, ce qui conduit à un taux de frottement élevé, une quantité importante de la chaleur créée et un taux d'usure et de vibration accélérée. L'impact de lubrification permet de faciliter l'écoulement des copeaux et de réduire le frottement dans la zone de cisaillement, de diminuer l'échauffement de l'outil et des copeaux, ce qui explique l'amélioration enregistrée dans la rugosité de surface que celle obtenue lors de l'usinage à sec.



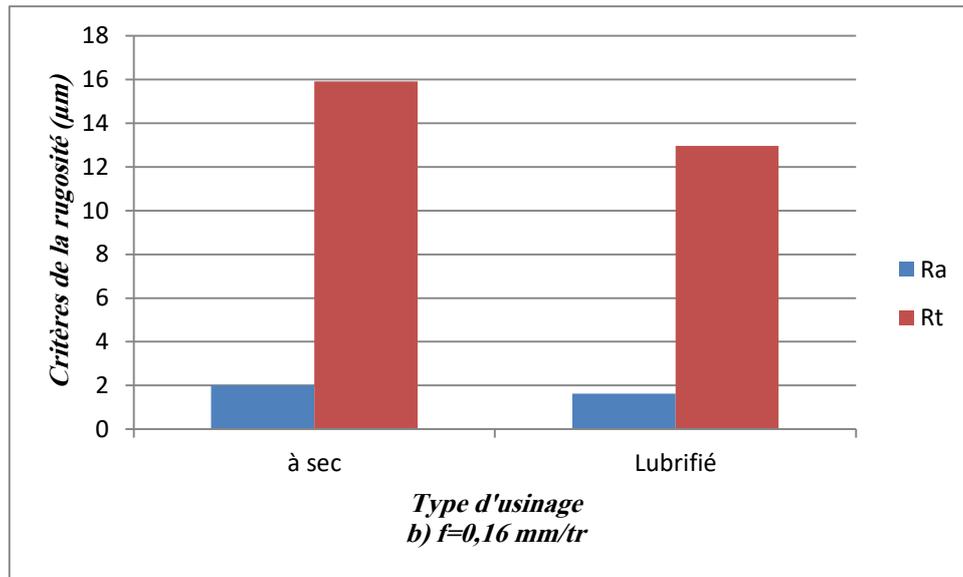


Fig. III.12. Évolution de la rugosité de surface en fonction de la lubrification-avance par tour

III.5.3. Influence de la lubrification sur l'évolution des efforts de coupe avec des vitesses de coupe différentes

D'après la figure III.13 (a et b) qui présente l'évolution des efforts de coupe lors de l'usinage à sec et avec lubrification pour des vitesses de coupe différentes, on peut conclure que lorsqu'on passe de l'usinage à sec à l'usinage lubrifiant, les trois composantes de l'effort de coupe augmentent pour les deux cas étudiés. Cependant, il est à noter que les efforts de coupe portent les valeurs les plus importantes à une vitesse de coupe minimum ($V_c=78.5$ m/min) pour les deux types d'usinage. Pratiquement, la variation enregistrée dans les efforts de coupe pour une vitesse de coupe minimum a été dans la limite de 26.71 %, 27.9 % et 2.47 % pour (F_x , F_y et F_z). Pour une vitesse de coupe élevée ($V_c=157$ m/min), la variation des efforts axial, radial et tangentiel a été successivement 33.16 %, 27.44 % et 8.91 %. L'augmentation des efforts de coupe lors de l'usinage lubrifié s'explique par l'impact de la lubrification qui permet de refroidir la zone de coupe et d'augmenter la résistance du matériau sous l'effet de coupe notamment lorsqu'on prend en compte la grande sensibilité de la matrice polymère à la variation de température de coupe en comparaison avec des métaux. Par contre, avec une vitesse de coupe élevée, la chaleur résultante dans la zone de coupe devient importante par rapport à une faible vitesse de coupe, ce qui permet de rendre la pièce moins résistante et par conséquent les efforts nécessaires pour la déformation de la matière diminuent considérablement. L'utilisation de la lubrification permet de diminuer cet effet, mais il reste une légère différence dans l'intensité des efforts enregistrés entre les deux vitesses de coupe utilisées en raison de la différence dans la quantité de chaleur engendrée.

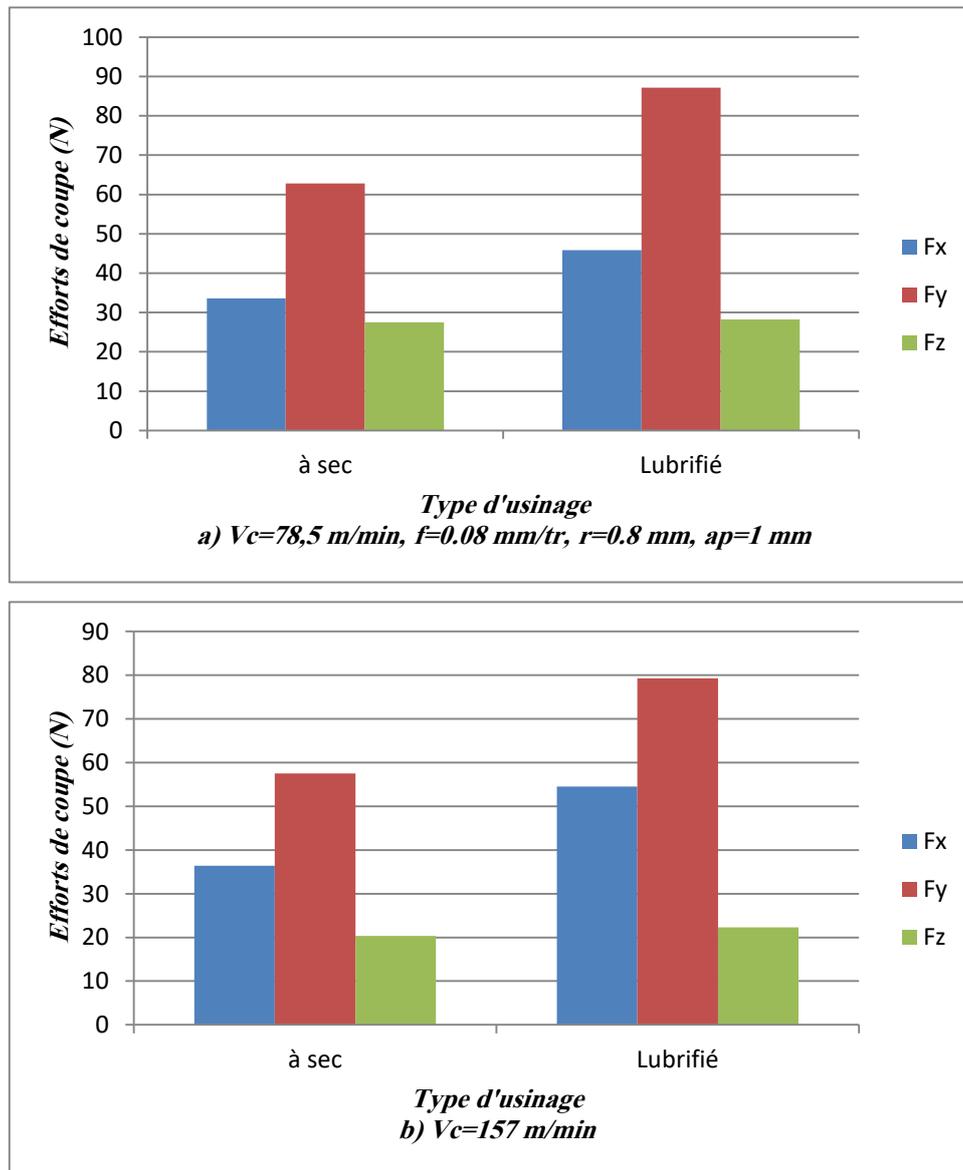


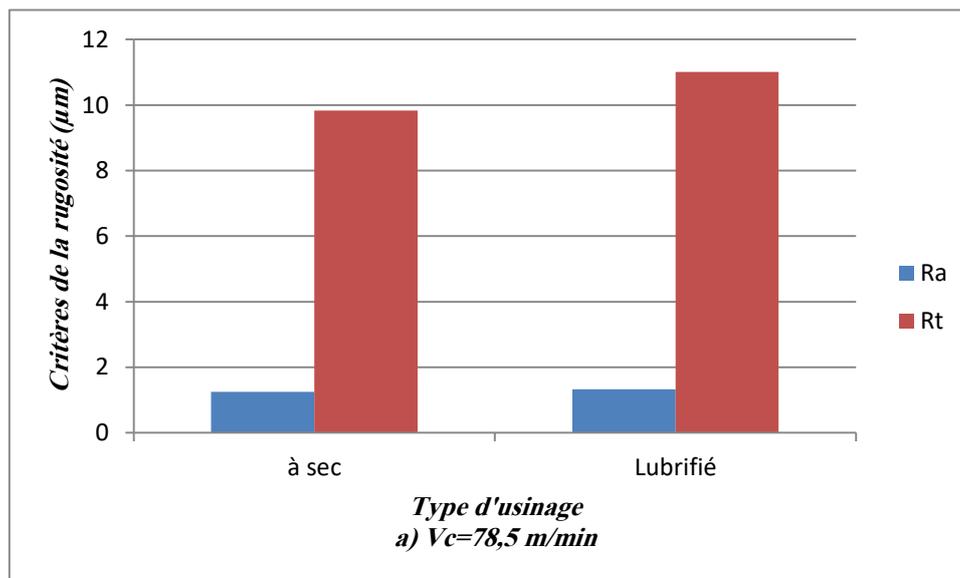
Fig. III.13. Évolution des efforts de coupe en fonction de la lubrification-vitesse de coupe

III.5.4. Influence de la lubrification sur l'évolution de la rugosité de surface avec des vitesses de coupe différentes

Les résultats expérimentaux qui concernent l'effet de la lubrification sur les critères de la rugosité de surface étudiés pour des vitesses de coupe différentes ont été présentés dans la figure III.14 (a et b). Les résultats obtenus indiquent que l'utilisation d'un fluide lubrifiant permet d'améliorer la rugosité de surface (R_a et R_t) pour une vitesse de coupe maximum ($V_c=157$ m/min). Par contre, l'impact de la lubrification pour une vitesse de coupe minimum

($V_c=78$ m/min) contribue dans la dégradation de la rugosité de surface avec un taux d'élévation égal à 6 % pour la rugosité (R_a) et 10.71 % pour (R_t).

Avec une (V_c) minimale, l'effet de frottement et de l'usure sur la qualité de surface usinée est réduit par rapport à l'impact de la température de coupe sur la résistance du matériau usiné (matrice thermoplastique). Ce qui conduit à des efforts de coupe minimum et par conséquent à une bonne qualité de surface. Par contre, lors de l'usinage avec lubrification, l'effet de la chaleur résultante diminue, ce qui conduit finalement à l'élévation des efforts de coupe et la rugosité de surface. D'autre part, pour une vitesse de coupe maximum, le frottement, la température et l'échauffement de la partie active de l'outil, les vibrations et le mécanisme d'usure des outils aussi augmentent, ce qui contribue dans la détérioration de la rugosité de surface. Par contre, l'utilisation d'un liquide lubrifiant permet de refroidir la partie active de l'outil et des copeaux, et de réduire le coefficient de frottement sur les surfaces fonctionnelles de l'outil et de la pièce, ce qui permet d'améliorer la rugosité de surface usinée. Ces résultats confirment l'importance de l'utilisation d'un fluide lubrifiant avec des vitesses de coupe élevées par rapport à une vitesse de coupe minimale.



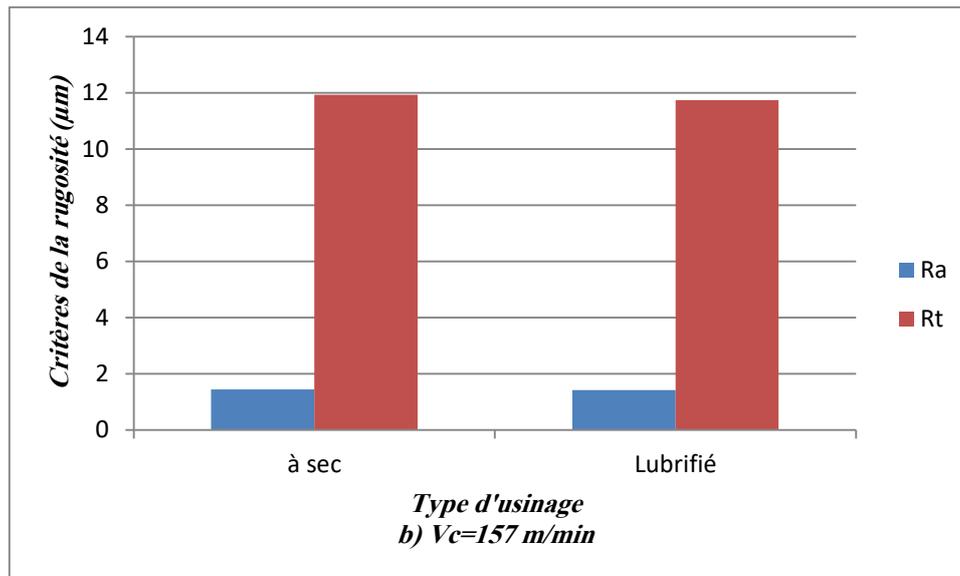


Fig. III.14. Évolution de la rugosité de surface en fonction de la lubrification-vitesse de coupe

III.6. Conclusion

A partir de l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux qui concernent l'étude de l'influence de différentes conditions de coupe telles que la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe, le rayon de bec et la lubrification sur l'évolution de la qualité de surface usinée et les composantes de l'effort de coupe pendant l'usinage du polyamide renforcé en fibres de verre PA66 GF30 à l'aide des outils de coupe en carbure revêtu, on peut tirer les conclusions suivantes :

La comparaison entre les résultats obtenus indique que l'avance par tour (0.08-0.2 mm/tr) est le facteur le plus significatif qui possède une influence sur l'évolution de différents critères de la rugosité de surface avec un taux d'augmentation de 29.04 %, 28.46 % et 26.1 % pour (Ra, Rq et Rz) respectivement. D'une part, la diminution de la rugosité de surface en fonction de la variation du rayon de bec entre 0.4 et 0.8 mm est plus importante avec des vitesses de coupe faibles et des petites avances ($V_c=78$ m/min, $f=0.08$ mm/tr). D'autre part, l'effet de la profondeur de passe sur la rugosité de surface a été trouvé insignifiant. Par contre, l'utilisation d'un liquide lubrifiant simultanément avec des avances élevées contribue à l'amélioration de la qualité de surface usinée.

Concernant les résultats liés à l'évolution des efforts de coupe, on peut conclure que le facteur le plus important qui influe sur les trois composantes de l'effort de coupe est la profondeur de passe avec une croissance de 73.16 %, 65.03% et 51.66 % pour l'effort axial, radial et tangentiel successivement suivi par l'avance par tour. D'une part, l'impact du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe est plus significatif avec des vitesses de coupe faibles et des avances élevées ($f=0.16$ mm/tr). D'autre part, on peut conclure que l'effet de la vitesse de coupe est négligeable dans les limites des facteurs étudiés. Par ailleurs, l'utilisation de la

lubrification pendant l'usinage simultanément avec des avances élevées pendant l'usinage permet de réduire les trois composantes de l'effort de coupe.

Chapitre IV

*Modélisation du processus
d'usinage du PA66-GF30 en
utilisant les méthodes ANN et
RSM*

IV.1. Introduction

Une bonne sélection des paramètres d'usinage joue un rôle très important et décisif pour assurer une bonne qualité des pièces usinées pour une fonction donnée, avec une quantité maximale de la matière éliminée en respectant un temps et le prix réduit. Pour cet objectif, la modélisation de l'opération d'usinage est une étape principale et nécessaire pour effectuer les différentes tâches d'optimisation et la réalisation d'une prédiction précise et bien contrôlée ou adoptée des résultats d'usinage. La modélisation de l'usinage des composites propose nombreux défis contrairement à la notion classique qui concerne l'usinage des métaux, ces difficultés sont liées principalement à la grande diversité des matériaux, l'identification des variables (matrices, fibres, l'interaction fibre-matrice, frottements,..), l'hétérogénéité de ces matériaux et le comportement résultant de cette nature qui peuvent être comme des obstacles à la modélisation et la généralisation des phénomènes de coupe. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte les différents facteurs qui participent dans la décision des conséquences et des propriétés de l'usinage lors de la modélisation du processus pour atteindre une prévision satisfaisante et fiable. Les différentes études effectuées dans ce cadre se focalisent globalement sur la modélisation empirique, analytique et numérique au niveau de l'échelle macroscopique, mésoscopique et microscopique et souvent se concentrent sur l'étude de l'impact de différentes conditions de coupe sur la qualité de surface usinée, les efforts de coupe et la compréhension de différents mécanismes qui entraînent les endommagements des composites tels que le délaminage.

Dans ce cadre, ce chapitre présente principalement la modélisation de différents paramètres technologiques tels que l'effort de coupe principal (F_z), la rugosité de surface (R_a), la puissance de coupe (p) et le débit de copeaux enlevés (MRR) pendant le tournage du polyamide (PA66-GF30) en fonction des facteurs réglables (r , a_p , V_c et f). Premièrement, ce travail sera focalisé sur la modélisation de la rugosité (R_a) et l'effort tangentiel (F_z) en utilisant l'approche du réseau de neurone artificiel (ANN). Dans la deuxième section de ce chapitre, nous allons étudier l'application de la méthode (RSM) pour proposer des modèles mathématiques de prédiction qui décrivent le comportement du processus de coupe et les relations entre leurs constituants. Aussi, une analyse satisfaisante des résultats suivie par une discussion de l'évolution des phénomènes de coupe étudiés liés aux effets principaux et d'interaction a été effectuée dans cette phase. La troisième partie se focalise sur la vérification expérimentale des résultats obtenus, le taux des erreurs enregistrées et la validation des modèles développés. La dernière partie se concerne principalement à une comparaison entre la modélisation ANN et RSM en termes de la précision de prévision et d'efficacité. L'analyse des résultats expérimentaux dans les deux parties de la modélisation a été réalisée en utilisant des logiciels de traitement statistique et de simulation tels que (JMP 10, Design Expert 10 et Minitab 16) respectivement.

IV.2. Généralités sur les ANN

IV.2.1. Définition

Les dernières années ont vu naître de nombreuses applications basées sur la technologie des réseaux de neurones artificiels. Ces applications se concernent principalement à la modélisation des tâches répétitives, la reconnaissance des caractères et de formes, l'analyse, la classification et la prévision des données et couvrent nombreux domaines tels que les études statistiques, robotique, finance, télécommunication, usinage,...etc. L'origine de la technologie des réseaux de neurones est le désir de développer un système industriel capable d'effectuer et de réaliser des tâches intelligentes semblables à celles du cerveau humain et qui acquiert la connaissance par l'apprentissage, la connaissance résultante est stockée dans des forces de connexion inter-neurales appelées poids synaptiques.

Un réseau de neurones est un outil puissant de modélisation capable de capter et de traiter des rapports complexes, entre les entrées et les sorties d'un système. Le principe d'un réseau de neurones artificiels est de faire l'association entre un ensemble des entrées et un ensemble correspondant de sorties désirées en utilisant la série des données pour créer une nouvelle sortie utile lorsqu'elle est inconnue.

Malgré la grande efficacité de cette technique dans le cadre de la représentation et de la modélisation de différents systèmes linéaires et non linéaires, simples ou complexes, l'approche ANN reste limitée et insuffisante pour donner des explications concernées aux résultats obtenus [54]. D'une façon générale, un réseau de neurones s'articule sur les étapes fondamentales suivantes :

1. Le choix de la structure d'un réseau de neurones. (En général, cette opération est empirique).
2. La création d'une base de données pour mieux connaissance et représentation au domaine que l'on veut modéliser. Cette constitution se compose principalement en deux parties, la première partie est liée à la base d'apprentissage et l'autre partie qui concerne aux tests de cet apprentissage qui appelée la base de test.
3. Le choix des paramètres du processus d'apprentissage. Lors de l'apprentissage, les données qui concernent la base d'apprentissage sont abordées séquentiellement et plusieurs fois au réseau. L'algorithme d'apprentissage (rétro propagation du gradient) permet d'ajuster les poids synaptiques et des biais du perceptron multicouche jusqu'à l'obtention à un minimum d'erreurs.
4. La phase de reconnaissance qui se focalise sur la présentation du réseau est liée aux données de la base de test. La réponse calculée du réseau à la fin de test a été comparée avec la sortie attendue pour vérifier la précision de la prévision. Lorsque la prévision est acceptable, les résultats ont été exploités directement pour l'objectif que l'on veut réaliser de ce test.

Avant de représenter les résultats qui dépendent de la modélisation des paramètres technologiques en fonction de différentes conditions opératoires pendant l'usinage du polyamide (PA66-GF30), on présente quelques notions principales qui concernent l'approche des réseaux de neurones artificiels.

IV.2.2. Données de base d'ANN [55]

IV.2.2.1. Principes de fonctionnement d'un réseau et type des données

1. Les valeurs des variables qui concernent les données d'entrée ainsi que les sorties doivent être dans l'intervalle de $[0,1]$.
2. Généralement, un réseau se compose en trois couches (la couche d'entrée, la couche cachée et la couche de sortie).
3. Chaque couche se compose en un nombre des neurones qui appelées (nœuds).
4. La couche cachée peut consister à un nombre n des couches.
5. Chaque nœud (neurone) de la couche cachée et de sortie a un poids.
6. Chaque liaison inter neuronaux entre les nœuds possède un poids.
7. Les valeurs des poids qui sont reliées aux nœuds de la couche cachée et de sortie ou les liaisons inter neuronaux sont comprises entre 0 et 1.
8. D'une couche à l'autre, tous les nœuds de la première couche sont reliés avec tous les nœuds de la dernière couche.
9. Le nombre des neurones de la couche d'entrée et de sortie est correspondant au nombre des variables d'entrée et de sortie.
10. Le nombre de couches cachées et des nœuds de chaque couche est paramétrable par l'utilisateur.

IV.2.2.2. Paramétrage de la couche cachée

On peut choisir le nombre de couches cachées et les nœuds de chaque couche. Mais avant de faire la sélection, il faut prendre en considération les points suivants :

1. L'augmentation dans le nombre de nœuds de la couche cachée rend le réseau apte à identifier les différents systèmes et phénomènes complexes.
2. Contrairement au premier cas, la sélection d'un grand nombre de nœuds des couches cachées peut conduire à un sur apprentissage dans l'échantillon d'apprentissage. Donc, il est probable de créer une perturbation (nuisible) dans les échantillons de test.

IV.2.2.3. Valeurs des nœuds et des liaisons

Pratiquement, les poids des liaisons inter neuronaux et les nœuds de la couche cachée et de sortie sont sélectionnés aléatoirement pendant l'étape de l'initialisation, l'ajustement de ces poids représente le principe du processus d'apprentissage par des réseaux de neurones.

Pour chaque individu, les neurones de la couche d'entrée prennent automatiquement la valeur des variables d'entrée du modèle.

Les neurones de la couche cachée et de sortie prennent la valeur qui représente une fonction combinatoire de la somme des combinaisons linéaires de neurones d'entrée et des poids concernés.

Pour un nœud J, on donne :

$$\text{Net } J = \sum_{i=1}^N W_{ij} \cdot X_i \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

Net : la valeur de neurones (J=1, 2,..., n).

W_{ij} : les poids des liaisons entre les neurones de la couche d'entrée (i) et les nœuds de la couche cachée (j).

X_i : la valeur de nœud (i).

N : le nombre des nœuds de la couche d'entrée.

IV.2.3. Architecture des réseaux

L'architecture d'un réseau de neurones est l'organisation des neurones entre eux au sein du même réseau [56]. Il dépend principalement de la tâche à réaliser ou à apprendre. En général, les connexions entre les neurones peuvent être quelconques mais il est possible de distinguer une certaine régularité. Cette régularité s'articule sur plusieurs critères focalise autour le type de connexions inter neuronales (complètement connectées ou connectées en couches), type des réseaux (dynamiques ou statiques) et le nombre de couches (simples ou complexes). Dans ce cadre, on présente quelques architectures les plus souvent qui concernent la structure d'un réseau de neurones [57,58] :

1. Réseaux multicouches : Ce type d'architecture se caractérise principalement par l'absence de connexions entre les neurones d'une même couche, les connexions sont seulement entre les neurones d'une couche avec les autres neurones d'une couche avale. Généralement, chaque neurone d'une couche est lié à tous les neurones de la couche suivante et dans une seule direction. Ce qui permet d'introduire la notion de l'activation de l'information dans un réseau et les concepts qui s'attachent aux neurones d'entrée et de sortie.

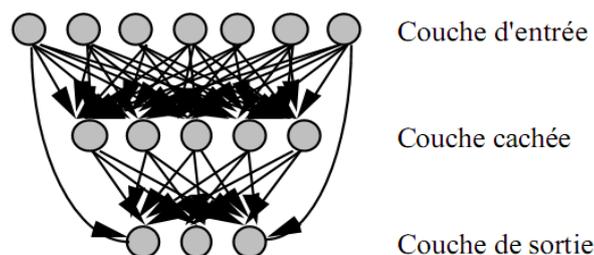


Fig. IV.1. Nature de l'architecture et des connexions dans un réseau multicouche.

2. Réseau à connexions locales : Est un réseau multicouche, il se caractérise par un nombre réduit des liaisons inter neuronaux contrairement aux réseaux classiques à une structure multicouche. Chaque neurone d'une couche possède des connexions réduites et localisées avec des neurones de la couche avale selon la figure suivante.

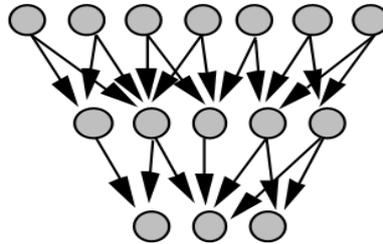


Fig. IV.2. Réseau à connexions locales.

3. Réseau à connexions récurrents : Ce type des réseaux se caractérise par des connexions récurrentes et souvent locales qui permettent de ramener l'information en arrière à l'inverse de la direction de propagation définie dans un réseau multicouche.

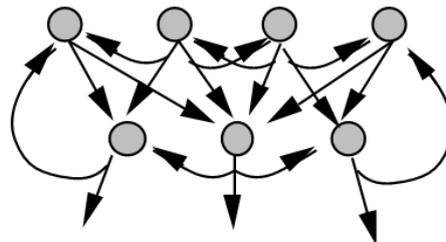


Fig. IV.3. Réseau à connexions récurrents.

4. Réseau à connexions complètes : Il représente la structure d'interconnexion la plus générale. Dans ce cas d'architecture, chaque neurone est relié à tous les neurones du réseau dans les deux sens.

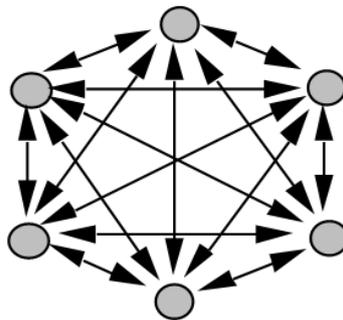


Fig. IV.4. Réseau à connexions complètes.

Pratiquement, il existe d'autres structures, la figure IV.5 résume les principaux types qui concernent l'architecture d'un réseau de neurones.

L'apprentissage au sein d'un réseau dépend principalement à l'architecture du réseau et de l'environnement du problème. Par exemple, la règle de Hebb et Widrow qui concerne l'ajustement des poids, elle est valable pour certaines architectures (Perceptron simple), mais n'est pas compatible avec toutes les structures d'un réseau (Perceptron multicouches). Parmi

les architectures, on s'intéresse dans ce cadre aux perceptrons multicouches (Fig. IV.6). Ces dernières sont organisées généralement en trois couches. Chaque couche (i) est constituée d'un nombre (N_i) de neurones et souvent ce type d'architecture est bien ordonné et entièrement connecté. Il se caractérise par la flexibilité élevée par rapport aux perceptrons simples et permet de résoudre les différents problèmes complexes même ne sont pas linéairement séparables. L'approche la plus compatible pour le processus d'apprentissage de ces structures est l'utilisation de l'algorithme de rétro propagation du gradient.

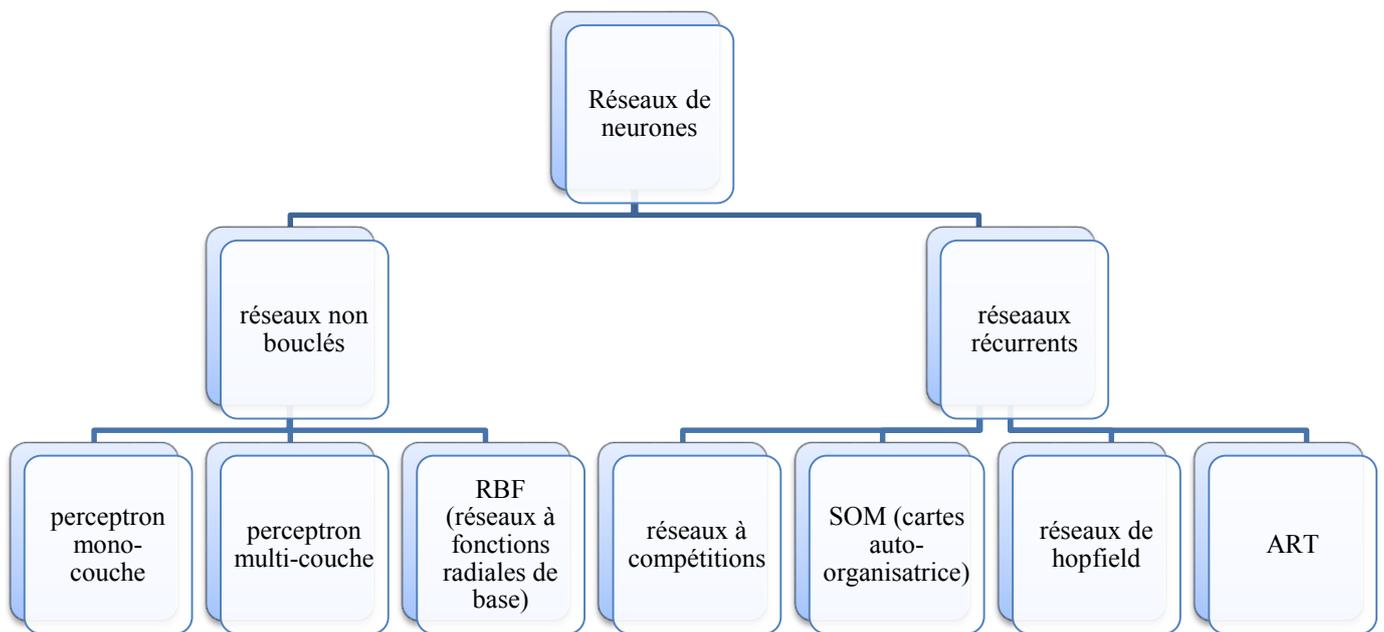


Fig. IV.5. Principaux types d'architecture d'un réseau de neurones [59].

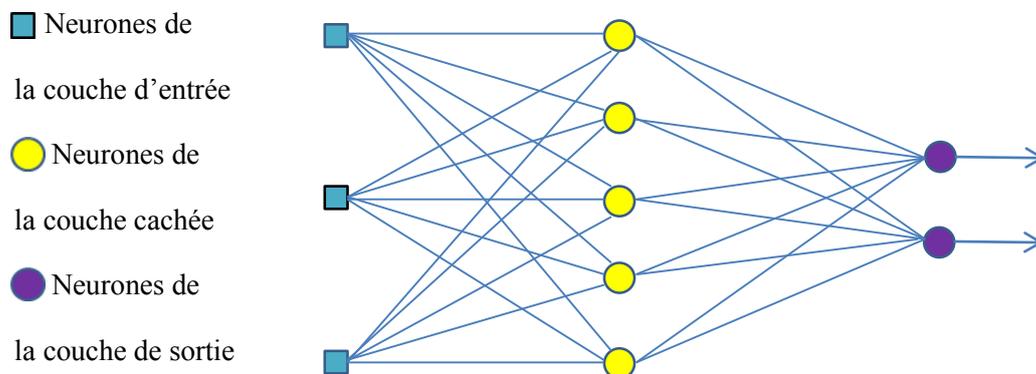


Fig. IV.6. Exemple d'un réseau de neurones multicouche (Perceptron multicouche).

IV.2.4. Fonctions de transfert

La somme pondérée qui concerne le calcul des combinaisons linéaires des unités cachées du réseau reste sans activation, l'utilisation d'une fonction de transfert permet d'effectuer la transformation non linéaire de chaque somme pondérée des unités de la couche cachée afin de connaître l'état de neurone et de décider finalement l'activation de cette valeur qui sera transmise à un neurone aval lorsqu'elle passe un certain seuil. Généralement, il existe nombreux types des fonctions de transfert (Tableau IV.1) et sont souvent normalisées pour simplifier l'application de différentes techniques d'apprentissage. Cette normalisation peut s'effectuer de deux façons selon l'intervalle de fréquences, la première permet d'obtenir à des valeurs entre 0 et 1 et la seconde permet d'atteindre à des valeurs de sortie entre -1 et 1 [60].

Tableau IV.1. Définition de différentes fonctions de transfert [59].

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

La définition de la fonction de transfert non linéaire peut prendre plusieurs formes. Dans ce cadre, l'utilisation d'une fonction binaire représente la solution la plus simple. La fonction prend la valeur 0 sous certains seuils ϑ_i et 1 dans l'autre intervalle selon la figure suivante :

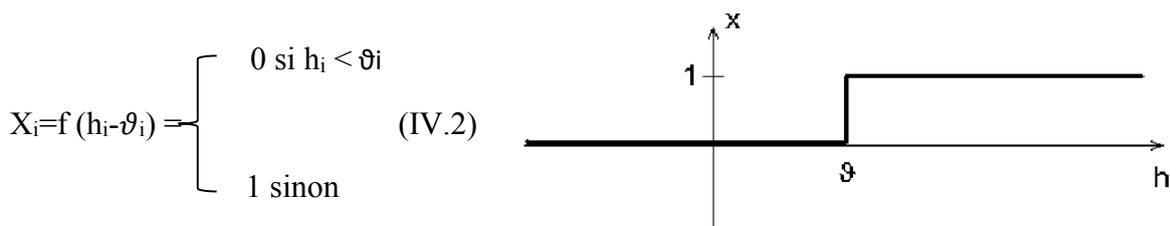


Fig. IV.7. Exemple sur une fonction binaire [60].

Parmi les fonctions de transfert les plus utilisées et qui répondent à nombreux critères qui se concernent au traitement des exemples qui se trouvent très près à l'hyperplan séparateur et la nature des corrections concernées de ce dernier, on trouve la tangente hyperbolique (Fig. IV.8) qui se caractérise par sa dérivée maximale pour un argument nul et tend à zéro pour un argument maximum en valeur absolue. D'autre part, sa dérivée est facile à calculer, ce qui possède une importance pendant le fonctionnement des algorithmes d'apprentissage sur des ordinateurs [61].

$$\text{On donne : } f(v) = \text{Tangh}(\alpha v) \quad (\text{IV.3})$$

$$\hat{f}(v) = \alpha (1-f^2) \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$\hat{f}(v)$: est la dérivée de la fonction tangente hyperbolique.

Où, α mesure la dérivée de la fonction à l'origine.

Pour ce cas, la sortie de neurone varie continument dans l'intervalle de $[-1,1]$.

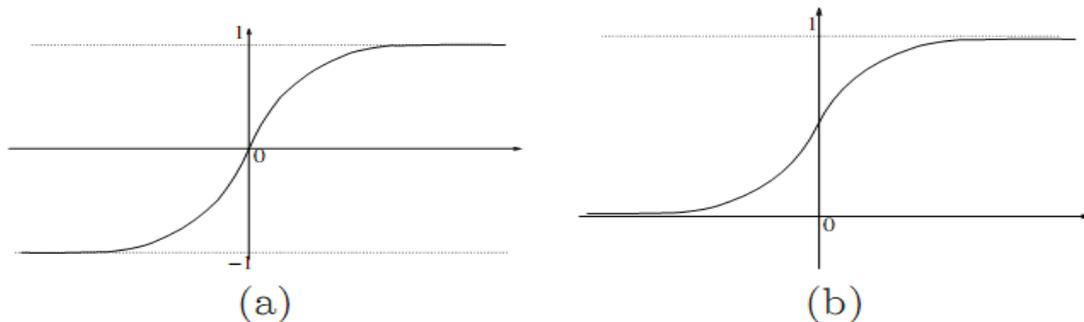


Fig. IV.8. Fonctions de transfert hyperboliques : (a) standard, (b) normalisée entre 0 et 1 [60].

On remarque que la plupart des modèles actuels sont basés sur un temps discret et synchrone pour représenter le comportement d'un réseau de neurones artificiels. Ce qui permet de démontrer l'absence de la notion du temps dans ces derniers. Donc, le modèle fréquentiel reste la base des réseaux de neurones artificiels.

Les neurones biologiques utilisent des fonctions à l'état binaire. Par contre, la plupart des fonctions sont continuées et acceptent une infinité des valeurs possibles dans l'intervalle de $[0,1]$ et $[-1, +1]$.

IV.2.5. Calcul des valeurs prédites

Le calcul des valeurs prédites représente une étape fondamentale lors du processus d'apprentissage afin de comparer et de connaître la précision des valeurs obtenues par rapport aux valeurs désirées. Le processus de calcul s'articule principalement sur trois étapes selon l'ordre suivant [62] :

1. Le calcul de la somme des combinaisons linéaires de chaque unité cachée (la somme pondérée) selon la formule suivante :

$$V_j = \alpha_{j,0} + \sum_{i=1}^n W_{i,j} \cdot X_i \quad (IV.5)$$

Avec :

$W_{i,j}$: Les poids des liaisons entre les neurones d'entrée (i) et les neurones de la couche cachée (j).

X_i : est la valeur des variables d'entrée i.

V_j : La somme pondérée de chaque neurone de la couche cachée en fonction de poids des liaisons et des neurones d'entrée

$\alpha_{j,0}$ et $W_{i,j}$: représentent les coefficients de la $j^{ième}$ combinaison linéaire.

2. Pour chaque unité de la couche cachée, on applique une transformation non linéaire des combinaisons calculées en utilisant une fonction de transfert telle la tangente hyperbolique selon la formule suivante :

$$H_j = \text{Tangh}(v_j) \quad (IV.6)$$

$$\text{Tangh}(v_j) = \frac{e^{v_j} - e^{-v_j}}{e^{v_j} + e^{-v_j}} \quad (IV.7)$$

Avec :

H_j : représente la $j^{ième}$ unité cachée.

3. La troisième étape se concerne à la combinaison linéaire de chaque transformation des unités cachées comme suit :

À partir des équations IV.5 et IV.6, la valeur prédite de la sortie est donnée comme suivante :

$$P_j = \beta_0 + \sum_{j=1}^{nh} \beta_j \cdot h_j \quad (IV.8)$$

$$P_j = \beta_0 + \sum_{j=1}^{nh} \beta_j \cdot \tanh(\alpha_{j,0} + \sum_{i=1}^n W_{i,j} \cdot X_i) \quad (IV.9)$$

Avec:

β_0, β_j : sont des coefficients de la combinaison linéaire.

P_j : est la valeur prédite de neurones de sortie par des réseaux de neurones.

nh : représente le nombre de neurones de la couche cachée. La figure IV.9 résume les différentes étapes qui concernent le calcul de la valeur prédite dans un réseau multicouche (perceptron multicouche).

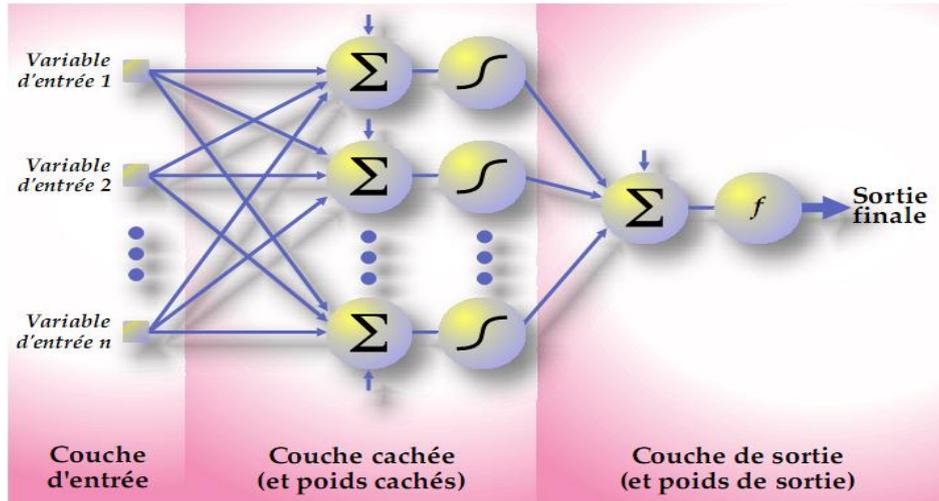


Fig. IV.9. Étapes principales pour calculer la valeur prédite dans un réseau multicouche.

IV.2.6. L'apprentissage

L'apprentissage est une étape de développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention sur le comportement désiré. Le principe du processus d'apprentissage est de faire des calculs mathématiques et algorithmiques qui permettent de mettre à jour des poids synaptiques à partir d'une ou plusieurs mesures jusqu'à l'obtention à la sortie du processus que l'on veut modéliser ou la valeur de la fonction que l'on veut estimer. Il existe plusieurs techniques d'apprentissage selon nombreux critères, mais globalement, on distingue trois types fondamentaux du processus d'apprentissage, l'apprentissage supervisé, non supervisé et l'apprentissage avec renforcement ou par assignation du crédit. Cette diversification repose principalement sur la forme des exemples d'apprentissage traités. Dans le cas des exemples d'apprentissage supervisé, les données d'entrée et de sortie sont couples (entrées, sorties associées) où les coefficients synaptiques sont évalués en minimisant l'erreur entre la sortie souhaitée et la sortie mesurée sur un échantillon. Contrairement à l'apprentissage supervisé, la détermination des coefficients synaptiques durant l'apprentissage non supervisé ne repose pas sur un échantillon d'apprentissage, mais elle se concerne à des critères de conformité (critère général) [58, 61, 63]. Dans cette étude, on s'intéresse à l'apprentissage supervisé d'un réseau non bouclé (perceptron multicouches).

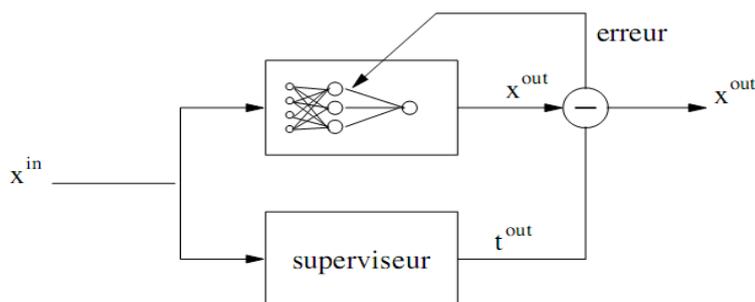


Fig. IV.10. Exemple sur le processus d'apprentissage supervisé [60].

IV.2.6.1. Algorithmes d'apprentissage

L'algorithme le plus utilisé actuellement et qui possède une grande capacité afin de modéliser et de traiter les différentes fonctions non linéaires est la rétro propagation du gradient. Il permet de décomposer les problèmes non linéaires pour un réseau à une suite des problèmes linéairement séparables (positive ou négative) pour simplifier les différentes étapes de la solution. Il est destiné principalement au processus d'apprentissage dans les réseaux multicouches. Le principe de fonctionnement est de rétro propager l'erreur dans la couche de sortie vers les couches cachées provoquant la mise à jour des poids synaptiques afin d'atteindre la convergence désirée.

En raison de la nature non linéaire de la plupart des fonctions d'activation (Tangente hyperbolique, sigmoïde), il n'existe pas une résolution analytique pour la minimisation de la somme d'erreur carrée (SEC). Plusieurs méthodes mathématiques et algorithmiques font pour cet objectif. Ces méthodes sont basées sur les axes suivants :

IV.2.6.1.1. Décroissance du gradient de la (SEC)

Afin de minimiser la fonction d'erreur (SEC), on utilise généralement la méthode de descente de gradient pour l'ajustement des pondérations afin d'atteindre au minimum d'erreurs (erreur optimisée). L'ajustement des pondérations focalise sur l'accroissant des poids synaptiques jusqu'à l'état stable.

On a:

$$X_{n+1} = X_n - \varepsilon f'(X_n) = X_n + \Delta X_n \quad (IV.10)$$

Avec, ε : représente le taux d'apprentissage, est une valeur bien choisi.

f : représente la fonction d'erreur $E(w)$. Cette suite devrait s'approcher du minimum.

X_n : est une suite donnée.

Donc, on calcule la dérivée partielle de la fonction d'erreur par apport à W_i

$$\frac{\partial E(w)}{\partial w_i} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial w_i} \sum_s (c - o)^2 = \frac{1}{2} \sum_s \frac{\partial}{\partial w_i} (c - o)^2 \quad (IV.11)$$

$$\frac{\partial E(w)}{\partial w_i} = \frac{1}{2} \sum_s 2(c - o) \frac{\partial}{\partial w_i} (c - o) = \sum_s (c - o) \frac{\partial}{\partial w_i} (c - \sigma(x.w))$$

$$\frac{\partial}{\partial w_i} (c - \sigma(x.w)) = \frac{\partial}{\partial w_i} (c - \sigma(y)) \cdot \frac{\partial y}{\partial w_i} = -\sigma'(y) \cdot x_i$$

$$\frac{\partial E(w)}{\partial w_i} = \sum_s (c - o) (-x_i) \sigma'(x.w) \quad (IV.12)$$

$$\Delta w_i = -\varepsilon \frac{\partial E(w)}{\partial w_i} = \varepsilon \sum_s (c - o) \sigma'(x.w) x_i \quad (IV.13)$$

W: est la valeur des coefficients synaptiques.

X : est le vecteur des entrées (i).

$\sigma(x, w)$: est la fonction de transfert.

$E(w)$: représente la fonction d'erreur en fonction des poids synaptiques.

S : est la base d'apprentissage.

O : est la sortie, avec :

$$O = (x, y) = \sum x_i w_i = (x_1 w_1 + x_2 w_2 + x_3 w_3 + \dots + x_n w_n) \quad (IV.14)$$

IV.2.6.1.2. Taux d'apprentissage

La sélection d'un temps d'apprentissage trop grand peut conduire à un risque d'oscillation autour du minimum (la solution optimale). Par contre, un taux d'apprentissage plus faible peut entraîner à un nombre d'itérations élevé et en conséquence à un temps supplémentaire et n'est pas nécessaire pour le test d'apprentissage. Pratiquement, on prend des valeurs compatibles avec l'évolution du processus d'apprentissage. Au début d'apprentissage, on peut prendre un taux d'apprentissage élevé pour s'approcher vers la solution de manière accélérée, et contrairement au début d'apprentissage, on peut prendre un taux d'apprentissage faible graduellement à la fin du processus pour ne dépasser la solution optimale.

IV.2.6.1.3. Terme de (momentum)

L'algorithme d'apprentissage à base de descente du gradient n'est presque jamais utilisé de sa forme originale. Pratiquement, il existe de nombreuses des méthodes appliquées pour l'objectif d'atteindre à la solution optimale. Parmi ces techniques l'addition du terme de moment, l'intérêt de cette règle est de prendre en compte les changements antérieurs qui concernent l'ajustement des poids à chaque itération afin d'éviter les oscillations perpétuelles lorsque le minimum approche et aussi d'augmenter la vitesse de convergence vers la solution. La formule suivante résume l'effet du terme de momentum pendant le processus d'apprentissage et l'ajustement des poids. Donc, l'équation (IV.13) devient comme suivante :

$$\Delta w_{ij}(t) = -\varepsilon \frac{\partial E(w)}{\partial w_i} + \alpha \Delta w_{ij}(t-1) = \varepsilon \sum_s (c - o) \sigma'(x, w) x_i + \alpha \Delta w_{ij}(t-1) \quad (IV.15)$$

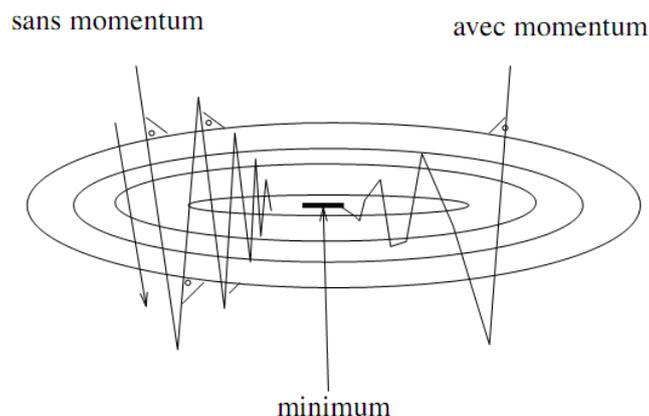


Fig. IV.11. Effet du terme de momentum sur une descente de gradient. Les ellipses représentent les espaces d'erreur [60].

IV.3. Modélisation de la rugosité (Ra) et l'effort principal (Fz) par ANN

IV.3.1. Modélisation de la rugosité (Ra)

IV.3.1.1. Résultats obtenus et discussions

Le tableau IV.2 présente les différents résultats qui concernent le test d'apprentissage et de validation par ANN pour l'objectif de modéliser la rugosité de surface (Ra). Cette dernière qui correspond au neurone de la couche de sortie en fonction de (Vc), (f), (r) et (ap) qui représentent les nœuds de la couche d'entrée. Pour cela, sur les 18 essais réalisés, quatorze essais ont été destinés pour le test d'apprentissage et quatre essais ont été réservés pour le test de validation. Dans ce cadre, l'algorithme de rétro propagation du gradient a été utilisé afin d'atteindre un minimum d'erreur (racine de l'erreur quadratique moyenne) et un (R carré) élevé, c'est-à-dire près de l'unité. Les résultats obtenus indiquent que l'architecture appropriée pour représenter le modèle et qui dépend à un minimum d'erreurs quadratiques dans les deux cas d'apprentissage et de validation (RMSE= 0,0028911 pour l'apprentissage et RMSE= 0,0005761 pour la validation) est (4-3-1). D'après la figure IV.12 qui présente la structure ANN concernée, on remarque que cette architecture se caractérise par une structure bien organisée et entièrement connectée. On note aussi que le nombre des neurones faible (égal à trois) est suffisant pour la couche cachée, ce qui signifie que le modèle est moins complexe et le réseau a alors une facilité pour l'identifier. D'autre part, les différents résultats trouvés indiquent que les valeurs extraites de l'erreur quadratique moyenne sont plus faibles ou l'écart de l'erreur est quasi nul (10^{-3}) soit pour le cas d'apprentissage ou de validation. Ce résultat indique que l'apprentissage a été excellent et l'exemple traité converge vers la solution optimale (modèle précis).

Tableau IV.2. Principaux résultats du test d'apprentissage et de validation pour (Ra).

	Apprentissage	Validation
Mesures	Valeurs	Valeurs
R carré	0.999965	0.9999987
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.0028911	0.0005761
écart absolu moyen	0.0012616	0.0005681
-Log-vraisemblance	-61.98028	-24.1609
Somme des carrés des écarts (SSE)	0.000117	1.3277 e ⁻⁶
Nombre de tests	14	4

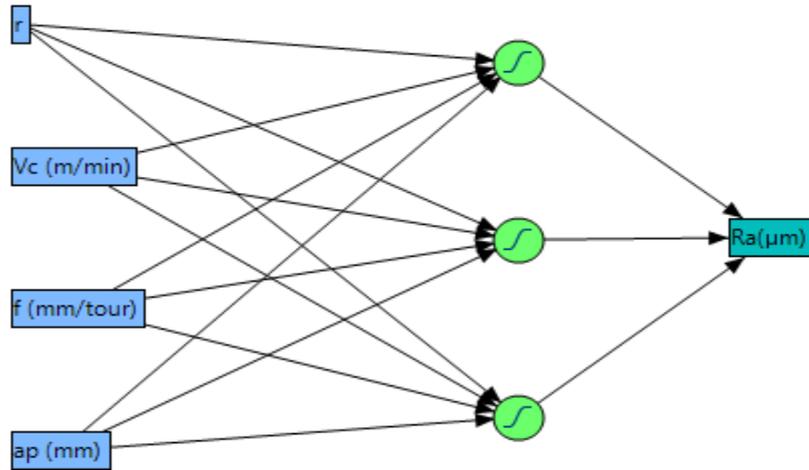


Fig. IV.12. Structure ANN (4-3-1) pour la rugosité (Ra).

La relation (entrées, sorties) entre la rugosité de surface et les différentes conditions de coupe (V_c , f , ap et r) a été représentée dans un modèle mathématique développé à partir du calcul de la somme des sorties de trois unités de la couche cachée multipliée par une fonction de transfert (équations IV.5, IV.6 et IV.9) qui nous donne finalement le modèle à base des réseaux de neurones artificiels ANN (équation IV.19). Ce modèle décrit la relation précédente et le comportement du processus de coupe lors de l'évolution de différentes conditions et valeurs liées au tournage du polyamide composite (PA66-GF30) à l'aide d'un outil de carbure revêtu. Les équations suivantes présentent la première étape des calculs élémentaires qui s'attache à la sortie des trois neurones de la couche cachée. À partir des équations (IV.16 à IV.19), il est évident que le facteur le plus significatif qui affecte la rugosité de surface est l'avance (f) suivie par le rayon de bec (r). Par contre, les effets de (ap et V_c) sont trop faibles (quasi nulle) comparativement aux autres facteurs.

$$\left\{ \begin{array}{l} H1 = \tanh (0.5 * (-5.081 * r + 0.0058 * V_c - 34.09 * f - 1.005 * ap + 7.179)); \quad (IV.16) \\ H2 = \tanh (0.5 * (4.316 * r - 0.025 * V_c - 33.437 * f - 1.283 * ap + 9.663)); \quad (IV.17) \\ H3 = \tanh (0.5 * (-4.217 * r + 0.019 * V_c + 18.312 * f + 0.088 * ap - 5.997)); \quad (IV.18) \end{array} \right.$$

Sur la base des équations (IV.16 à IV.18), on obtient le modèle général de la rugosité (Ra).

$$Ra = -1.131 * H1 + 0.608 * H2 + 0.928 * H3 + 2.652; \quad (IV.19)$$

Les résultats obtenus qui concernent le profileur de prévision de la rugosité (Ra) corrélée avec les facteurs (r , V_c , a_p et f) sont présentés dans la figure IV.13.

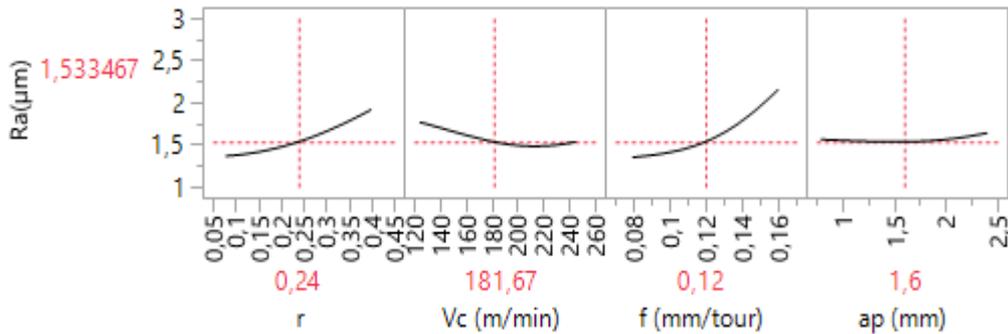


Fig. IV.13. Profileur de prévision de (Ra) en fonction des conditions de coupe.

La figure IV.14 présente la nature de la relation entre les valeurs observées et prévues de la rugosité de surface (Ra) dans les deux cas d'apprentissage et de validation. Les résultats montrent que tous les points liés aux valeurs estimées et observées sont situés presque sur une même ligne médiane ou plus précisément sont identiques dans les deux cas d'apprentissage et de validation. Cette observation indique que les modèles obtenus sont adéquats ou satisfaisants en termes de précision et les valeurs des coefficients de corrélation démontrent cette conclusion soit pour le test d'apprentissage ou de validation. Les valeurs obtenues des R^2 ont été enregistrées dans la limite de (0.99996 et 0.99999) pour l'apprentissage et la validation respectivement. Ce qui confirme l'adéquat de l'approche ANN dans la prévision et la modélisation de différents problèmes non linéaires en général et en cas particulier dans le processus d'usinage.

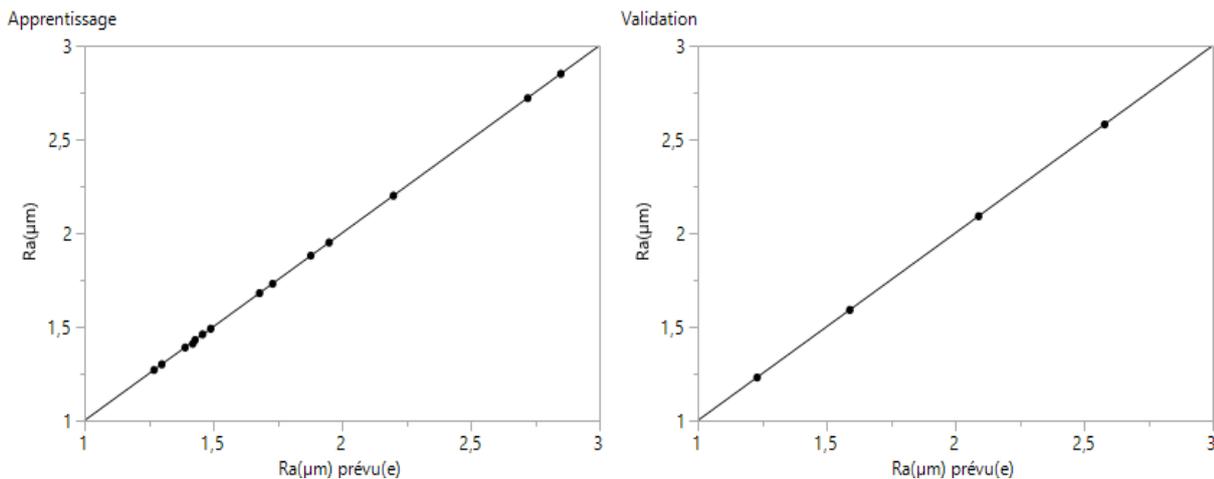


Fig. IV.14. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la rugosité de surface lors de l'apprentissage et la validation par ANN.

IV.3.2. Modélisation de l'effort de coupe principal (Fz)

IV.3.2.1. Résultats obtenus et discussions

Les différentes architectures du réseau ANN ont été testées pour obtenir la structure optimale qui définit le modèle neuronal de l'effort de coupe principal en fonction des conditions d'usinage étudiées. La sélection de l'architecture optimale est basée sur les valeurs de l'erreur (RMSE) et le coefficient (R^2). Les résultats enregistrés indiquent que les valeurs relatives à la structure sélectionnée du réseau ont été 3.125 et 0.711 pour (RMSE) et 0.963, 0.998 pour le coefficient de détermination dans les deux cas d'apprentissage et de validation respectivement. À partir de cette observation, on peut affirmer que l'erreur obtenue est faible, ce qui signifie que l'apprentissage du réseau a été dans un intervalle acceptable et le réseau s'approche vers la solution optimale. D'autres parts, les résultats qui concernent le coefficient de détermination ont été près de l'unité notamment lors du test de validation. Ce résultat démontre que le modèle neuronal développé explique bien les résultats expérimentaux et la relation (entrées-sorties) du processus d'usinage. Les différents résultats obtenus qui concernent le test d'apprentissage et de validation par ANN pour l'effort de coupe principal sont présentés au tableau IV.3. La figure IV.15 illustre l'architecture appropriée du réseau ANN qui correspond à une valeur optimale de l'erreur quadratique moyenne et du coefficient (R^2). La structure obtenue a été organisée selon l'ordre suivant (4-3-1), cette architecture se caractérise par la simplicité (le nombre des nœuds de la couche cachée égal à trois), ce qui signifie que l'identification du modèle est simple et la perturbation dans le réseau est faible.

Tableau IV.3. Principaux résultats liés au test d'apprentissage et de validation pour (Fz).

	Apprentissage	Validation
Mesures	Valeurs	Valeurs
R carré	0.9638382	0.9988411
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	3.1257309	0.7115395
écart absolu moyen	2.5279951	0.6603651
-Log-vraisemblance	35.820493	4.3144567
Somme des carrés des écarts (SSE)	136.78271	2.0251538
Nombre de tests	14	4

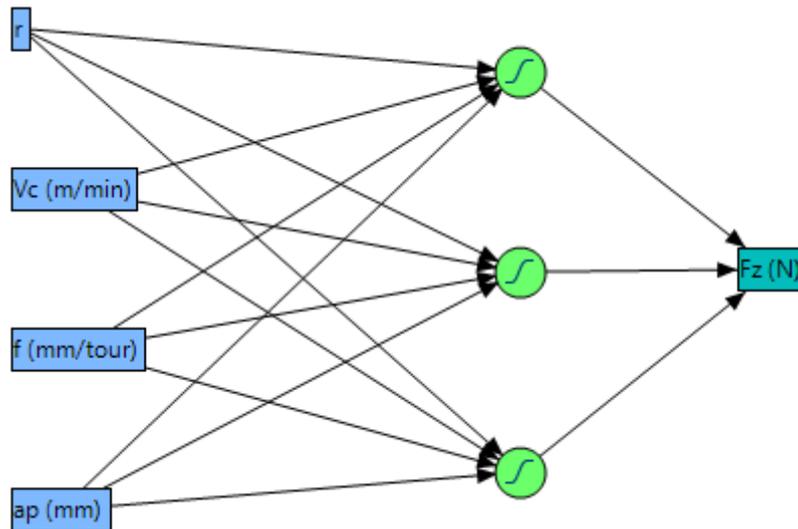


Fig. IV.15. Structure ANN (4-3-1) pour l'effort de coupe (F_z).

Les équations (IV.20 à IV.22) liées à la sortie des trois neurones de la couche cachée multipliés par une fonction de transfert hyperbolique. À partir de ces équations, on remarque que le facteur le plus significatif qui possède une influence sur l'évolution de (F_z) lors du tournage du PA66-GF30 est l'avance par tour suivie par la profondeur de passe. Par contre, l'effet du rayon de bec et la vitesse de coupe sur (F_z) a été négligeable par rapport aux autres facteurs. Cette observation confirme les résultats obtenus lors de l'utilisation de la méthode (RSM) avec une différence trop faible dans le degré de l'influence.

$$\left\{ \begin{array}{l} H1 = \tanh (0.5*(-18.77*r - 0.0004*Vc + 93.64*f + 4.51*ap - 14.18)); \quad (IV.20) \\ H2 = \tanh (0.5*(-10.22*r + 0.065*Vc + 119.62*f + 10.84*ap - 41.025)); \quad (IV.21) \\ H3 = \tanh (0.5*(3.72*r + 0.061*Vc - 108.005*f + 0.23*ap + 1.68)); \quad (IV.22) \end{array} \right.$$

À partir des équations précédentes, on peut extraire le modèle final de l'effort de coupe tangentiel en fonction de différentes conditions de coupe étudiées et qui présente la somme des sorties de chaque neurone de la couche cachée multipliée par une fonction linéaire selon la relation suivante :

$$F_z = -19.96*H1 + 27.14*H2 - 12.3*H3 + 36.32; \quad (IV.23)$$

La figure IV.16 présente le profileur de prévision de l'effort (F_z) en fonction de différentes conditions (r , V_c , f et ap).

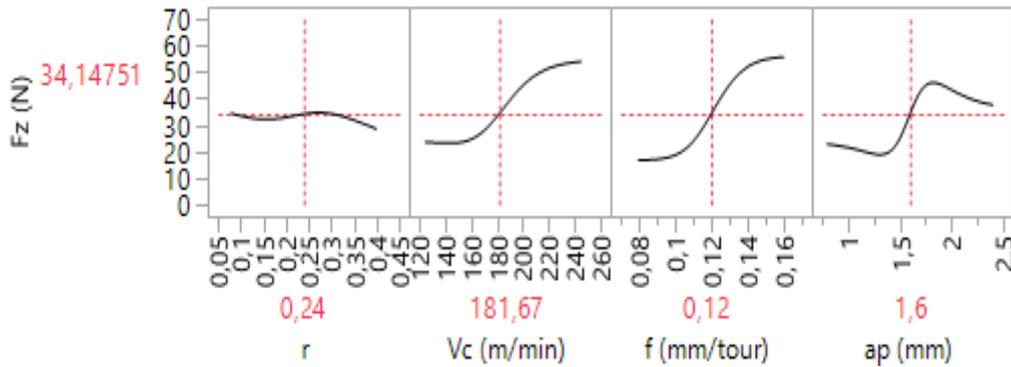


Fig. IV.16. Profileur de prévision de l'effort (F_z) / (r , V_c , f et ap).

La figure IV.17 présente la différence entre les valeurs expérimentales et estimées à l'aide du modèle développé par ANN dans les ensembles d'apprentissage et de validation pour l'effort de coupe principal (F_z) en fonction des paramètres d'entrée (r , V_c , f et ap) lors de l'usinage du PA66-GF30. Les résultats obtenus montrent que les valeurs résultantes de l'effort de coupe tangentiel ont été près de la ligne médiane ou d'intersection, cette observation est réalisable notamment lors du test de validation. Ce résultat indique que le modèle obtenu par ANN est satisfaisant en termes d'efficacité et de précision.

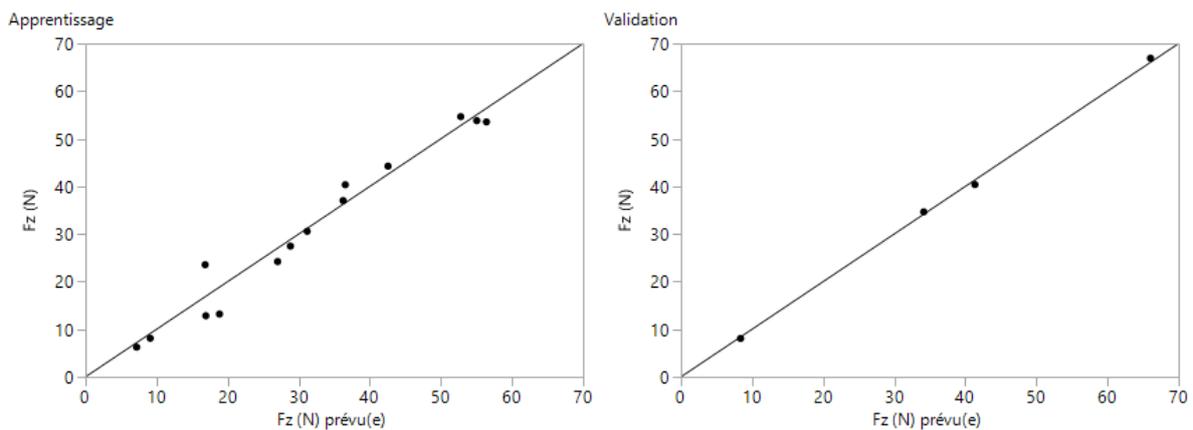


Fig. IV.17. Graphique des valeurs observées et prédites de l'effort (F_z) lors de l'apprentissage et la validation par ANN.

IV.4. Modélisation des paramètres technologiques en utilisant la méthode (RSM)

IV.4.1. Introduction

À partir de l'étude précédente qui concerne la modélisation par (ANN), on peut conclure l'importance et la nécessité de l'application d'autres méthodes pour approfondir les connaissances et d'analyser les résultats des modèles obtenus et de comprendre l'effet des différents paramètres et les interactions entre eux lors du processus d'usinage. Dans ce cadre, la méthode (RSM) représente un outil idéal pour une compréhension approfondie de la contribution de différents éléments qui composent le processus et le modèle concernés. D'autre part, cette méthode est largement utilisée à cause de sa simplicité lors de l'application en comparaison avec d'autres méthodes. Par ailleurs, une comparaison profonde entre les résultats obtenus pour les deux méthodes permet d'extraire le modèle mathématique le plus compatible et précis pour décrire le processus d'usinage et la prédiction des paramètres désirés.

IV.4.2. Méthode (RSM)

Est une collection des techniques statistiques et mathématiques qui ont été développées principalement pour l'objectif de la modélisation des réponses expérimentales d'un processus [64,65]. Le principe est de déterminer les variations enregistrées pour la réponse étudiée par rapport à l'impact significatif des facteurs d'entrée. À l'origine, la méthode (RSM) issue des techniques des plans d'expérience. L'évolution de cette méthode a conduit à l'utilisation de cette dernière dans la modélisation et la simulation des expériences numériques [54], parmi les principaux objectifs de cette méthode on cite:

1. Déterminer les conditions de fonctionnement optimal pour un système.
2. Elle permet de déterminer une région de l'espace des facteurs dans laquelle les caractéristiques de fonctionnement sont satisfaites.
3. Établir la relation entre les variables indépendantes et la réponse désirée qui est dans la majorité des cas inconnue.
4. Elle permet de modéliser et d'analyser un processus pour lequel la réponse influencée par plusieurs variables.

Généralement, la méthodologie des surfaces de réponse passe par les étapes suivantes :

1. Etablir les facteurs d'entrée et les paramètres souhaités de sortie. Dans le cas de cette étude, les variables d'entrée sont (r , V_c , a_p et f), qui représentent les éléments du régime de coupe étudié. D'autre part, les paramètres de sortie concernés sont la rugosité (R_a), l'effort tangentiel (F_z), la puissance de coupe (P) et le débit des copeaux (MRR) qui représentent les paramètres technologiques désirés.

2. La conception et la construction du plan expérimental.

3. La modélisation mathématique des réponses qui est établie par l'intermédiaire de l'équation de régression qui relie la réponse désirée Y et les paramètres d'entrée du processus selon la formule suivante :

$$Y = \emptyset(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (\text{IV.24})$$

Où,

\emptyset : représente la fonction de réponse.

N : le nombre des variables ou des facteurs d'entrée

Selon l'équation (IV.24), on peut extraire la formule qui décrit la relation (entrée-sortie) du processus étudié.

$$Y = \emptyset(r, Vc, f, ap) \quad (\text{IV.25})$$

4. L'analyse statistique qui est effectuée généralement à l'aide des équations ANOVA et qui permet de déterminer la signification des modèles développés et la contribution de différentes variables qui composent ce modèle.

5. La réalisation des surfaces de réponse qui représentent bien les effets principaux et d'interaction sur la réponse souhaitée.

6. L'optimisation du processus et la confirmation des résultats prédits.

La méthodologie des surfaces de réponse (RSM) basée sur une relation d'approximation de la réponse mesurée (Y) et N variables aléatoires d'un processus. Cette approximation (Y) représente généralement une équation polynomiale du premier et deuxième ordre selon la formule suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad (\text{IV.26})$$

Où,

Les coefficients a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} représentent respectivement le terme libre de l'équation, et les termes linéaires, interactifs et quadratiques pour le modèle de régression. Généralement, ces coefficients ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats expérimentaux.

Avec, X_i représente le niveau attribué au facteur i .

X_j , représente le niveau attribué au facteur j .

Le modèle de l'équation IV.26 est appelé surface de réponse, il permet de décrire les phénomènes physiques. Afin de prévoir plus exactement la réponse, une équation de deuxième ordre est utilisée pour chercher le caractère non linéaire du phénomène étudié,

l'équation (IV.27) présente la relation matricielle de la fonction Y d'approximation comme suit :

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (\text{IV.27})$$

Avec, X est la matrice du calcul des effets.

β est le vecteur des coefficients du modèle.

ε représente la somme des carrés des résidus.

À partir de l'équation (IV.26), on peut conclure l'équation non linéaire globale qui concerne les quatre paramètres du processus d'usinage (r , Vc , f et ap) comme suivant :

$$Y = a_0 + a_1 r + a_2 Vc + a_3 f + a_4 ap + a_{12} rVc + a_{13} rf + a_{14} rap + a_{23} Vcf + a_{24} Vcap + a_{34} fap + a_{11} r^2 + a_{22} Vc^2 + a_{33} f^2 + a_{44} ap^2 \quad (\text{IV.28})$$

Les interactions du modèle quadratique sont présentées dans l'équation (IV.29) comme suivant:

$$h = (C^T C)^{-1} C^T Q \quad (\text{IV.29})$$

Où,

h : est la matrice des paramètres estimés.

C : est la matrice calculée (Elle représente les termes linéaires, ou quadratiques et d'interaction).

C^T : est la matrice transposée de C .

Q : est la matrice de réponse désirée.

Après le développement des modèles, il faut vérifier le degré d'explication des modèles obtenus par rapport aux réponses mesurées, pour cet objectif des analyses statistiques ont été effectuées à l'aide de calcul du coefficient de détermination (R^2) et le coefficient de détermination ajusté ($R^2 \text{ Ajust}$) selon les formules suivantes :

$$R^2 = SCR / SCT \quad (\text{IV.30})$$

Où,

SCR : représente la somme des carrés de réponse prédite ou la somme des carrés due à la régression.

SCT : la somme des carrés des réponses mesurées ou la somme des carrés totale.

Ce rapport nous donne une indication sur la qualité de l'ajustement. Il nous donne des informations sur l'existence d'une relation linéaire entre les variables considérées. Il varie généralement entre 0 et 1. Si le R^2 est égal à zéro, c'est que le modèle n'explique rien. Sinon

($R^2=1$), il indique que le modèle explique toutes les réponses mesurées. Ce rapport n'est pas une garantie absolue de la qualité du modèle. Par exemple, un coefficient de corrélation nul n'est pas un indicateur sur l'absence d'une relation entre les variables considérées. Mais, il est possible de trouver une relation non linéaire et cela pose des problèmes de la sur-paramétrisation du modèle lors de la régression multiple. Pour éviter ce phénomène, généralement on passe au calcul du coefficient de corrélation (R^2) ajusté.

$$R^2_{Ajust} = 1 - (SCE / (N - P - 1)) / (SCT / (N - 1)) \quad (IV.31)$$

Avec,

SCE : la somme des carrés des résidus ou due à l'erreur.

N : est le nombre total de simulations du plan d'expériences.

P : est le nombre des facteurs.

Pour l'objectif de déterminer l'énergie consommée pendant une opération d'usinage, il faut calculer la puissance de coupe nécessaire qui est liée principalement à l'effort de coupe principal (F_z), et le débit de copeaux (MRR) qui sont calculés à partir des relations suivantes :

$$P = (Vc \times Fz) / 60 \quad (IV.32)$$

$$MRR = Vc \times f \times ap \quad (IV.33)$$

Où,

Vc : est la vitesse de coupe (m/min).

Fz : est l'effort tangentiel (N).

P : est la puissance de coupe (W).

MRR : est le débit de copeaux enlevés (cm^3/min).

IV.4.3. Analyse de la variance (ANOVA)

L'ANOVA est une technique statistique fondamentale. Le principe de cette dernière est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle liée à l'équation de régression (Modèle utilisé) et une composante résiduelle. L'objectif de cette technique est de déterminer la contribution de chaque facteur dans l'évolution de la variation des données. En d'autres termes, l'objectif est de déterminer la signification des modèles développés et l'effet des variables qui compose ce modèle. Le tableau d'ANOVA se compose principalement à des éléments suivants [66-68]:

- **Somme des carrés (SC)** : elle est utilisée pour l'objectif de l'estimation du carré de l'écart. Elle est présentée selon la formule suivante :

$$SC_f = \gamma \sum_{i=1}^{N_f} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{IV.34})$$

Avec, \bar{y} est la moyenne des réponses, elle est exprimée comme suivant :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (\text{IV.35})$$

Où, y_i représente la moyenne de la réponse observée pour les expériences où le facteur f prend son $i^{\text{ème}}$ niveau.

γ : est le nombre des expériences pour lesquelles le facteur f prend un de ses niveaux N_f . Il est identique pour toutes les expériences pour les plans orthogonaux, il est exprimé selon la relation suivante :

$$\gamma = \frac{N}{N_f} \quad (\text{IV.36})$$

Avec, N : représente le nombre total des expériences effectuées.

N_f : est le nombre des niveaux de chaque facteur.

- **Nombre des degrés de liberté (Ddl_T)** : Ce paramètre lié à un facteur f qui prend un nombre des niveaux ou des valeurs distinctes lors de la réalisation du plan minoré de 1. Chaque variable et chaque interaction présentent par un degré de liberté, pour tous les cas, le nombre total de degrés de liberté est présenté par la relation suivante :

$$Ddl_T = N - 1 \quad (\text{IV.37})$$

Où, N est le nombre total des essais réalisés.

- **Les carrés moyens (CM)** : ils sont utilisés pour l'objectif de déterminer la variance des facteurs et l'influence de chaque paramètre pour un degré de liberté. Ils sont calculés à partir de division de la somme des carrés des écarts (SCE) par le nombre de degrés de liberté ($Ddli$) associé au facteur ou à l'interaction f considéré selon la formule ci-dessous :

$$CM_f = SC_f / Ddl_f \quad (\text{IV.38})$$

- **F-value ou F-observe** : Elle est utilisée principalement pour vérifier l'adéquation du modèle développé. Les valeurs de F-value sont obtenues à partir de division de l'effet de chaque facteur par l'erreur totale sur la valeur estimée du facteur correspondant comme suit :

$$F\text{-value} = CM_f / (CM\text{ erreur}) \quad (\text{IV.39})$$

- **Taux de contribution des facteurs ($Contr. \%$)** : Les valeurs de la contribution pour chaque facteur ($Contr. \%$) sont obtenues par la division de la somme des carrés des écarts de chaque facteur sur la somme des carrés des écarts totale du modèle développé selon la relation suivante :

$$Contr. \% = SC_f \times 100 / SC_T \quad (\text{IV.40})$$

IV.4.4. Résultats et discussions

Tout d'abord, on commence l'analyse des données avec l'extraction des résultats des essais pour chaque expérience effectuée en utilisant la méthode RSM. Le tableau IV.4 illustre tous les résultats obtenus pour la rugosité (R_a), l'effort principal (F_z), la puissance de coupe (P) et le débit de copeaux enlevés (MRR). Les résultats obtenus montrent que les valeurs enregistrées qui concernent la rugosité de surface et l'effort de coupe tangentiel ont été dans l'intervalle de 1.23 à 2.85 et 6.25 à 66.92 respectivement. Par contre, les valeurs obtenues de la puissance (P) et le débit de copeaux enlevés ont été enregistrées dans la marge de 18.23 à 273.25 W et 8 jusqu'à 70.56 cm^3/min respectivement.

Tableau IV.4. Résultats expérimentaux

Essais no.	Facteurs de réponse			
	R_a (μm)	F_z (N)	MRR (cm^3/min)	P (W)
1	1.43	13.21	8.00	27.52
2	2.20	40.36	24.00	84.08
3	2.72	53.55	48.00	111.56
4	1.41	12.85	11.20	37.47
5	1.95	24.23	33.60	70.67
6	2.58	53.81	67.20	156.94
7	1.46	23.56	31.36	96.20
8	1.68	66.92	70.56	273.25
9	2.85	37.03	31.36	151.20
10	1.27	30.58	24.00	63.70
11	1.49	27.47	12.00	57.23
12	1.88	54.65	32.00	113.85
13	1.30	8.08	22.40	23.57
14	1.39	40.39	50.40	117.80
15	1.73	6.25	22.40	18.23
16	1.23	34.66	47.04	141.53
17	1.59	8.12	23.52	33.16
18	2.09	44.26	62.72	180.73

IV.4.4.1. Analyse statistique

IV.4.4.1.1. ANOVA pour la rugosité (R_a)

Le tableau IV.5 présente les résultats d'ANOVA pour R_a . Les valeurs de (Prob>F) inférieures de 0.05 indiquent que les termes du modèle sont significants. Si elles ont été trouvées supérieures de 0.05, ce qui implique que le modèle développé est non significatif. Dans notre cas, la valeur (F-value) du modèle a été trouvée égale à 49.85, ce qui implique que le modèle obtenu est significatif. La rugosité de surface est plus sensible à la variation des paramètres de coupe. À partir des résultats du tableau IV.5, on peut conclure que (f) est le

facteur le plus significatif statistiquement, il affecte la rugosité (R_a) avec une contribution de (61.11%) suivi par le rayon de bec (21.6%). D'autres parts, le tableau d'ANOVA indique que le terme d'interaction ($v*f$) est moins significatif avec une contribution de (9.15%) suivi par le terme quadratique ap^2 (2.45%). Les facteurs (V_c , ap) et les autres termes d'interaction et carrés sont insignifiants. Cette observation est similaire à des résultats obtenus dans les références [24, 26, 32]. La figure IV.18 illustre le pourcentage des contributions de différents facteurs pour le paramètre de réponse (R_a).

Tableau IV.5. Résultats d'ANOVA pour la rugosité de surface (R_a).

Source	SS	DF	MS	F-value	p-value	Contr. %	Remarks
Model	4.39	13	0.34	49.85	0.0009		Significant
A-r	0.59	1	0.59	87.39	0.0007	21.590	//
B-Vc	1.162E-005	1	1.162E-005	1.716E-003	0.9689	0.0004	Not significant
C-f	1.67	1	1.67	246.42	<0.0001	61.112	Significant
D-ap	0.040	1	0.040	5.85	0.0729	1.4637	Not significant
AB	0.021	1	0.021	3.06	0.1553	0.7684	//
AC	0.25	1	0.25	37.13	0.0037	9.1485	Significant
AD	0.014	1	0.014	2.01	0.2290	0.5123	Not significant
BC	5.960E-004	1	5.960E-004	0.08	0.7815	0.0218	//
BD	0.017	1	0.017	2.46	0.1922	0.6221	//
CD	2.068E-003	1	2.068E-003	0.31	0.6100	0.0756	//
A²	0.00	0				0.000	//
B²	0.041	1	0.041	6.01	0.0703	1.5003	//
C²	0.020	1	0.020	2.90	0.1637	0.7318	//
D²	0.067	1	0.067	9.83	0.0350	2.4518	Significant
Residual	0.027	4	6.774E-003				
Total	4.42	17				100	

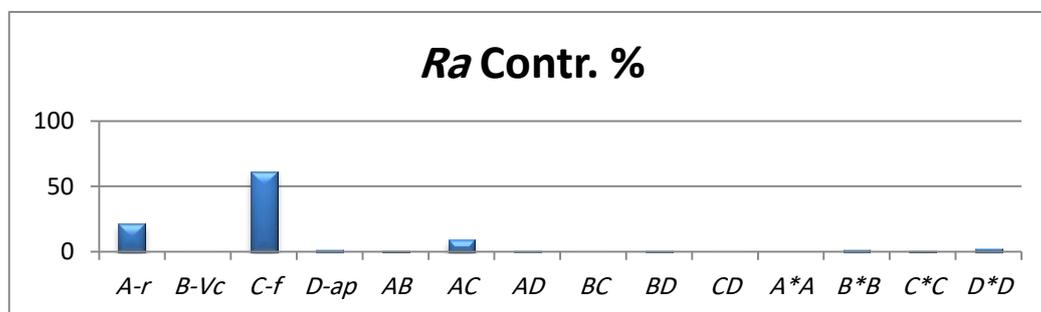


Fig. IV.18. Pourcentage des contributions de différents facteurs pour la rugosité (R_a).

IV.4.4.1.2. ANOVA pour l'effort tangentiel (F_z)

Les résultats de l'ANOVA pour (F_z) sont consignés au tableau IV.6. La valeur (F-value) du modèle égale à 9.26 indique que le modèle est significatif. D'après le tableau d'ANOVA, il est évident que (f) est le facteur le plus dominant qui influence l'évolution de l'effort (F_z) pendant l'usinage du PA66-GF30, suivi par (ap) et le terme quadratique (Vc^2) qui possède un effet moins significatif par rapport aux facteurs précédents avec un taux de contribution égal à 33.37%, 29.40% et 14.63% respectivement. Les autres facteurs ont été trouvés non significatifs. Des résultats similaires ont été obtenus par les auteurs qui se trouvent dans les références [2, 24, 26,40] concernant l'effet de (f). La figure IV.19 illustre le taux des contributions de différents facteurs pour le paramètre technologique (F_z).

Tableau IV.6. Résultats d'ANOVA pour l'effort tangentiel (F_z).

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	p-value PROB> F	Contr. %	Remarks
Model	5491.57	13	422.43	9.26	0.0224		Significant
A-r	31.38	1	31.38	0.69	0.4535	0.657	Not significant
B-Vc	22.14	1	22.14	0.49	0.5244	0.464	//
C-f	1591.74	1	1591.74	34.90	0.0041	33.37	Significant
D-ap	1402.48	1	1402.48	30.75	0.0052	29.40	//
AB	308.38	1	308.38	6.76	0.0600	6.465	Not significant
AC	13.36	1	13.36	0.29	0.6171	0.280	//
AD	182.99	1	182.99	4.01	0.1157	3.836	//
BC	0.093	1	0.093	2.033E-003	0.9662	0.001	//
BD	236.01	1	236.01	5.17	0.0853	4.948	//
CD	191.80	1	191.80	4.21	0.1096	4.021	//
A²	0.00	0				0.000	//
B²	697.94	1	697.94	15.30	0.0174	14.63	Significant
C²	85.69	1	85.69	1.88	0.2423	1.796	Not significant
D²	5.28	1	5.28	0.12	0.7508	0.110	//
Residual	182.44	4	45.61				
Total	5674.01	17				100	

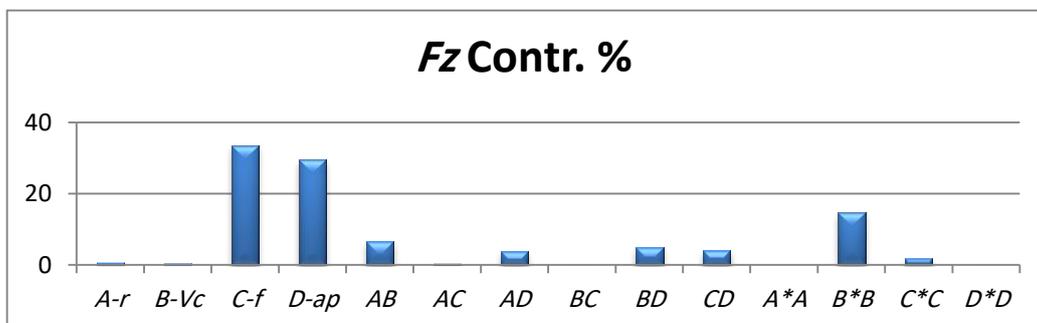


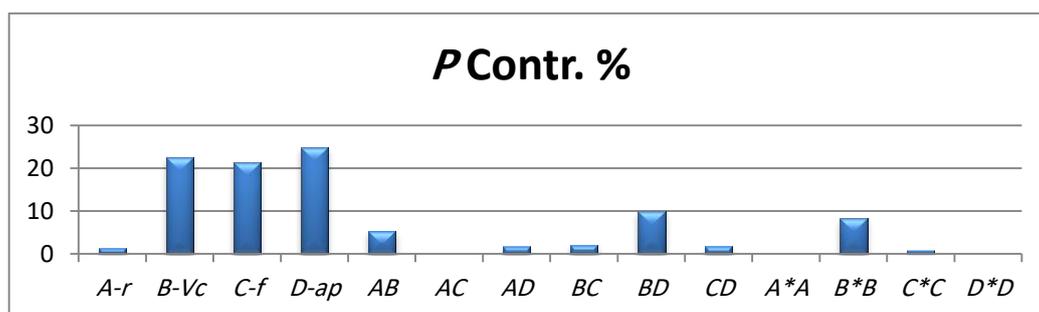
Fig. IV.19. Pourcentage des contributions de différents facteurs pour (F_z).

IV.4.4.1.3. ANOVA pour la puissance de coupe (P)

Les résultats d'ANOVA de la puissance (P) sont présentés dans le tableau IV.7. La valeur obtenue de (F-value) démontre la signification du modèle développé. Le facteur (ap) est le facteur le plus important qui possède un impact sur la puissance (P) avec un pourcentage de contributions égal à 24.9% suivi par les facteurs (Vc) et (f) avec des contributions de 22.50% et 21.36% respectivement. Le facteur d'interaction ($Vc*ap$) a été trouvé moins significatif en comparaison avec des facteurs précédents suivi par le terme quadratique (Vc^2) avec une contribution de 9.89% et 8.25% respectivement. Le rayon de bec et les autres facteurs d'interaction et les carrés ne possèdent aucun impact. La figure IV.20 représente les taux des contributions de différents facteurs étudiés pour la puissance de coupe (p).

Tableau IV.7. Résultats d'ANOVA pour la puissance (P).

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	p-value PROB > F	Contr. %	Remarks
Model	73179.49	13	5629.19	11.69	0.0146		Significant
A-r	896.08	1	896.08	1.86	0.2442	1.313	Not significant
B-Vc	15347.27	1	15347.27	31.87	0.0048	22.50	Significant
C-f	14566.76	1	14566.76	30.25	0.0053	21.35	//
D-ap	16980.31	1	16980.31	35.27	0.0040	24.89	//
AB	3652.99	1	3652.99	7.59	0.0511	5.356	Not significant
AC	63.68	1	63.68	0.13	0.7345	0.093	//
AD	1156.07	1	1156.07	2.40	0.1962	1.695	//
BC	1405.18	1	1405.18	2.92	0.1628	2.060	//
BD	6747.26	1	6747.26	14.01	0.0201	9.893	Significant
CD	1234.23	1	1234.23	2.56	0.1846	1.809	Not significant
A²	0.00	0				0.000	//
B²	5629.40	1	5629.40	11.69	0.0268	8.254	Significant
C²	520.74	1	520.74	1.08	0.3571	0.763	Not significant
D²	1.67	1	1.67	3.463E-003	0.9559	0.002	//
Residual	1925.95	4	481.49				
Total	75105.44	17				100	

Fig. IV.20. Pourcentage des contributions de différents facteurs pour la puissance (P).

IV.4.4.1.4. ANOVA pour le débit de copeaux enlevés (MRR)

Le tableau IV.8 présente les résultats d'ANOVA pour MRR. La valeur (F-value) du modèle développé démontre que le modèle est significatif. Les résultats obtenus montrent que (ap) est le facteur le plus influant statiquement sur le débit de copeaux enlevés (MRR) avec une contribution de 48.80%, suivi par (Vc) et (f) avec une contribution égale à 25.48% et 18.18% respectivement. Les facteurs d'interaction (Vc*ap), (Vc*f) et (f*ap) ont été trouvés moins significatifs avec un pourcentage de contributions égal à 3.05%, 2.33% et 1.96% respectivement. Les autres termes d'interaction et les carrés ont été trouvés insignifiants. La figure IV.21 illustre le taux des contributions des facteurs étudiés pour le paramètre de réponse (MRR).

Tableau IV.8. Résultats d'ANOVA pour le débit de copeaux enlevés (MRR).

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	p-value PROB > F	Contr. %	Remarks
Model	6168.44	13	474.50	1012.15	< 0.0001		Significant
A-r	0.47	1	0.47	1.01	0.3712	0.009	Not significant
B-Vc	1226.25	1	1226.25	2615.73	< 0.0001	25.48	Significant
C-f	875.12	1	875.12	1866.74	< 0.0001	18.18	//
D-ap	2348.53	1	2348.53	5009.69	< 0.0001	48.80	//
AB	1.11	1	1.11	2.37	0.1985	0.023	Not significant
AC	2.81	1	2.81	6.00	0.0704	0.058	//
AD	2.81	1	2.81	6.00	0.0704	0.058	//
BC	112.02	1	112.02	238.96	0.0001	2.327	Significant
BD	147.01	1	147.01	313.60	< 0.0001	3.055	//
CD	94.30	1	94.30	201.14	0.0001	1.959	//
A²	0.00	0				0.000	Not significant
B²	0.92	1	0.92	1.95	0.2347	0.019	//
C²	0.27	1	0.27	0.58	0.4890	0.005	//
D²	0.27	1	0.27	0.58	0.4890	0.005	//
Residual	1.88	4	0.47				
Total	6170.31	17				100	

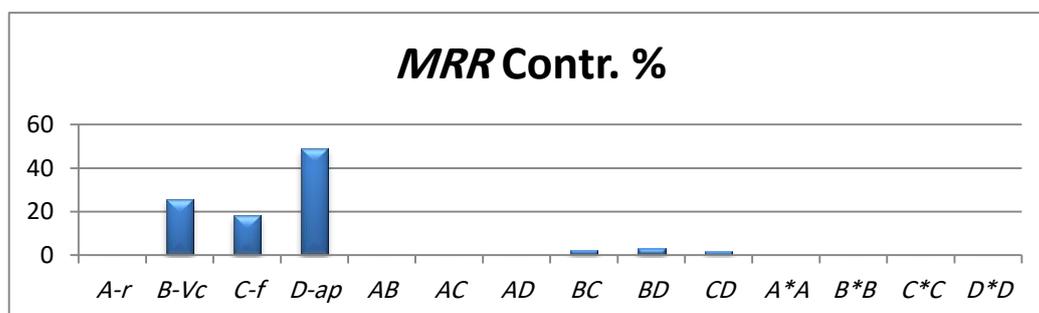


Fig. IV.21. Pourcentage des contributions de différents facteurs pour (MRR).

IV.4.4.2. Diagramme des effets principaux pour Ra , Fz , P et MRR

Les effets principaux de différents facteurs d'entrée sur la rugosité (Ra) lors du tournage du PA66-GF30 sont présentés dans la figure IV.22.a. On peut noter que le facteur (f) est le facteur prépondérant qui possède un impact sur l'évolution de la rugosité (Ra) suivie par le rayon de bec (r). Par contre, les effets de (Vc) et (ap) sont presque négligeables. D'après les résultats observés, on peut conclure que la sélection des faibles valeurs de l'avance par tour (f) en parallèle avec un rayon de bec élevé (r) sont appropriées pour atteindre une bonne qualité de surface (Ra) pendant le tournage du PA66-GF30. Ces conclusions confirment les résultats de l'ANOVA liés à la rugosité (Ra).

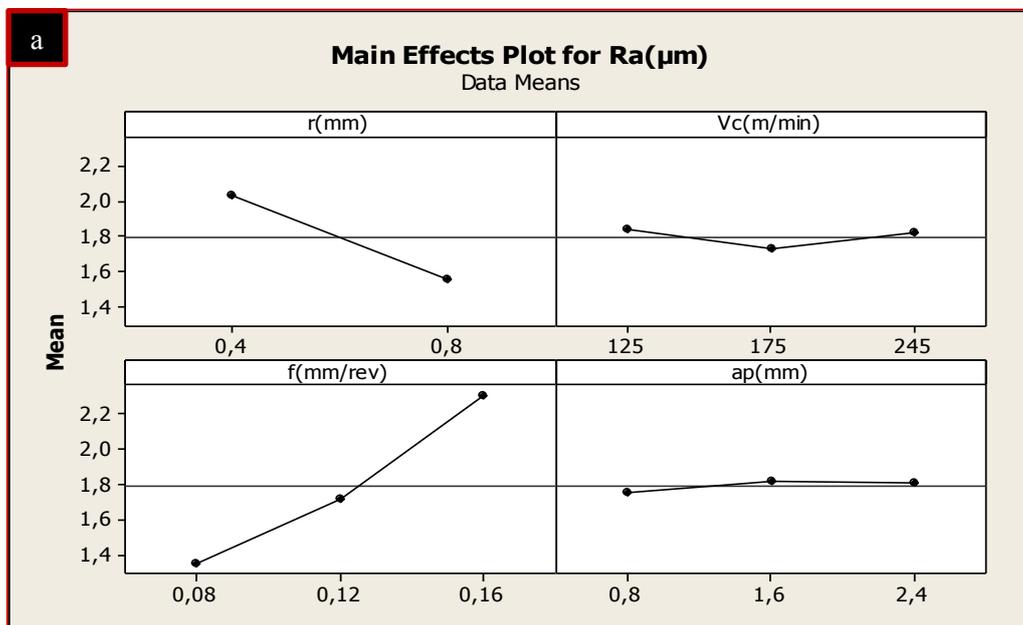


Fig. IV.22.a. Diagramme des effets principaux pour la rugosité (Ra).

Les figures IV.22. b, c et d illustrent le profil des effets principaux des différents facteurs étudiés pour l'effort principal (Fz), la puissance (p) et le débit de copeaux enlevés (MRR) respectivement. Les résultats montrent que l'effort (Fz) est affecté principalement par la variation de (f) et (ap). Par contre, les effets du rayon de bec (r) et de (Vc) sont presque négligeables. Pour cela, la sélection des faibles valeurs de (f) et (ap) est plus compatible pour la réduction de l'effort (Fz) lors du tournage de polyamide composite (PA66-GF30). Concernant la puissance (P) et le (MRR), les figures IV.22.c et IV.22.d montrent que (ap), (Vc) et (f) sont les facteurs les plus significants sur l'évolution de deux réponses, mais on peut noter qu'il existe une différence dans le degré de l'influence entre les deux paramètres de réponse.

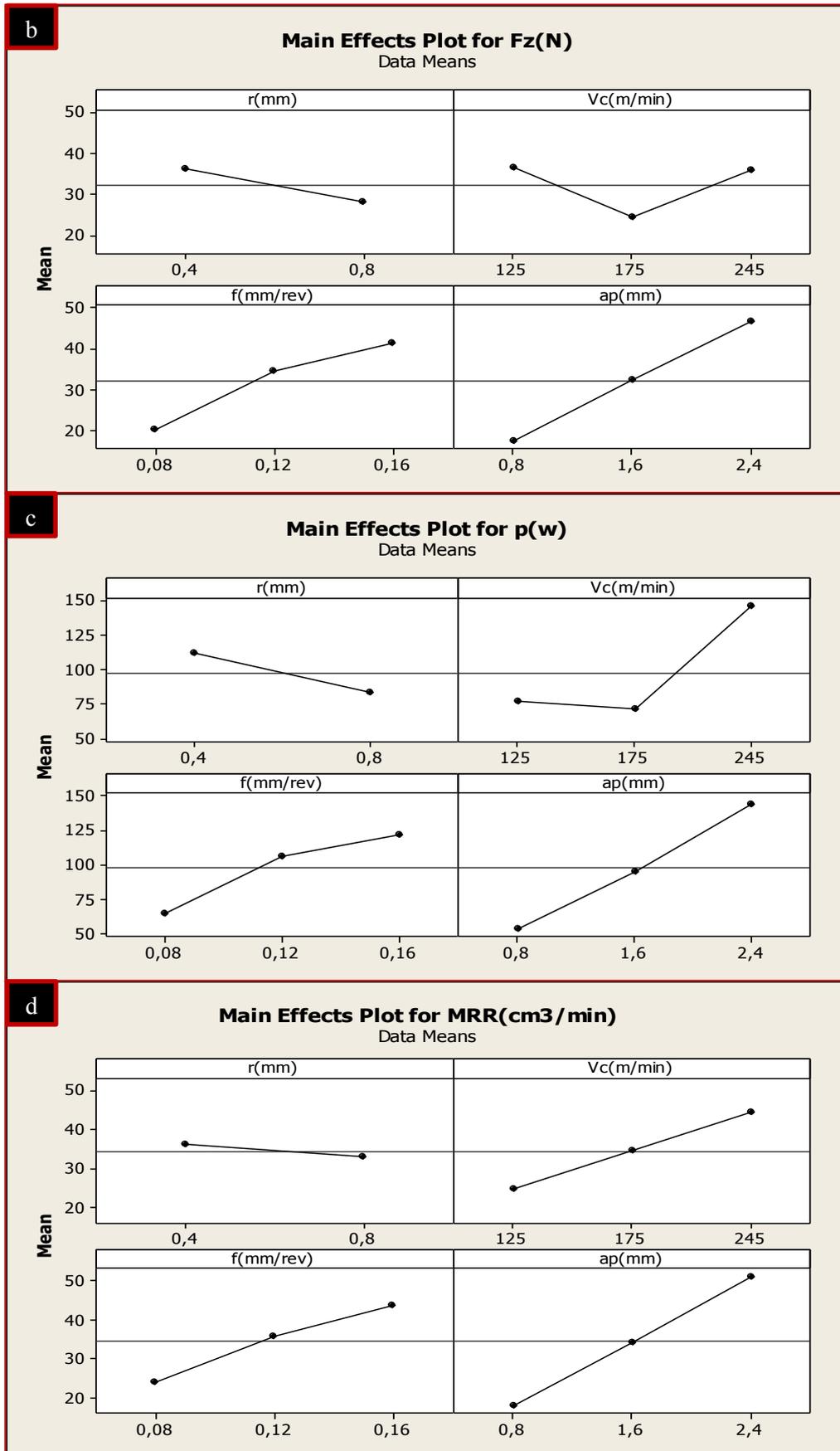


Fig. IV.22. Diagramme des effets principaux pour les réponses : (b) Fz, (c) P, (d) MRR.

IV.4.4.3. Modélisation mathématique des facteurs de réponse

L'application de l'analyse de régression multiple sur les résultats expérimentaux a permis d'extraire les modèles mathématiques statistiques qui expliquent l'impact de différents facteurs d'entrée sur la réponse étudiée en termes de la rugosité (R_a), l'effort (F_z), la puissance (P) et le débit du copeau enlevé (MRR) lors du tournage du polyamide composite (PA66-GF30) en utilisant des outils de carbure revêtus. Les modèles concernés sont exprimés successivement par les équations suivantes :

$$R_a = 1.76 - 0.23 r - 1.095E-003 \times V_c + 0.49 f - 0.076 ap + 0.046 r \times V_c - 0.21 r \times f + 0.049 r \times ap + 0.01 V_c \times f - 0.055 V_c \times ap + 0.026 f \times ap + 0.11 V_c^2 + 0.076 f^2 - 0.14 ap^2 \quad (IV.41)$$

$$R - Sq = 0.9939, \quad R - Sq(Adj) = 0.9739$$

$$F_z = 27.03 - 1.66 r + 1.51 V_c + 15.13 f + 14.20 ap - 5.67 r \times V_c - 1.55 r \times f + 5.72 r \times ap + 0.13 V_c \times f + 6.49 V_c \times ap + 7.8 f \times ap + 14.02 V_c^2 - 5.05 f^2 - 1.25 ap^2 \quad (IV.42)$$

$$R - Sq = 0.9678, \quad R - Sq(Adj) = 0.8633$$

$$P = 81,78 - 8,88 r + 39,79 V_c + 45,78 f - 49,42 ap - 19,52 r \times V_c - 3,37 r \times f + 14,38 r \times ap + 15,85 V_c \times f + 34,72 V_c \times ap + 19,79 f \times ap + 39,81 V_c^2 - 12,44 f^2 + 0,7 ap^2 \quad (IV.43)$$

$$R - Sq = 0.9744, \quad R - Sq(Adj) = 0.8910$$

$$MRR = 35,89 + 0,2 r + 11,25 V_c + 11,22 f + 18,38 ap - 0,34 r \times V_c + 0,71 r \times f - 0,71 r \times ap + 4,47 V_c \times f + 5,13 V_c \times ap + 5,47 f \times ap - 0,51 V_c^2 - 0,28 f^2 - 0,28 ap^2 \quad (IV.44)$$

$$R - Sq = 0.9997, \quad R - Sq(Adj) = 0.9987$$

Le coefficient de détermination multiple (R-sq) est utilisé pour déterminer l'adéquation des modèles quadratiques afin de prédire les différents facteurs de réponse [2,69]. Les résultats obtenus qui concernent les valeurs de (R-sq) des modèles développés ont démontré l'existence d'une corrélation excellente entre les valeurs expérimentales et prédites des réponses étudiées. Cela signifie que les modèles proposés sont satisfaisants en termes de précision. La figure IV.23 présente le diagramme de probabilité des résidus pour les facteurs de réponse étudiés (R_a , F_z , P et MRR). D'après cette figure, on peut observer que les résidus sont situés très proches de la ligne moyenne ou presque sont identiques, ce qui signifie que les erreurs enregistrées ont été distribuées dans un intervalle acceptable.

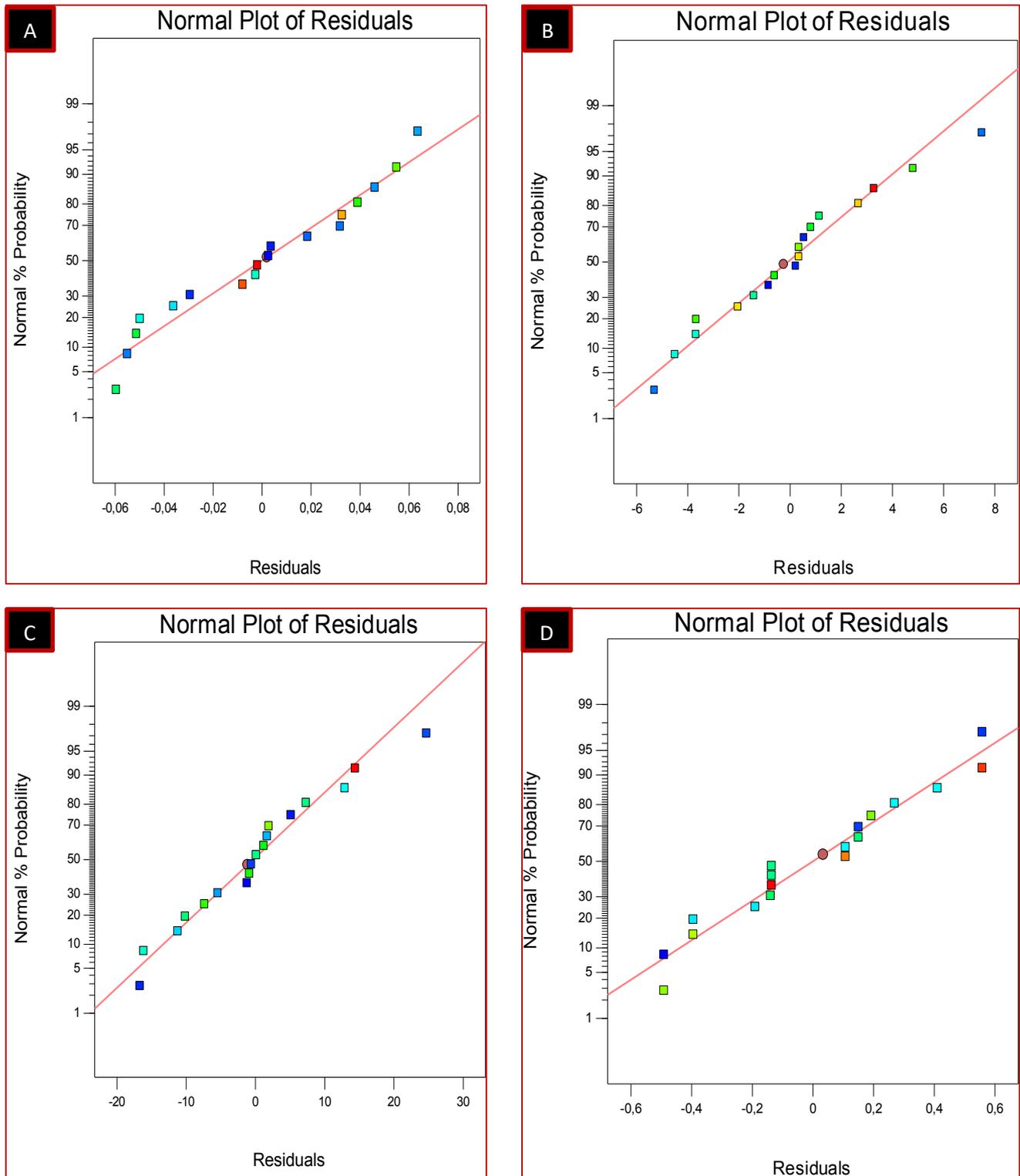
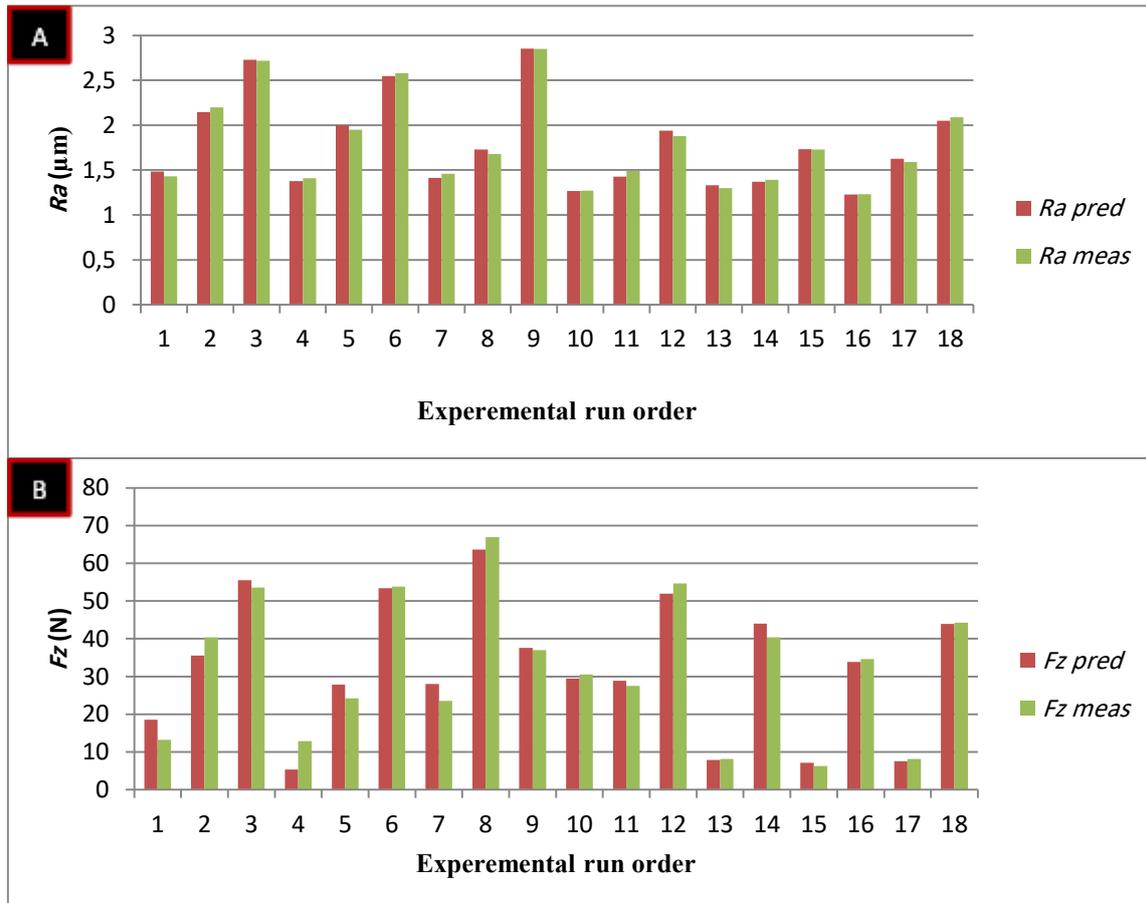


Fig. IV.23. Diagramme de probabilité des résidus pour les facteurs de réponse :
(A) Rugosité de surface, **(B)** Effort tangentiel de coupe, **(C)** Puissance de coupe,
(D) Débit de copeaux enlevés.

IV.4.4.3.1. Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés

La comparaison entre les valeurs prédites obtenues à partir des modèles développés et les résultats expérimentaux réalisés pour la rugosité, l'effort tangentiel, la puissance consommée et le MRR lors de l'usinage du PA66-GF30 est présentée dans les figures IV.24 (A-D). La comparaison indique que les résultats prédits et expérimentaux sont presque identiques.



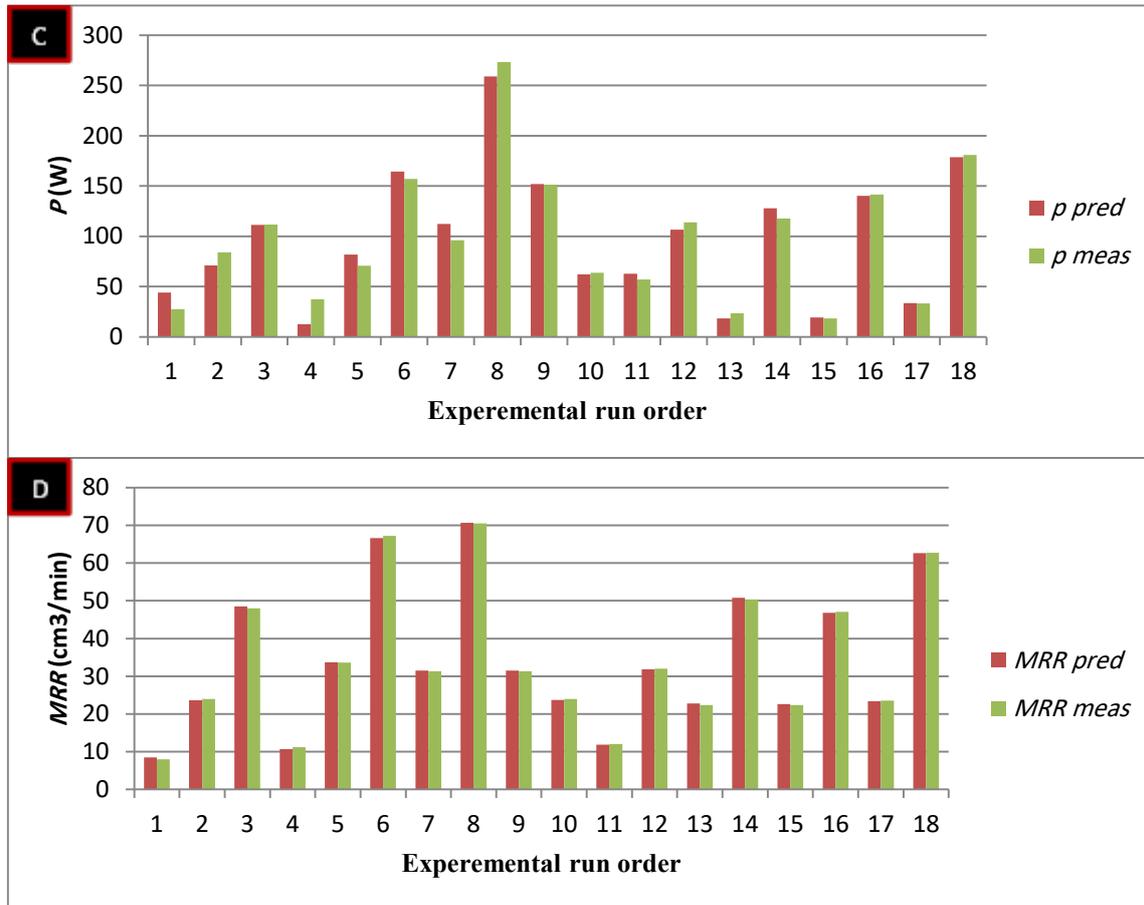


Fig. IV.24. Résultats expérimentaux et prédits pour les facteurs de réponse : (A) Ra, (B) Fz, (C) P and (D) MRR.

IV.4.4.4. Diagramme des effets d'interaction sur l'évolution des facteurs de réponse

Pour mieux visualiser l'effet d'interaction des paramètres d'entrée sur les facteurs de réponse, les diagrammes (3D) des surfaces de réponse ont été développés à base des équations (IV.6, à IV.9) pour les paramètres technologiques étudiés. Les diagrammes des surfaces de réponse et des contours sont exprimés dans les figures (IV.25- IV.28). Les résultats ont été obtenus à partir de la fixation de deux paramètres d'entrée à un niveau moyen. Par contre, les deux facteurs retenus ont été variés en parallèle avec les facteurs de réponse étudiés (Ra, Fz, P et MRR).

La figure IV.25a-b illustre les effets d'interaction à partir de la variation de deux variables d'entrée (le rayon de bec et l'avance) afin de connaître l'évolution de la rugosité (Ra) en fonction de deux variables en même temps. Par contre, (V_c) et (a_p) restent constantes à une valeur de 185 m/min et 1.6 mm respectivement. Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de (f) conduit à une élévation de la rugosité. Par contre, le choix d'un grand rayon de bec conduit à la diminution de la rugosité de surface. On remarque aussi que

l'impact de l'avance sur (R_a) a été trouvé plus significatif par rapport à l'effet du rayon de bec. Ces observations indiquent que l'élévation dans l'avance conduit à l'augmentation dans la zone de coupe et le volume de la matière éliminée, et en conséquence à la croissance de la résistance du matériau sous l'effet de coupe, ce qui implique des efforts de coupe élevés pour l'enlèvement de la matière [50,51]. Ces efforts représentent la cause principale qui conduit à l'augmentation de la rugosité de surface. D'une part, le choix des avances élevées conduit à l'augmentation de la température de coupe notamment lorsqu'on prend en compte la nature de la matrice polymère qui se caractérise par leur isolation thermique, ce qui permet de concentrer la chaleur créée par l'opération d'usinage dans la zone de coupe et en conséquence il contribue dans l'accélération des endommagements de l'usure des outils de coupe. À l'autre part, il peut entraîner la croissance des vibrations et la création d'une forme d'usinage incomplète avec une passe plus vitesse. Toutes les causes précédentes peuvent conduire en conséquence à un état de surface médiocre. Des résultats similaires ont été obtenus par [32,52]. Par ailleurs, un rayon de bec plus grand peut conduire à un bon état de surface en raison de la relation directe entre la dimension du rayon (r) et la rugosité obtenue. Par contre, un rayon de bec réduit contribue à la diminution de la pression sur l'outil et permet de limiter le choix de l'avance qui peut être utilisable. Donc, l'utilisation d'un grand rayon (r) peut conduire à un bon état de surface et permet d'écraser l'effet des aspérités. Les résultats démontrent clairement que la rugosité de surface a été affectée principalement par l'avance. Par contre, le degré d'influence est différent de celle applicable pour la théorie classique qui concerne la coupe des métaux en raison de la microstructure hétérogène des polymères composites GFRP [52].

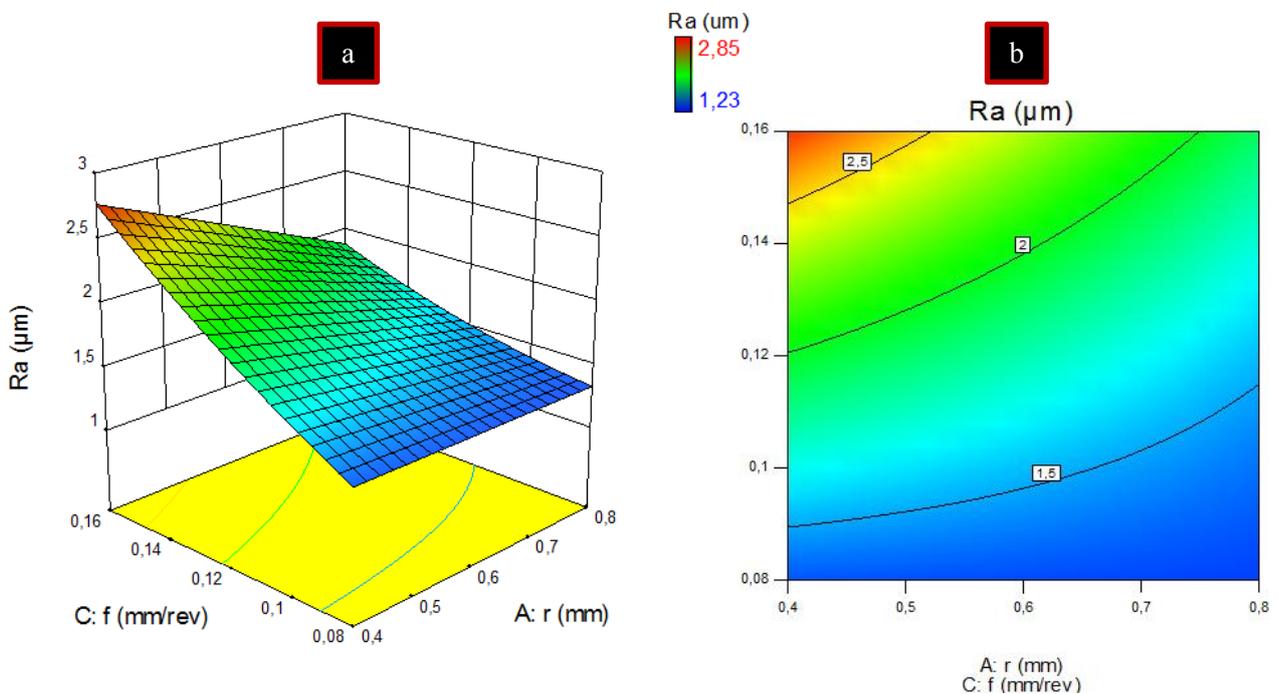


Fig. IV.25. Surface de réponse 3D et les contours pour les effets d'interactions de l'avance par tour et du rayon de bec sur la rugosité de surface.

La figure IV.26a-b présente l'impact de (f) et de (ap) sur l'effort (F_z) avec des valeurs constantes du rayon de bec et de la vitesse de coupe égaux à 0.6 mm et 185 m/min. D'après cette figure, on peut observer que l'effort tangentiel augmente avec (f) et (ap). La relation qui présente l'évolution de l'effort tangentiel en fonction de (ap) et (f) a été trouvée non linéaire.

On remarque que l'influence de (f) a été plus importante que l'effet de (ap). L'augmentation de (f) et de (ap) a été expliquée par la croissance de la surface de contact entre l'outil de coupe et la pièce, en conséquence le volume de la matière enlevée augmente, ce qui permet d'augmenter la résistance du matériau sous l'effet de coupe et la contribution dans l'élévation de l'effort (F_z). Des résultats similaires ont été obtenus par [51, 68, 70]. Les résultats obtenus ont été différents des résultats réalisés pendant l'usinage des métaux en raison de la différence enregistrée dans le degré de l'influence entre (ap) et (f) dans l'évolution de l'effort principal lors de l'usinage des matériaux composites GFRP [52, 71].

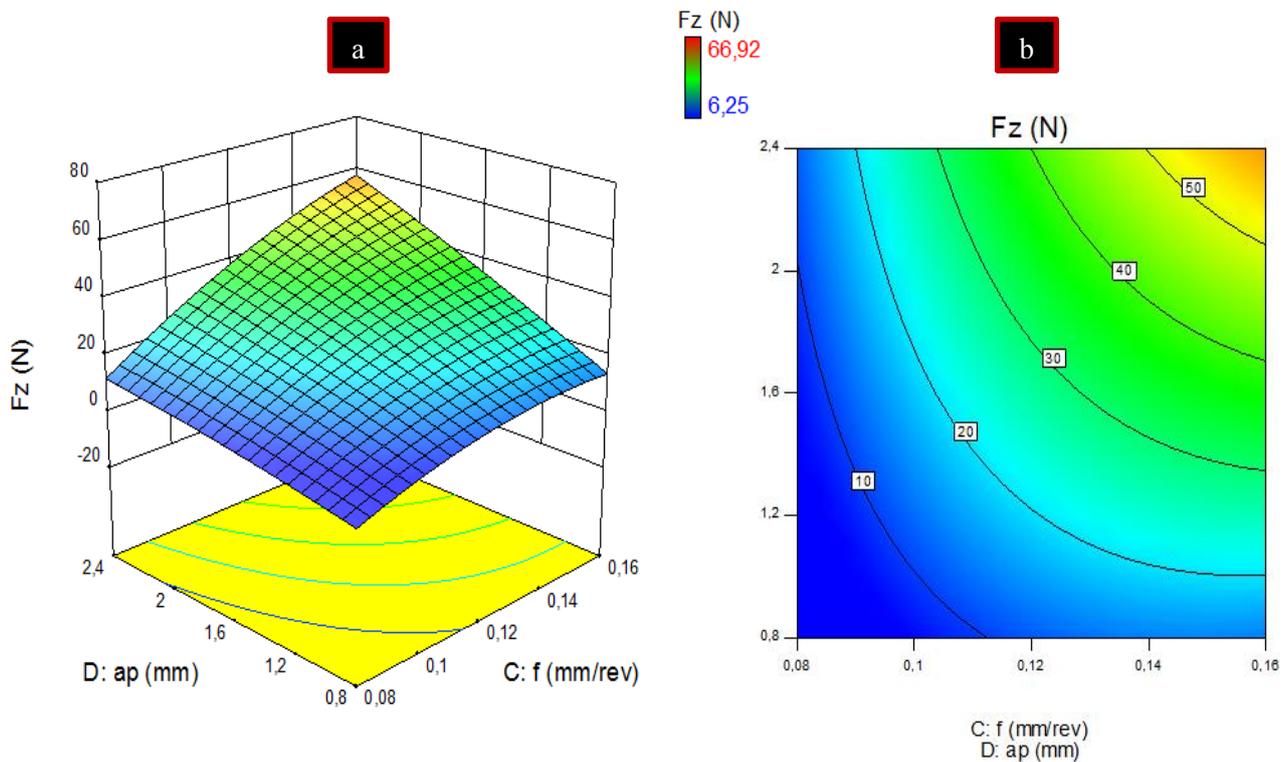


Fig. IV.26. Surface de réponse 3D et les contours pour les effets d'interactions de (f) et de (ap) sur l'effort tangentiel.

La figure IV.27a-b illustre l'influence de (V_c) et (ap) sur la puissance (p) avec des valeurs constantes du rayon de bec et de (f) égaux à 0.6 mm et 0.12 mm/tr respectivement. D'une part, la puissance de coupe diminue en parallèle avec l'élévation de la vitesse de coupe et d'autre part, elle augmente en parallèle avec la croissance de (ap). Par ailleurs, pour des

valeurs de la (V_c) supérieures à 175 m/min, l'influence de (V_c) et (a_p) devenue similaire. On peut noter que la relation liée à l'évolution de la puissance de coupe en fonction de (a_p) et (V_c) est non linéaire (IV.46). On peut comprendre les phénomènes observés à partir de l'analyse de l'évolution de l'effort (F_z), au début, l'élévation de (V_c) conduit à une grande diminution, par contre avec des (V_c) élevées supérieures à 175 m/min, l'effort de coupe tend vers la croissance. La diminution dans l'effort de coupe au début peut s'expliquer par la réduction dans le contact (outil-coupeau) et l'expansion dans la surface de la zone de coupe et la température résultante dans cette dernière, et en conséquence à la réduction dans la résistance du matériau sous l'effet de coupe. L'augmentation de (V_c) supérieure à 175 m/min conduit à une usure de coupe accélérée. D'une part, des (V_c) élevées entraînent des taux élevés de déformation des fibres de verre dans la matière de coupe, en conséquence, elles créent une usure accélérée de l'outil et une résistance élevée de la matière contre l'action de coupe [72]. Toutes les causes précédentes peuvent conduire finalement à un effort élevé. D'une part, la croissance de (a_p) conduit à une augmentation dans l'effort principal et en conséquence dans la puissance nécessaire à la coupe, en raison de la relation proportionnelle qui lie la puissance de coupe et l'effort tangentiel selon l'équation (IV.32).

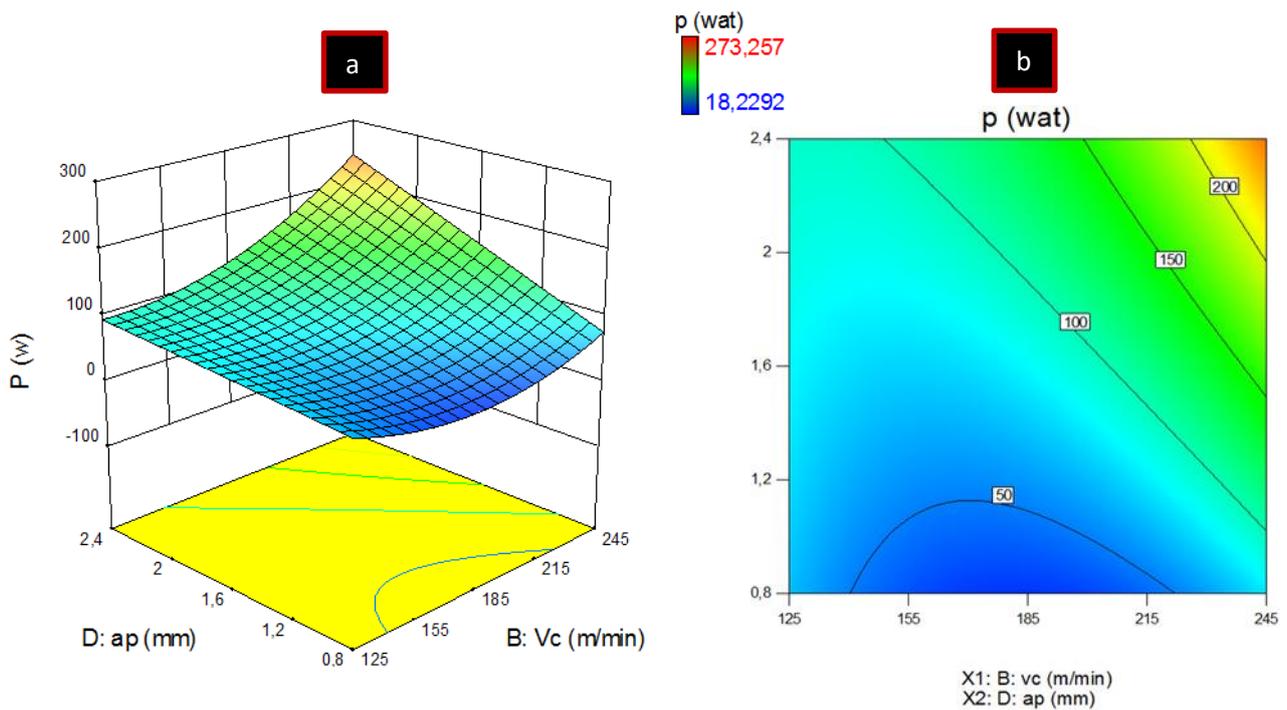


Fig. IV.27. Surface de réponse 3D et les contours pour les effets d'interactions de (V_c) et de (a_p) sur la puissance de coupe.

L'influence des facteurs (V_c) et de (f) sur le débit de copeaux enlevés avec des valeurs constantes du rayon de bec et de (a_p), ($r=0.6$ mm et $a_p=1.6$ mm) est exprimée dans la figure IV.28a-b. Cette figure montre clairement que l'augmentation des facteurs (f et V_c) conduit directement à l'augmentation de débit de copeaux enlevés (équation IV.33). D'une façon générale, on peut conclure que pour un maximum de débit de copeaux enlevés, il faut sélectionner le maximum de trois combinaisons (V_c , f et a_p) qui correspond avec le maximum de la puissance de coupe.

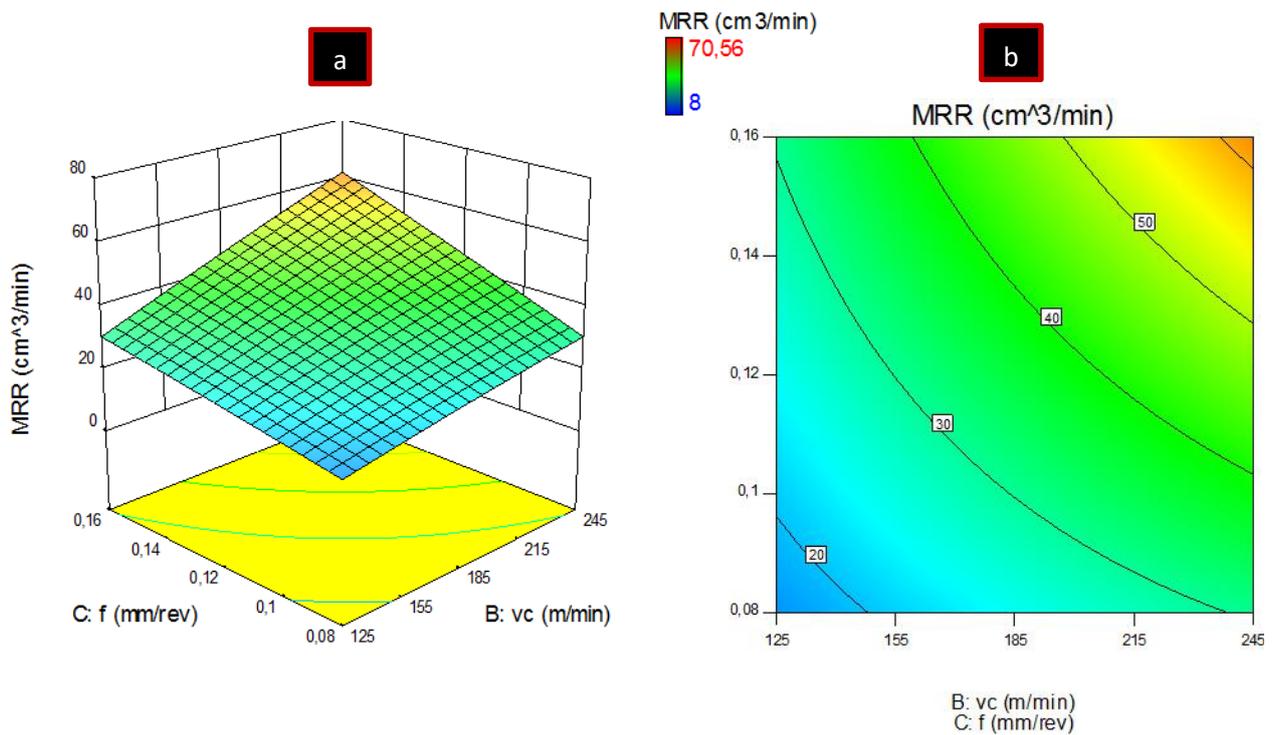


Fig. IV.28. Surface de réponse 3D et les contours pour les effets d'interactions de (V_c) et de (f) sur le débit de copeaux enlevés.

IV.5. Essais de validation

Afin de vérifier la compatibilité et l'efficacité des modèles obtenus par la méthode (RSM) pour les différentes réponses, un nombre des expériences hors du plan expérimental de Taguchi ont été effectuées pour évaluer la rugosité de surface et l'effort tangentiel de coupe. Les erreurs enregistrées qui concernent les résultats expérimentaux et prédits sont exprimées dans le tableau IV.9. Le pourcentage d'erreurs entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité de surface et l'effort de coupe principal est présenté dans la figure IV.29. D'après la figure IV.29, on peut observer que les erreurs obtenues pour (Ra) et (Fz) ont été dans l'intervalle de (0.19 % - 5.60 %) et (4.62 % - 9.89 %) respectivement. Les résultats obtenus indiquent clairement que l'erreur calculée est faible. Ces résultats confirment la validation des modèles développés pour la prédiction des paramètres du processus dans un intervalle acceptable en termes de précision.

Tableau IV.9. Résultats des essais de validation.

Exp. no.	Paramètres d'usinage				(Ra)			(Fz)		
	<i>r</i> (mm)	<i>Vc</i> (m/min)	<i>f</i> (mm/rev)	<i>ap</i> (mm)	Exp.	Pred.	Error (%)	Exp.	Pred.	Error (%)
1	0.40	125.60	0.14	0.80	2.42	2.4248	0.19	33.52	35.1267	4.79
2	0.40	178.35	0.14	0.80	2.47	2.3319	5.60	23.30	22.2215	4.62
3	0.40	125.60	0.08	1.00	1.49	1.5202	2.02	15.77	17.3297	9.89

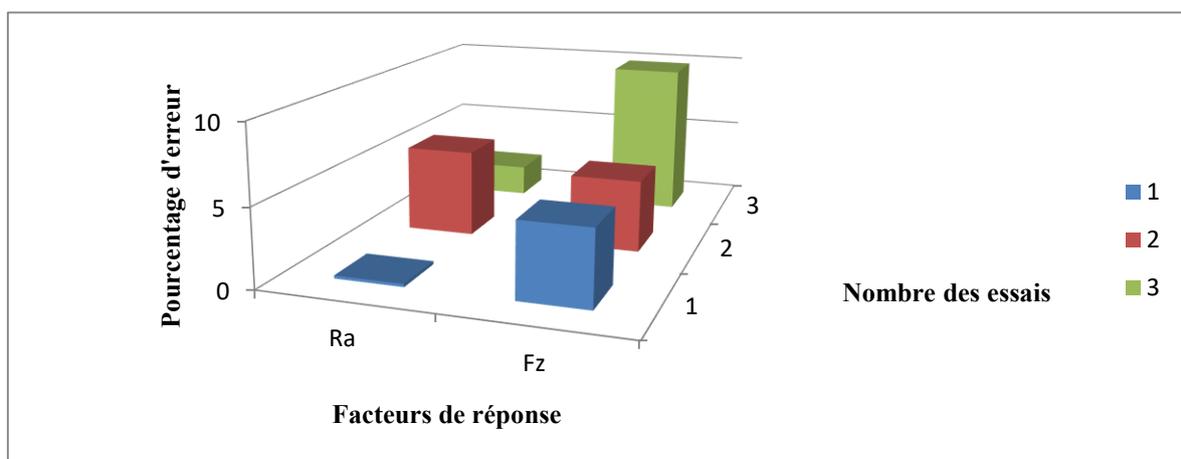


Fig. IV.29. Erreurs enregistrées pour les essais de validation.

IV.6. Comparaison entre la modélisation ANN et RSM

Les résultats qui concernent le coefficient de détermination (R-sq) obtenu par la méthode (RSM) et l'approche (ANN) pour les deux paramètres technologiques étudiés (Ra, Fz) sont exprimés dans le tableau IV.10. On peut noter clairement que les deux modèles développés pour la rugosité de surface et l'effort tangentiel de coupe donnent des bons résultats, les valeurs de R^2 ont été trouvées entre (0.993-0.999) et (0.96-0.981) pour Ra et Fz respectivement. Les résultats obtenus confirment que les deux modèles développés pour les réponses étudiées (Ra et Fz) expliquent bien les résultats expérimentaux. Aussi, on peut observer que les valeurs du coefficient de détermination liées aux modèles ANN (0.999,0.981) sont plus grandes que celles développés par la méthodologie des surfaces de réponse (0.993,0.967), ce qui signifie que l'approche ANN possède une meilleure capacité pour atteindre des modèles plus précis afin de prédire les différents paramètres du processus d'usinage étudié.

Tableau IV.10. Comparaison entre les modèles développés en termes du coefficient de détermination pour les deux facteurs de réponse (Ra et Fz).

Paramètres de réponse	Coefficient de détermination (R-Sq)	
	Modèle ANN	Modèle RSM
Rugosité (Ra)	$R^2=0.99998185$	$R^2=0.9939$
Effort tangentiel (Fz)	$R^2=0.98133965$	$R^2=0.9678$

Les résultats liés à la comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs estimées par les modèles RSM et ANN pour les deux facteurs de réponse (Ra et Fz) sont exprimés dans le tableau IV.11. Les figures IV.30 et IV.31 présentent les résultats obtenus qui concernent les valeurs estimées à partir des modèles développés par la méthode (RSM) et l'approche (ANN) par rapport aux résultats expérimentaux pendant l'usinage du PA66-GF30 pour les deux paramètres technologiques étudiés (Ra et Fz) respectivement. D'après les figures IV.30 et IV.31, on peut constater que les valeurs prédites de la rugosité de surface et de l'effort tangentiel de coupe sont presque identiques avec les résultats expérimentaux pour les deux cas de modélisation (ANN et RSM). Ce qui confirme l'efficacité et la validation des modèles développés pour la prédiction de (Ra et Fz) lors de l'usinage du PA66-GF30. D'une part, la comparaison entre les valeurs estimées de (Ra et Fz) par la méthodologie RSM et l'approche ANN montre clairement que les modèles développés par des réseaux de neurones ont été plus précis que ceux développés par la méthodologie des surfaces de réponse. Ce qui démontre la précision et la robustesse de l'approche ANN afin de prédire les sorties lors de ce processus d'usinage.

Tableau IV.11. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs estimées par les modèles RSM et ANN pour les deux facteurs de réponse (Ra et Fz).

Nombre des essais	Rugosité de surface (Ra)					Effort de coupe tangentiel (Fz)				
	Exp.	ANN	RSM	Erreur ANN	Erreur RSM	Exp.	ANN	RSM	Erreur ANN	Erreur RSM
1	1.43	1.429	1.484	0.069	3.77	13.21	18.847	18.491	42.67	39.98
2	2.20	2.200	2.145	0.000	2.50	40.36	36.544	35.529	9.454	11.97
3	2.72	2.721	2.727	0.036	0.25	53.55	56.398	55.567	5.318	3.760
4	1.41	1.949	1.378	38.22	2.27	12.85	27.025	5.3293	110.3	58.52
5	1.95	1.420	2.001	27.17	2.61	24.23	16.930	27.885	30.12	15.08
6	2.58	2.580	2.547	0.000	1.28	53.81	55.039	53.443	2.283	0.680
7	1.46	1.458	1.413	0.136	3.22	23.56	16.832	28.038	28.55	19.00
8	1.68	1.679	1.729	0.059	2.91	66.92	66.050	63.617	1.3	4.935
9	2.85	2.850	2.851	0.000	0.03	37.03	36.226	37.617	2.171	1.580
10	1.27	1.270	1.266	0.000	0.31	30.58	31.184	29.414	1.975	3.810
11	1.49	1.490	1.426	0.000	4.29	27.47	28.825	28.863	4.932	5.070
12	1.88	1.879	1.939	0.053	3.14	54.65	52.783	51.954	3.416	4.930
13	1.30	1.300	1.329	0.000	2.23	8.080	8.3815	7.8389	3.731	2.980
14	1.39	1.390	1.371	0.000	1.37	40.39	41.345	44.039	2.364	9.030
15	1.73	1.730	1.732	0.000	0.11	6.250	7.1879	7.0727	15.00	13.16
16	1.23	1.230	1.227	0.000	0.24	34.66	34.145	33.827	1.485	2.400
17	1.59	1.590	1.626	0.000	2.26	8.120	9.1036	7.5558	12.11	6.940
18	2.09	2.090	2.051	0.000	1.87	44.26	42.553	43.893	3.856	0.820

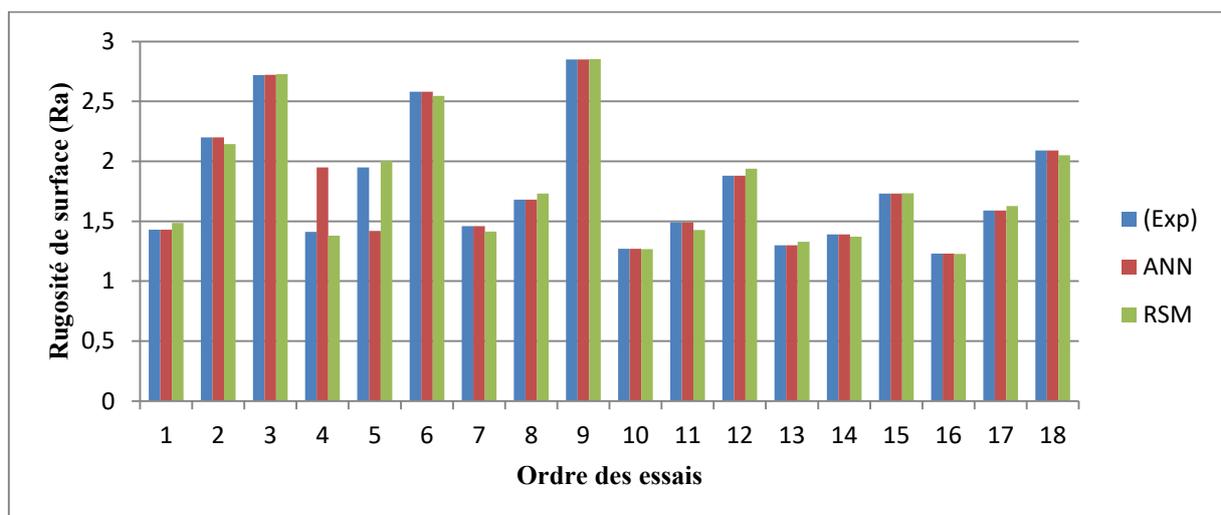


Fig. IV.30. Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par ANN et RSM pour la rugosité de surface (Ra).

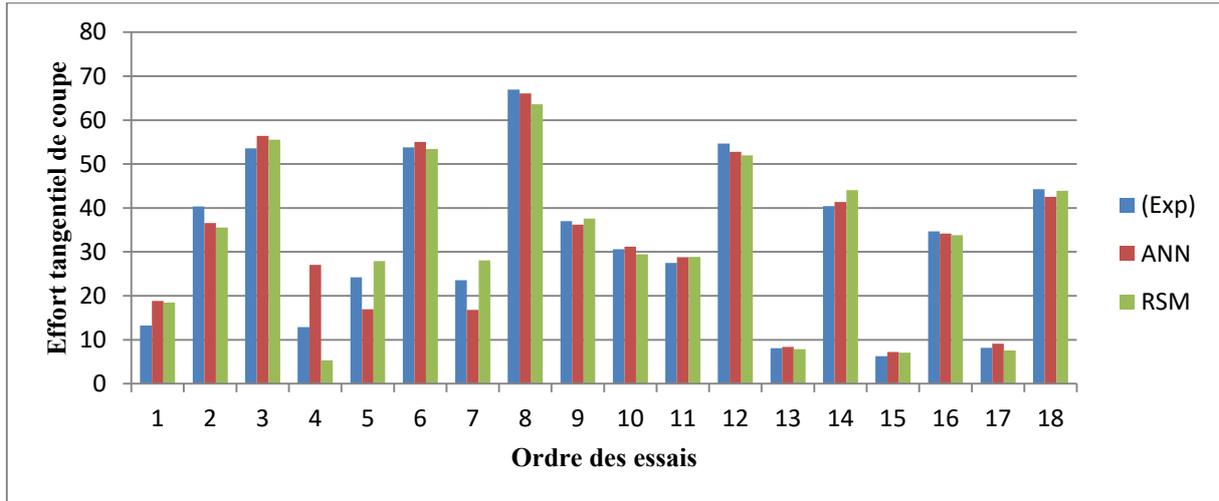
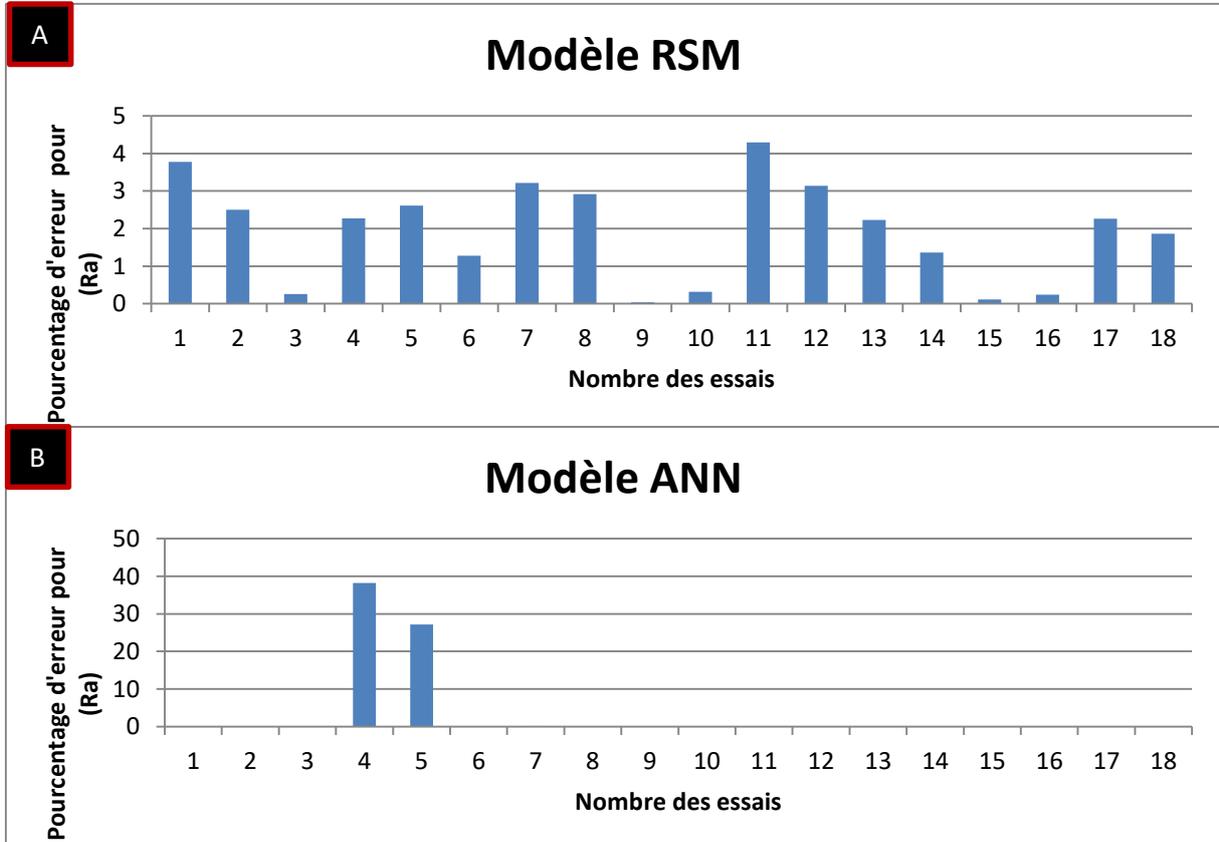


Fig. IV.31. Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par ANN et RSM pour l'effort tangentiel de coupe (F_z).

Le pourcentage d'erreurs enregistrés pendant la prédiction de la rugosité et l'effort principal par rapport aux résultats expérimentaux en utilisant les deux modèles développés ANN et RSM est exprimé dans la figure IV.32.



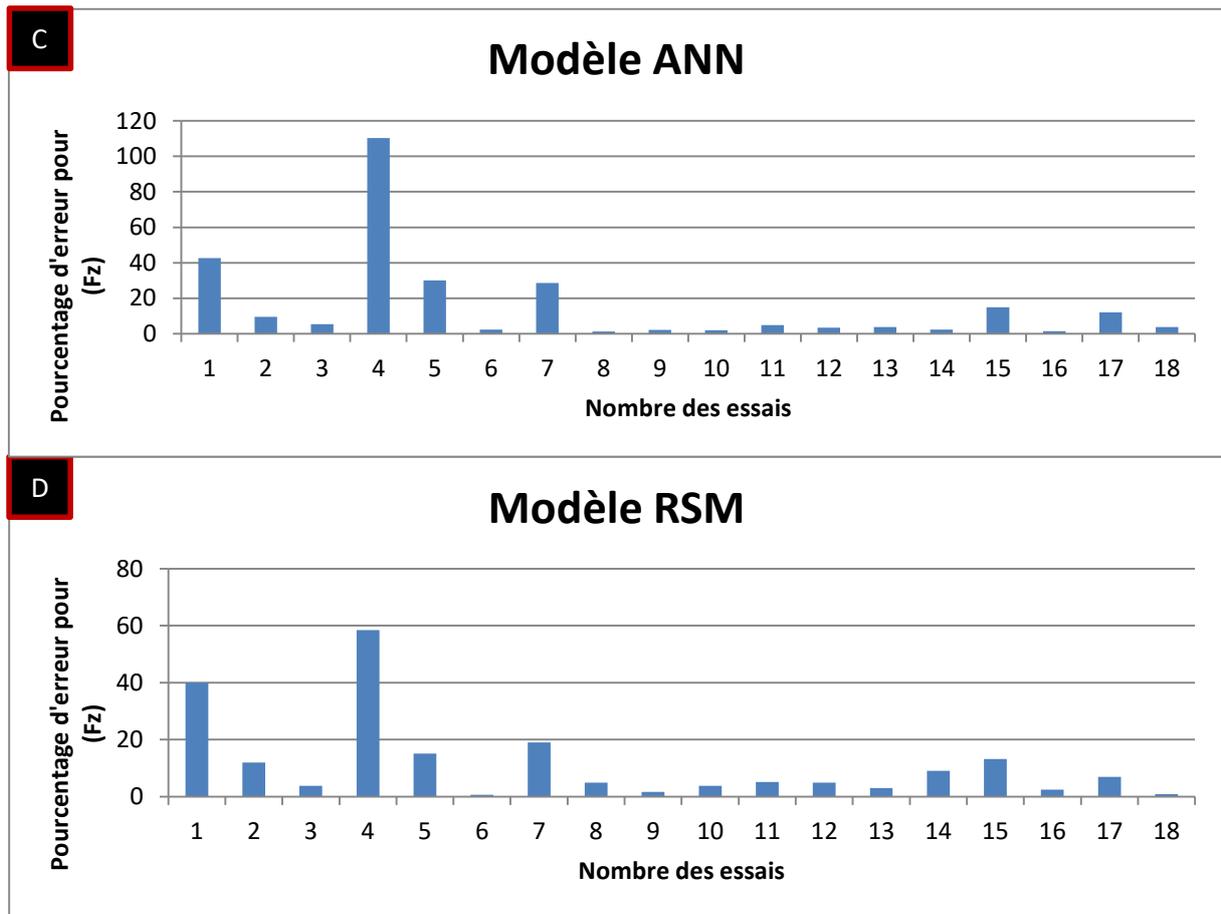


Fig. IV.32. Pourcentage de l'erreur enregistré pendant la prédiction des facteurs de réponse : (A) et (B) Modèles RSM et ANN pour Ra, (C) et (D) Modèles ANN et RSM pour Fz.

IV.7. Conclusion

Cette étude présente une méthode expérimentale pour évaluer l'usinabilité du polyamide renforcé en fibres de verre (PA66-GF30) en utilisant des outils de carbure revêtu. L'application de la méthode (RSM) et l'approche (ANN) a permis de développer des modèles mathématiques satisfaisants en termes de précision pour la prédiction et l'optimisation de la rugosité de surface, l'effort de coupe tangentiel, la puissance de coupe et le débit de copeaux enlevés en fonction de (V_c), (f), (a_p) et du rayon de bec d'outil (r).

L'analyse de variance liée à l'effet des paramètres de coupe (r , V_c , f et a_p) sur les facteurs de réponse étudiés indique que l'évolution de la rugosité de surface (R_a) est influencée principalement par l'avance et le rayon de bec avec un taux de contribution de 61.11 % et 21.59 % respectivement. Par contre, l'avance par tour est le facteur le plus influent sur l'effort de coupe (F_z) avec un pourcentage de contribution de 33.37 % suivie par le facteur (a_p). D'une part, les facteurs (V_c , f et a_p) sont les plus significatifs successivement sur l'évolution de

la puissance de coupe et le débit de copeaux enlevés. D'autres parts, la vérification expérimentale confirme la validation et l'efficacité des modèles développés. Le pourcentage d'erreur a été enregistré dans la limite de 0.19 % à 5.6 % pour la rugosité (Ra) et 4.62 à 9.89 % pour l'effort tangentiel (Fz).

La comparaison entre les modèles développés par l'approche ANN et la méthode RSM indique que les modèles obtenus par ANN étaient plus précis que les modèles obtenus par la méthode RSM et les valeurs du coefficient de corrélation ont été trouvées comme suivantes ($R^2_{ANN}(Ra) = 0.999$, $R^2_{ANN}(Fz) = 0.981$, $R^2_{RSM}(Ra) = 0.993$, $R^2_{RSM}(Fz) = 0.967$). Enfin, les résultats obtenus dans cette étude confirment clairement le comportement des phénomènes de coupe étudiés lors de l'analyse des résultats des essais paramétriques.

Chapitre V

Optimisation des conditions d'usinage du polyamide renforcé en fibres de verre (PA66-GF30)

V.1. Introduction

Parmi les principaux objectifs de développement des modèles mathématiques qui décrivent le processus d'usinage est la réalisation des différentes tâches d'optimisation. L'optimisation du processus de coupe est l'objet principal de nombreux travaux de recherche qui concernent le développement des mécanismes d'usinage, ce qui confirme l'importance technique et économique de ces travaux qui se traduisent à des intérêts réels liés à la qualité du produit usiné et le coût global d'une opération lors de l'usinage à partir du choix des conditions optimales pour atteindre les paramètres technologiques désirés selon l'objectif d'optimisation effectué. Pratiquement, il existe nombreuses méthodes et techniques d'optimisation liées à la nature et à l'objectif du problème traité. Généralement, on distingue deux catégories principales pour effectuer les différentes tâches d'optimisation à savoir l'optimisation mono-objective et multi-objective. Dans ce cadre, on trouve la méthode de Taguchi qui représente un outil idéal et puissant pour la conception d'un système à haute qualité et la réalisation des différentes tâches qui concernent les problèmes d'optimisation mono-objective. Par contre, les approches de la fonction de désirabilité (DF), des algorithmes génétiques (GA), GRAY et IHSA et autres, sont des méthodes très utilisées et adoptées pour effectuer les tâches d'optimisation multi-objectifs.

Ce chapitre s'articule sur l'optimisation mono-objective et multi-objective des conditions d'usinage pendant le tournage du polyamide renforcé en fibres de verre (PA66-GF30) en utilisant des outils en carbure revêtu. Dans la première partie, on aborde principalement l'optimisation mono-objective des conditions de coupe en utilisant la méthode de Taguchi. D'autre part, la deuxième partie de cette étude sera focalisée sur l'optimisation multi-objective du régime de coupe en utilisant deux approches (ANN-GA) et la fonction de désirabilité (DF). La tâche d'optimisation qui sera effectuée concerne quatre objectifs, le premier lié à l'objectif de la qualité (R_a minimum) qui possède une importance lors de l'usinage de finition. Le deuxième est lié à l'objectif de la productivité (MRR maximum), il possède une importance pendant les opérations de dégrossissage. Le troisième objectif concerne une combinaison entre la qualité et la productivité qui représente le cas d'une opération d'usinage où la qualité et la productivité possèdent une importance similaire. Par contre, le dernier objectif de ce travail est lié à la recherche des paramètres optimaux afin d'atteindre au minimum d'effort de coupe tangentiel, de la puissance de coupe et de la rugosité de surface avec le maximum du débit de copeaux enlevés simultanément.

V.2. Optimisation mono-objective

V.2.1. Méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi a été développée dans les années de 1950 par Genichi Taguchi pour l'objectif d'optimiser la productivité dans les systèmes industriels. C'est une méthodologie inspirée aux méthodes des plans d'expérience, elle constitue une révolution dans le développement des techniques d'optimisation. Elle est adoptée pour l'objectif de la

conception des produits qui possède une sensibilité minimale à la variation des facteurs incontrôlables. En d'autre terme, l'objectif fondamental de la méthodologie de Taguchi est de minimiser l'effet des facteurs de bruit pour optimiser les facteurs contrôlés. Le développement d'un processus (système) par la méthode de Taguchi s'articule sur trois axes, la conception de systèmes, la conception des paramètres et la conception de tolérance. La technique de Taguchi est basée sur deux notions principales focalisent sur la propriété d'orthogonalité des matrices et le rapport signal-bruit (signal to noise (S/N)), qui représentent un outil nécessaire pour l'optimisation du résultat moyen et la dispersion du résultat autour la moyenne. Ce rapport avec l'analyse de variance (ANOVA) permet de déterminer finalement les paramètres optimaux du processus étudié et l'impact de différents facteurs de ce processus sur les paramètres technologiques d'usinage contrôlés. Généralement, l'optimisation par l'approche de Taguchi repose sur les étapes suivantes selon l'exemple représenté dans la figure V.1.

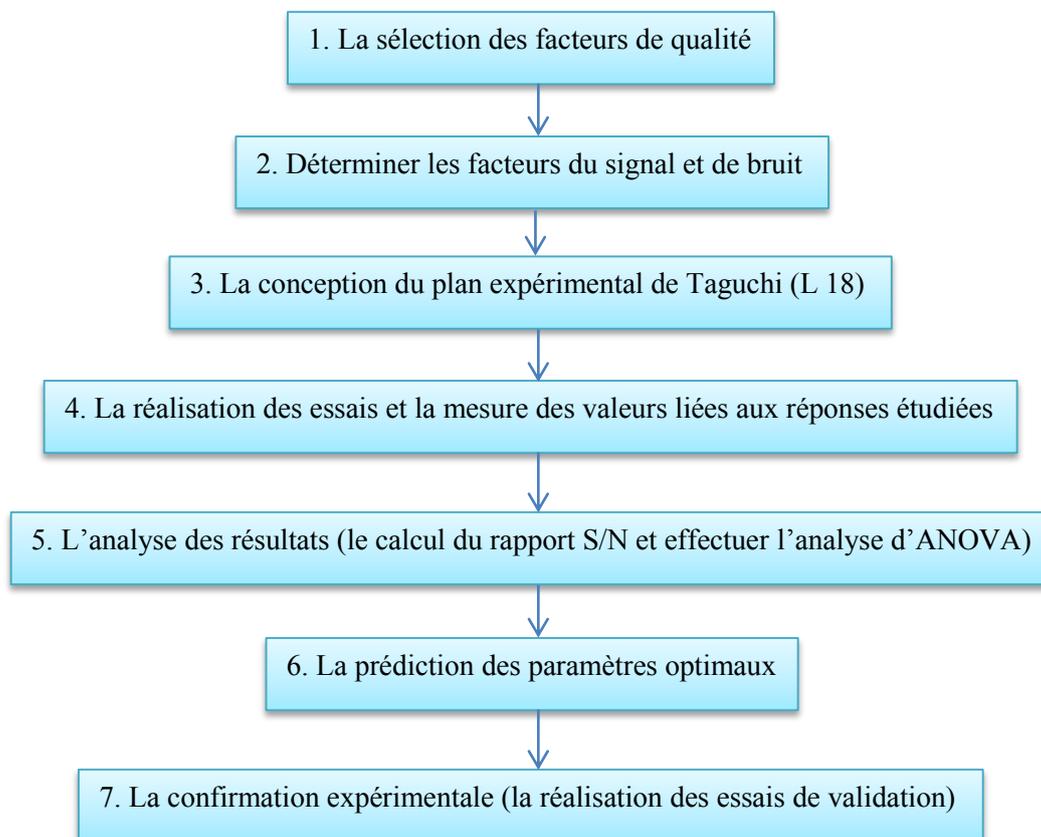


Fig. V.1. Exemple sur les étapes principales d'optimisation par la méthode de Taguchi.

V.2.2. Apport de la méthode de Taguchi

La supériorité de la technique de Taguchi par rapport aux méthodes classiques des plans d'expérience se concerne principalement à la notion de l'indicateur de performance qui appelé le rapport signal-bruit (S/N). Ce rapport permet de prendre en compte l'objectif recherché (signal) et la dispersion de cette valeur qui appelé bruit [76]. Pratiquement, les caractéristiques

du rapport S/N peuvent être classées en trois catégories selon l'objectif d'optimisation et la valeur attendue (Y) [77,78 et 41].

1. Pour atteindre une valeur cible ou nominale
2. La plus grande est le meilleur
3. La plus petite est le meilleur

Pour le premier objectif qui concerne la recherche d'une valeur nominale, le rapport signal-bruit (S/N) a été exprimé selon la formule suivante :

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} \right) \quad (V.1)$$

Où,

\bar{y} : est la moyenne arithmétique des valeurs mesurées

Concernant, le deuxième objectif qui correspond à la recherche d'une valeur minimale de la rugosité de surface (Ra) en fonction de différentes conditions de coupe, le rapport signal-bruit est exprimé comme suivant :

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (V.2)$$

Pour le troisième objectif lié à la recherche d'une valeur maximale de débit de copeaux enlevés (MRR) en fonction des conditions d'usinage étudiées, le rapport S/N est présenté dans l'équation (V.3).

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right) \quad (V.3)$$

Où,

n : est le nombre des mesures ou de répétitions

y_i : est la valeur mesurée ou observée des réponses

Dans notre cas, on s'intéresse à la deuxième et à troisième catégorie qui correspond à l'objectif de minimiser la rugosité de surface (Ra) et de maximiser le débit de copeaux enlevés (MRR). Indépendamment de type et l'objectif d'optimisation, les niveaux des paramètres du régime de coupe optimal concernent les valeurs les plus élevées du rapport signal-bruit (S/N) liées aux caractéristiques de performance désirées pour tous les paramètres étudiés.

V.2.3. Tables de Taguchi

Parmi les principaux avantages de la méthode de Taguchi est l'utilisation des matrices orthogonales fractionnaires et standard pour réaliser les expériences concernées, ces dernières présentent un outil fondamental qui permet de faciliter et de fiabiliser la tâche qui sera effectuée. La table de Taguchi est une conception spéciale des plans orthogonaux permettant d'étudier l'espace de paramètres entiers pour atteindre un nombre minimum des expériences. Les tables de Taguchi sont des plans factoriels fractionnés auquel sont associés des graphes linéaires, ce qui permet d'éviter les effets significatifs aliasés. La description du plan de Taguchi est exprimée selon la forme générale suivante.

$$L_z(x^Y)$$

Où,

Z : représente le nombre des lignes qui concerne au nombre des essais du plan à mener

X : est le nombre des niveaux des facteurs

Y : est le nombre des facteurs étudiés

x^Y : est le nombre entier des expériences du plan factoriel complète correspondant

Exemple 1 : La table $L_8 (2^7)$ comporte 8 essais pour un plan de sept facteurs à deux niveaux et 128 expériences pour un plan factoriel complet (Tableau V.1).

Tableau V.1. Exemple sur un plan factoriel incomplet de Taguchi $L_8 (2^7)$.

Nombre des essais	Nombre des facteurs et des niveaux concernés						
	Fact 1	Fact 2	Fact 3	Fact 4	Fact 5	Fact 6	Fact 7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Exemple 2 et 3 : La table $L_{18} (2^1 \times 3^3)$ représente un plan de Taguchi comporte 18 essais pour 1 facteur de deux niveaux et trois facteurs à trois niveaux (Tableau V.2). Par contre, la table $L_{16} (4^3)$ aborde un plan de Taguchi de 16 expériences pour étudier un problème de 3 facteurs à 4 niveaux (Tableau V.3).

Tableau V.2. Exemple sur un plan factoriel incomplet de Taguchi $L_{18} (2^1 \times 3^3)$.

Nombre des essais	Nombre des facteurs et des niveaux concernés			
	Fact 1	Fact 2	Fact 3	Fact 4
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Tableau V.3. Exemple sur un plan de Taguchi $L_{16} (4^3)$

Nombre des essais	Nombre des facteurs et des niveaux		
	Fact 1	Fact 2	Fact 3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

V.2.4. Optimisation des conditions d'usinage du PA66-GF30 pour l'objectif de la qualité et de la productivité

Dans cette étude, l'objectif d'optimisation des conditions de coupe lié à deux étapes, la première étape concerne un objectif de la qualité qui se traduit par la réduction de la rugosité de surface (R_a) en fonction du rayon de bec (r), de la vitesse de coupe (V_c), de l'avance (f) et de la profondeur de passe (a_p) en utilisant la méthode de Taguchi pendant le tournage du PA66-GF30. La deuxième étape liée à l'objectif de maximiser le débit de copeaux enlevés (MRR) en fonction de différentes conditions de coupe étudiées pour atteindre une productivité maximale. Pour cela, on recherche la caractéristique du rapport signal-bruit (S/N) minimum (smaller is better) pour afin de minimiser la rugosité de surface (R_a). La formule qui résume cet objectif est exprimée dans l'équation (V.2).

D'autre part, pour atteindre à l'objectif de maximiser le débit de copeaux enlevés (MRR), on recherche la caractéristique du rapport signal-bruit (S/N) maximum (larger is better), l'équation (V.3) présente l'objectif d'optimisation concerné. Pour cet objectif un plan expérimental de Taguchi L_{18} ($2^1 \times 3^3$) a été adopté selon le chapitre II, les différentes mesures liées aux paramètres technologiques étudiés et le rapport signal-bruit (S/N) qui concerne l'analyse de Taguchi en fonction des paramètres du régime de coupe concerné ont été présentées dans le tableau V.4. Les paramètres statistiques liés à la moyenne et la variance de la performance étudiée ont été calculés par la construction de différentes combinaisons des facteurs possibles. Puis, on peut déduire le rapport S/N selon l'objectif d'optimisation.

Tableau V.4. Résultats expérimentaux et analyse de Taguchi (S/N) pour R_a et MRR.

Nombre des essais	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (μm)	MRR (cm^3/min)	S/N (Ra)	S/N (MRR)
1	0,4	125	0,08	0,8	1,43	8.000	-3,10	18,06
2	0,4	125	0,12	1,6	2,2	24.00	-6,84	27,60
3	0,4	125	0,16	2,4	2,72	48.00	-8,69	33,62
4	0,4	175	0,08	0,8	1,41	11.20	-2,98	20,98
5	0,4	175	0,12	1,6	1,95	33.60	-5,80	30,52
6	0,4	175	0,16	2,4	2,58	67.20	-8,23	36,54
7	0,4	245	0,08	1,6	1,46	31.36	-3,28	29,92
8	0,4	245	0,12	2,4	1,68	70.56	-4,50	36,97
9	0,4	245	0,16	0,8	2,85	31.36	-9,09	29,92
10	0,8	125	0,08	2,4	1,27	24.00	-2,07	27,60
11	0,8	125	0,12	0,8	1,49	12.00	-3,46	21,58
12	0,8	125	0,16	1,6	1,88	32.00	-5,48	30,10
13	0,8	175	0,08	1,6	1,3	22.40	-2,27	27,00
14	0,8	175	0,12	2,4	1,39	50.40	-2,86	34,04
15	0,8	175	0,16	0,8	1,73	22.40	-4,76	27,00
16	0,8	245	0,08	2,4	1,23	47.04	-1,79	33,44
17	0,8	245	0,12	0,8	1,59	23.52	-4,02	27,42
18	0,8	245	0,16	1,6	2,09	62.72	-6,40	35,94

V.2.4.1. Analyse et discussion des résultats

V.2.4.1.1. Modélisation mathématique de la rugosité de surface (Ra) et le débit de copeau enlevé (MRR)

L'analyse statistique des résultats expérimentaux qui concernent l'évolution de la rugosité de surface et le débit de copeaux enlevés en fonction du rayon de bec (r), de la vitesse de coupe (V_c), de l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p) lors de l'usinage du PA66-GF30 a permis d'extraire les modèles suivants :

$$Ra = 1,004 + 0,829 r - 0,012 V_c + 14,611 f + 0,537 a_p + 0,003 r \times V_c - 26,5084 r \times f + 0,308 r \times a_p + 0,00002973 V_c^2 + 0,004 V_c \times f - 0,001 V_c \times a_p + 47,785 f^2 + 0,8 f \times a_p - 0,219 a_p^2 \quad (V.4)$$

$$MRR = 26,45 + 2,722 r - 0,137 V_c - 348,495 f - 13,212 a_p - 0,028 r \times V_c + 88,674 r \times f - 4,433 r \times a_p - 0,00014 V_c^2 + 1,864 V_c \times f + 0,106 V_c \times a_p - 177,578 f^2 + 170,943 f \times a_p - 0,4439 a_p^2 \quad (V.5)$$

Les valeurs du coefficient de corrélation liées aux modèles développés pour Ra et MRR ont été dans les limites de 99.39% et 99.97% respectivement, ce qui permet d'exploiter les modèles développés pour effectuer les différentes tâches de prédiction et d'optimisation des paramètres technologiques étudiés.

V.2.4.1.2. Prédiction des paramètres optimaux

Les résultats obtenus qui concernent l'optimisation de la rugosité de surface et le débit de copeaux enlevés en fonction des conditions de coupe étudiées (r , V_c , f et a_p) en utilisant la méthode de Taguchi sont présentés dans la figure V.2 (A et B). D'après la figure V.2, on peut observer que le régime de coupe optimal lié au minimum de la rugosité de surface est exprimé selon les conditions de coupe suivantes ($r=0.8$ mm, $V_c=175$ m/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.8$ mm), ce qui correspond à un rapport du signal-bruit minimum. D'autre part, le régime de coupe optimal lié au maximum de débit de copeaux enlevés (MRR) a été obtenu par les paramètres d'usinage suivants ($r=0.4$ mm, $V_c=245$ m/min, $f=0.16$ mm/tr, $a_p=2.4$ mm), ce qui correspond aux niveaux les plus élevés du rapport signal-bruit (S/N) du paramètre technologique étudié en fonction de chaque facteur d'entrée.

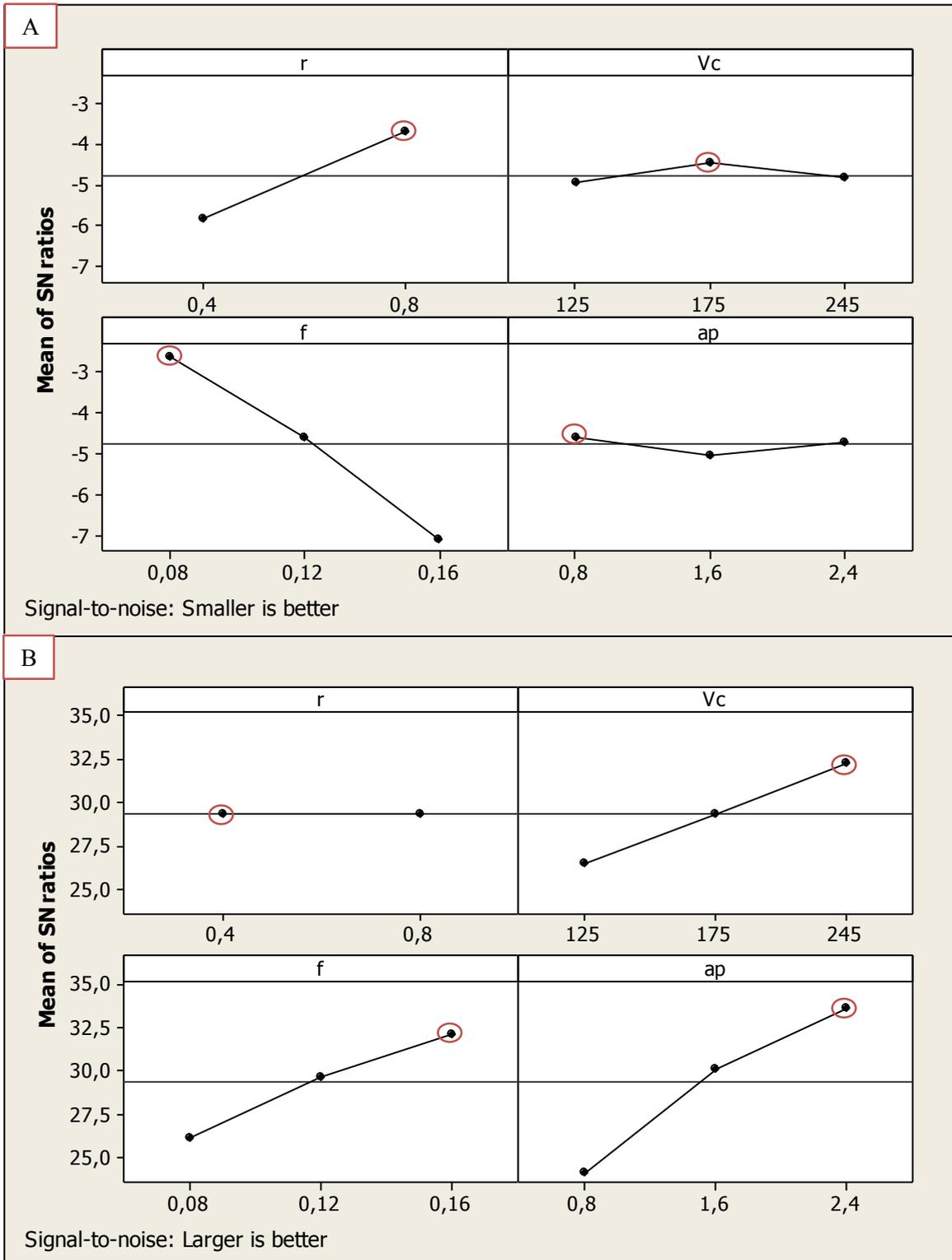


Fig. V.2. Graphique des effets principaux : **A.** pour la rugosité de surface (Ra), **B.** pour MRR.

V.3. Optimisation multi-objective

V.3.1. Approche de la fonction de désirabilité

V.3.1.1. Introduction

À base de la méthodologie de la surface de réponse (RSM), la fonction de désirabilité a été appliquée pour l'optimisation multi objectifs de différents paramètres de réponse. Cette approche est plus utilisée dans les travaux de recherche en raison de sa simplicité, de sa flexibilité et de sa compatibilité dans les logiciels d'analyse statistique pour la réalisation de différentes tâches d'optimisation [4,5]. Les valeurs de la fonction de désirabilité ont été utilisées pour évaluer les résultats d'optimisation des réponses [73-75]. La fonction de désirabilité prend sa valeur entre 0 et 1 en fonction de l'objectif d'optimisation [75]. Pour l'objectif visant à maximiser les valeurs des facteurs de réponse, la formule de désirabilité est exprimée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} D_i=0 & \text{Si } Y_i < \text{la valeur minimum} \\ 0 \leq D_i \leq 1 & \text{Pour } Y_i \text{ varie à partir du maximum au minimum} \\ D_i=1 & \text{Si } Y_i > \text{la valeur maximum} \end{array} \right. \quad (\text{V.6})$$

Pour les valeurs minimales des facteurs de réponse, la désirabilité est exprimée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} D_i=0 & \text{Si } Y_i > \text{la valeur maximum} \\ 0 \leq D_i \leq 1 & \text{Pour } Y_i \text{ varie à partir du minimum au maximum} \\ D_i=1 & \text{Si } Y_i < \text{la valeur minimum} \end{array} \right. \quad (\text{V.7})$$

Où,

Y_i : est la réponse.

D_i : est la désirabilité.

Si la réponse (Y_i) est conforme à la fonction objective, alors la désirabilité égale à 1 ($D_i=1$ le cas désiré maximum). Par contre, si la réponse se situe dans une plage inacceptable, la désirabilité est nulle ($D_i=0$), représente ainsi le cas désiré minimum.

La dernière partie se concentre sur l'objectif de l'optimisation combinée entre les deux cas précédents. L'équation qui décrit cet objectif est présentée par la formule suivante :

$$D_c = (D_1 \times D_2 \times D_3 \times \dots \times D_n)^{1/n} = (\prod_{i=1}^n D_i)^{1/n} \quad (\text{V.8})$$

Où,

D_c : est la désirabilité combinée

D_i : est la désirabilité pour chaque réponse

i : est la valeur ciblée de la réponse

n : est le nombre des réponses dans la mesure

A. Étape 1 :

On s'intéresse dans cette partie à l'optimisation du processus d'usinage pour réaliser trois objectifs :

V.3.1.2. Optimisation des conditions d'usinage pour l'objectif de la qualité

Dans cette partie, nous concentrons sur l'optimisation des conditions de coupe relatives au rayon de bec (r), à la vitesse de coupe (V_c), à l'avance par tour (f) et à la profondeur de passe (ap) dans le but de minimiser la rugosité de surface (R_a). Ce travail est axé sur l'amélioration de la qualité et vise à exploiter les résultats obtenus dans l'usinage de finition du polyamide renforcé en fibres de verre dans les limites des paramètres étudiés. Les conditions et les objectifs liés aux paramètres d'optimisation sont présentés dans le tableau V.7. Les résultats de l'optimisation qui concernant les conditions de coupe optimales pour atteindre à des valeurs minimales de rugosité de surface (R_a) sont exposés dans le tableau V.8. Les résultats obtenus montrent que la plage des paramètres optimisés qui réalisent le cas idéal correspondant à une valeur de désirabilité égale à 1 est la suivante : $r = 0.4-0.8$ mm, $V_c = 135.72-245$ m/min, $f = 0.08-0.094$ mm/tr, $ap = 2.09-2.4$ mm, $R_a = 1.106 -1.23$ μ m. Les résultats obtenus montrent clairement la possibilité d'atteindre à une bonne qualité de surface usinée.

Tableau V.5. Conditions d'optimisation pour l'objectif de la qualité.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:r	is in range	0,4	0,8	1	1	3
B:vc	is in range	125	245	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,16	1	1	3
D:ap	is in range	0,8	2,4	1	1	3
Ra	minimize	1,23	2,85	1	1	5
Fz	is in range	6,25	66,92	1	1	1
MRR	is in range	8	70,56	1	1	1
p	is in range	18,2	273,2	1	1	1

Tableau V.6. Principaux résultats d'optimisation pour l'objectif de la qualité.

Solutions										
Number	r	vc	f	ap	Ra	Fz	MRR	p	Desirability	
1	0,440	193,874	0,081	2,098	1,219	9,902	34,825	50,367	1,000	Selected
2	0,510	190,372	0,083	2,222	1,209	12,792	37,098	56,943	1,000	
3	0,744	203,613	0,080	2,189	1,219	16,158	36,341	64,452	1,000	
4	0,786	175,155	0,088	2,301	1,216	21,800	35,757	65,960	1,000	
5	0,773	188,514	0,082	2,208	1,218	16,435	34,685	57,114	1,000	
6	0,427	235,436	0,082	2,237	1,176	28,139	45,183	131,27	1,000	
7	0,789	171,197	0,081	2,238	1,212	16,456	31,364	48,505	1,000	
8	0,463	223,752	0,083	2,171	1,228	23,034	42,391	106,14	1,000	
9	0,631	217,459	0,083	2,397	1,137	23,042	44,428	102,36	1,000	
10	0,406	182,231	0,081	2,166	1,205	7,125	34,178	38,478	1,000	

La figure V.3 représente les fonctions liées aux paramètres optimisés pour les réponses étudiées. D'après la figure V.3, on peut conclure que la solution optimale pour le régime de coupe étudié a été obtenue avec les paramètres de coupe suivants : ($r=0.44$ mm, $V_c=193.87$ m/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=2.09$ mm) pour une valeur de la rugosité de surface optimisée ($R_a=1.21$ μ m).

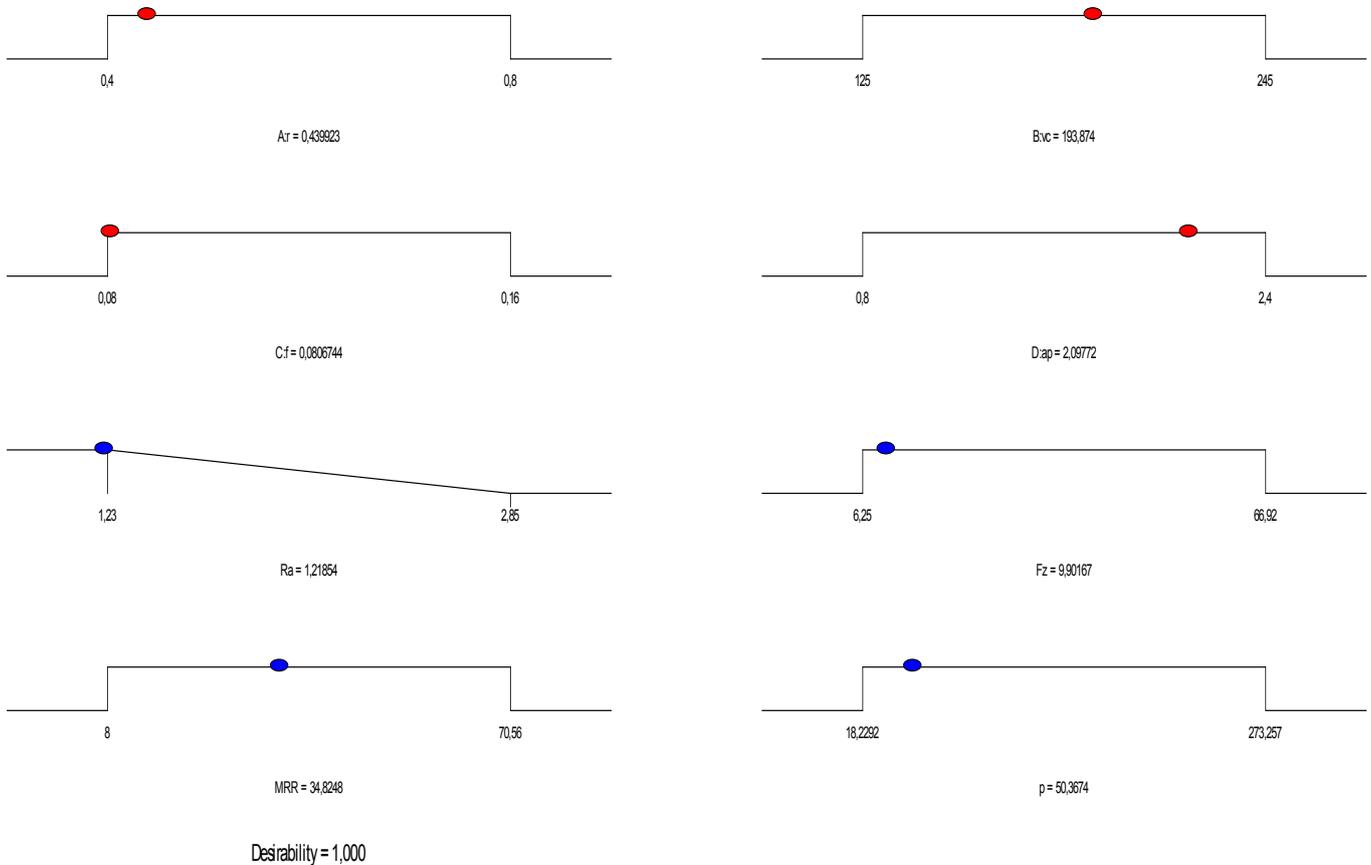


Fig. V.3. Solution optimale liée au régime de coupe étudié pour l'objectif de la qualité.

Pour mieux comprendre la plage de désirabilité en fonction des effets d'interaction, on présente la figure V.4 qui est liée aux surfaces 3D et les contours de la fonction de désirabilité en fonction de la variation des facteurs les plus influents sur la qualité de surface (r et f) tout en maintenant constantes les valeurs de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe ($V_c=193.87$ m/min et $a_p=2.097$ mm) respectivement. D'après la figure V.4, en général, on peut observer que les meilleures valeurs de désirabilité ($D_f=0.8-1$) sont associées à des faibles valeurs de l'avance par tour ($f=0.08-0.133$ mm/tr) indépendamment de la valeur sélectionnée du rayon de bec. La plage de prédiction de désirabilité pour l'objectif de la qualité liée à la variation de la rugosité de surface en fonction du rayon de bec et de l'avance par tour est présentée dans la figure V.5.

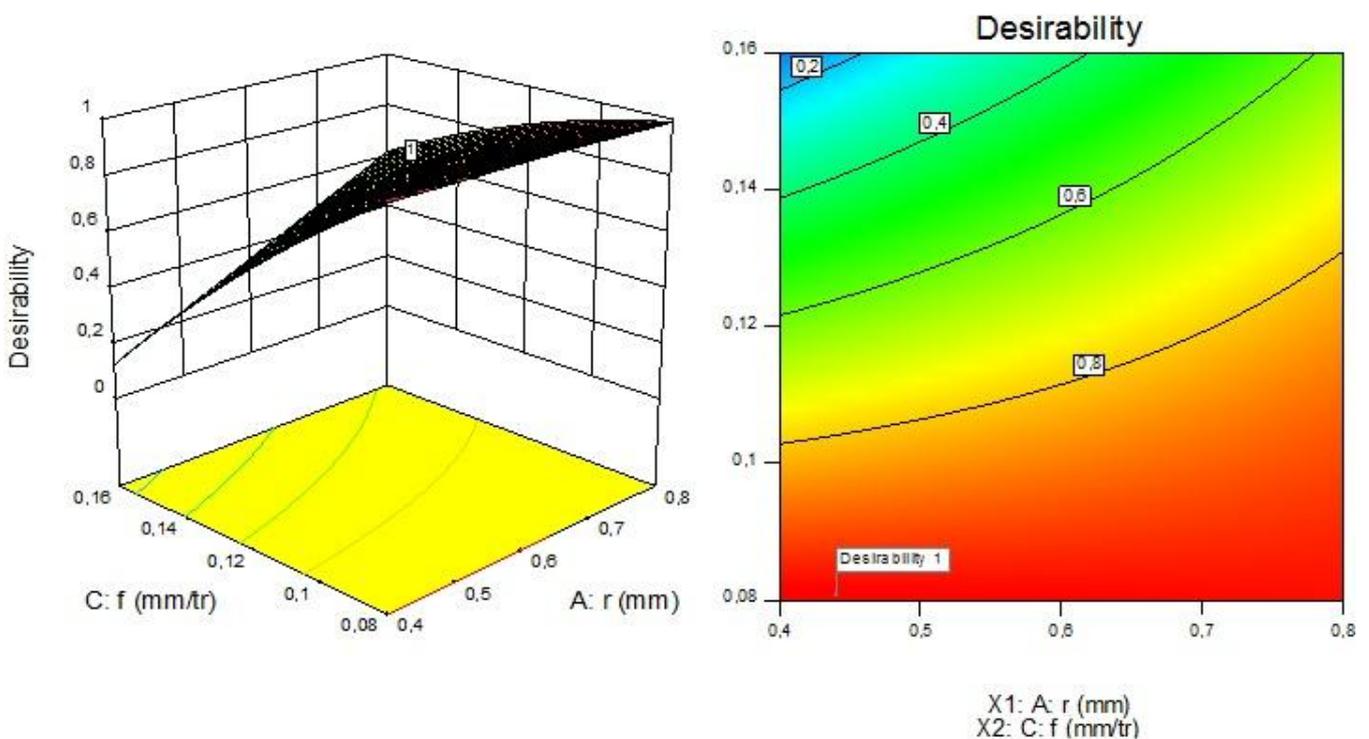


Fig. V.4. Évolution de désirabilité en fonction du rayon de bec et de l'avance par tour pour l'objectif de la qualité.

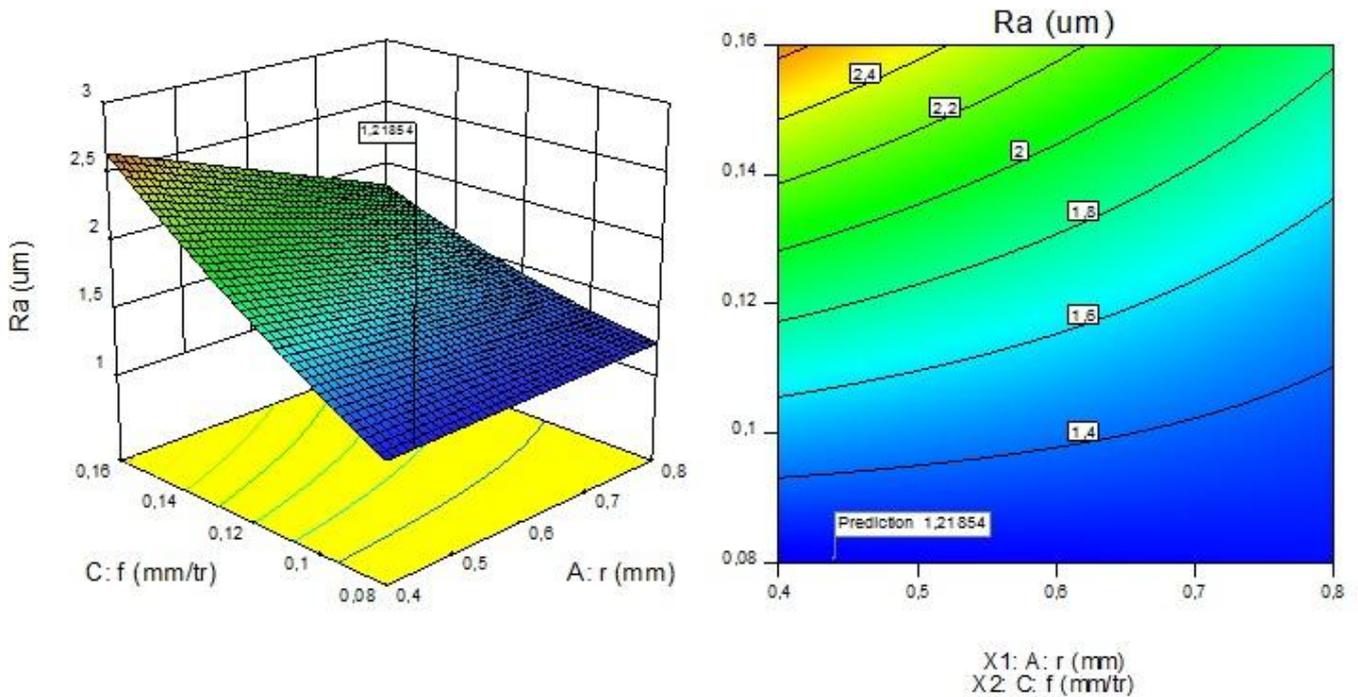


Fig. V.5. Plage de prédiction de la rugosité de surface optimisée en fonction du rayon de bec et de l'avance par tour.

V.3.1.3. Optimisation des conditions d'usinage pour l'objectif de la productivité

Dans ce cas, nous recherchons à optimiser des conditions de coupe (r , V_c , f et a_p) afin de maximiser le débit de copeaux enlevés (MRR). Ce qui possède une importance lors des opérations d'ébauche pendant l'usinage du PA66-GF30. Les différents paramètres d'optimisation associés à cet objectif sont répertoriés dans le tableau V.9. Les principaux résultats de l'optimisation qui concernent le degré de désirabilité obtenue et les paramètres optimaux associés pour maximiser la productivité, sont présentés dans le tableau V.10.

Tableau V.7. Conditions d'optimisation pour l'objectif de la productivité.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:r	is in range	0,4	0,80	1	1	3
B:vc	is in range	125	245	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,16	1	1	3
D:ap	is in range	0,8	2,40	1	1	3
Ra	is in range	1,23	2,85	1	1	1
Fz	is in range	6,25	66,92	1	1	1
MRR	maximize	8	70,56	1	1	5
p	is in range	18,22	273,2	1	1	1

Tableau V.8. Principaux résultats d'optimisation pour l'objectif de la productivité

Solutions										
Number	r	Vc	f	ap	Ra	Fz	MRR	p	Desirability	
1	0,540	244,582	0,130	2,342	1,813	66,305	73,287	261,159	1,000	Selected
2	0,625	215,622	0,158	2,245	2,128	60,442	75,012	219,918	1,000	
3	0,400	245,000	0,120	2,400	1,730	63,617	70,696	258,840	1,000	
4	0,599	232,451	0,132	2,382	1,739	60,956	71,978	234,307	1,000	
5	0,688	220,223	0,141	2,333	1,756	58,240	71,308	213,058	1,000	
6	0,712	196,255	0,157	2,382	1,883	59,203	72,475	195,943	1,000	
7	0,427	212,712	0,158	2,359	2,430	62,986	77,523	233,222	1,000	
8	0,775	230,007	0,137	2,367	1,614	61,141	73,277	226,909	1,000	
9	0,414	223,065	0,160	2,158	2,596	63,984	75,117	243,133	1,000	
10	0,713	200,890	0,156	2,303	1,897	57,314	71,116	193,675	1,000	

Les fonctions liées aux conditions de coupe optimales pour la réponse désirée ont été exprimées dans la figure V.6. Les résultats obtenus indiquent que le régime de coupe optimal dans les limites des paramètres étudiés est le suivant : (r=0.54 mm, Vc=244.58 m/min, f=0.13 mm/tr, ap=2.34 mm) pour une valeur du débit de copeaux enlevés (MRR=73.28 cm³/min).

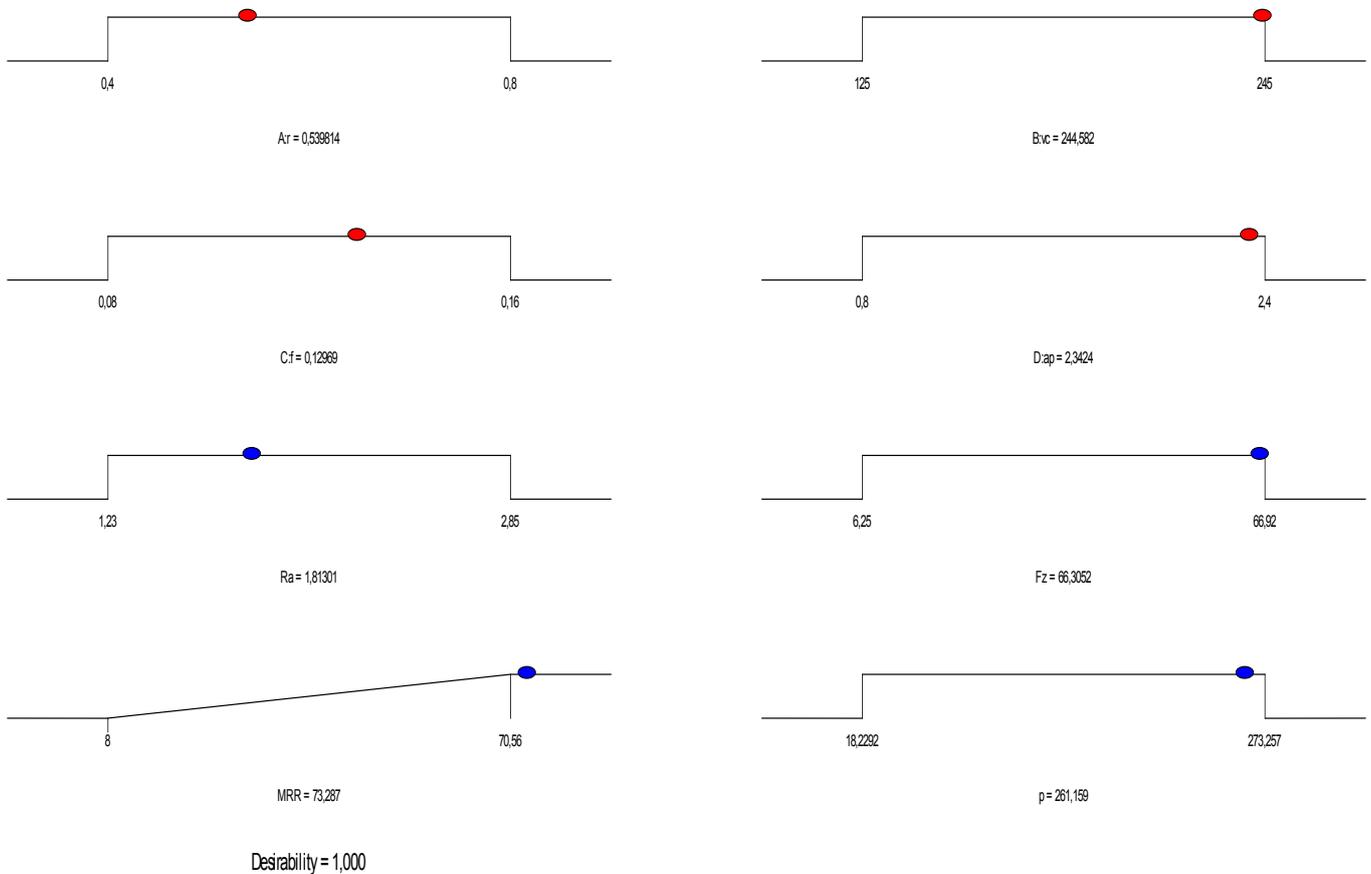


Fig.V.6. Solution optimale liée au régime de coupe dans le but d'optimiser la productivité

Pour une analyse approfondie de la variation de désirabilité en fonction des facteurs les plus significatifs (a_p et V_c), en maintenant les valeurs de r et f constantes ($r=0.539$ et $f=0.129$), nous examinons les contours et les surfaces 3D représentant l'évolution de désirabilité en fonction des facteurs étudiés, comme illustrés dans la figure V.7.A. L'analyse de l'effet d'interaction entre la profondeur de passe et la vitesse de coupe sur la désirabilité montre que les valeurs de désirabilité les plus élevées ($D_f=0.8-1$) sont associées aux niveaux les plus élevés de la profondeur de passe ($a_p=1.9-2.4$ mm) et la vitesse de coupe ($V_c=185-245$ m/min). La figure V.7.B illustre les plages des valeurs désirées du débit de copeau enlevé en fonction de la profondeur de passe et de la vitesse de coupe pour l'objectif de la productivité.

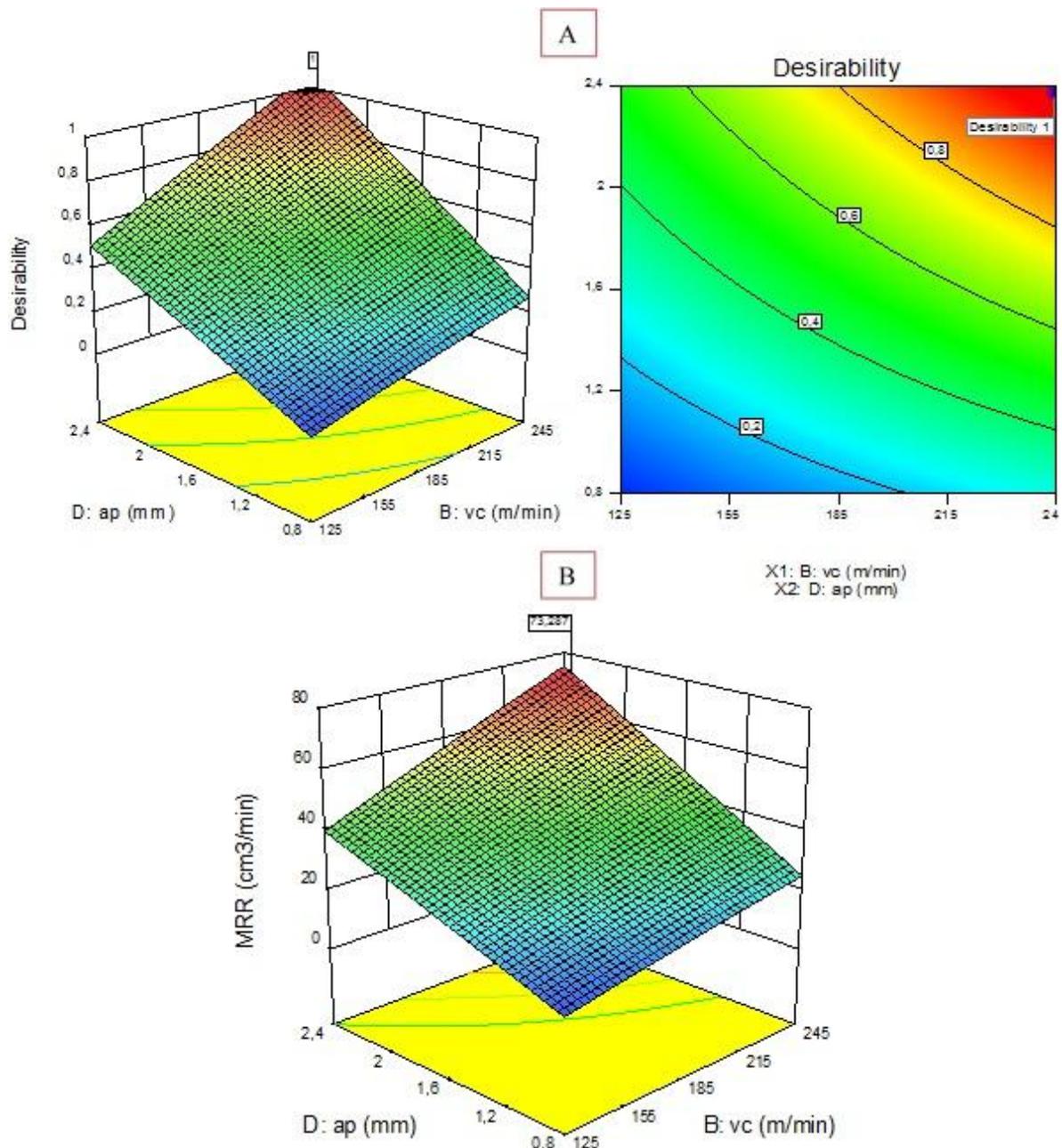


Fig. V.7. Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur l'évolution de : (A. la désirabilité, B. le débit de copeau enlevé) pour l'objectif de la productivité.

V.3.1.4. Optimisation des conditions d'usinage pour l'objectif combiné

La troisième partie se concentre sur l'optimisation des conditions d'usinage du PA66-GF30 en mettant l'accent sur l'objectif combiné qui vise à atteindre simultanément des valeurs minimales de la rugosité de surface (R_a) et des valeurs maximales du débit de copeaux enlevés (MRR) simultanément. Cette approche est particulièrement importante pendant les opérations d'usinage du polyamide renforcé en fibres de verre où le degré de l'importance de la qualité et de la productivité est moyen. Le tableau V.11 présente les conditions et l'objectif d'optimisation liés à cet objectif. Les résultats d'optimisation de la rugosité de surface et du débit de copeaux enlevés en fonction des conditions de coupe étudiées (r , V_c , f et a_p) sont exposés dans le tableau V.12.

Tableau V.9. Conditions d'optimisation pour l'objectif combiné

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:r	is in range	0,4	0,8	1	1	3
B:vc	is in range	125	245	1	1	3
C:f	is in range	0,08	0,16	1	1	3
D:ap	is in range	0,8	2,4	1	1	3
Ra	minimize	1,23	2,85	1	1	5
Fz	is in range	6,25	66,92	1	1	1
MRR	maximize	8	70,56	1	1	5
p	is in range	18,2	273,2	1	1	1

Tableau V.10. Principaux résultats d'optimisation pour l'objectif combiné

Number	Solutions									Desirability	Selected
	r	Vc	f	ap	Ra	Fz	MRR	p			
1	0,800	244,992	0,123	2,400	1,488	61,895	70,560	236,275	0,917		
2	0,800	244,539	0,123	2,400	1,488	61,777	70,560	235,657	0,917		
3	0,800	243,775	0,123	2,400	1,488	61,581	70,560	234,621	0,917		
4	0,800	243,082	0,124	2,400	1,488	61,407	70,560	233,692	0,917		
5	0,800	242,545	0,124	2,400	1,489	61,276	70,560	232,981	0,917		
6	0,800	245,000	0,122	2,400	1,484	61,661	70,314	235,422	0,916		
7	0,800	241,286	0,125	2,400	1,490	60,979	70,561	231,336	0,916		
8	0,796	244,997	0,123	2,400	1,491	61,916	70,560	236,523	0,916		
9	0,800	239,403	0,126	2,400	1,491	60,556	70,560	228,928	0,916		
10	0,800	238,318	0,126	2,400	1,493	60,341	70,576	227,626	0,915		

La figure V.8 présente la solution optimale concernant les facteurs de réponse souhaités en fonction des conditions de coupe étudiées. Les résultats montrent que les paramètres optimaux ont été obtenus comme suit : ($r=0.8$ mm, $V_c=245$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=2.4$ mm) pour des valeurs de la rugosité de surface et le débit de copeaux enlevés ($R_a = 1.48$ et $MRR=70.56$ cm³/min).

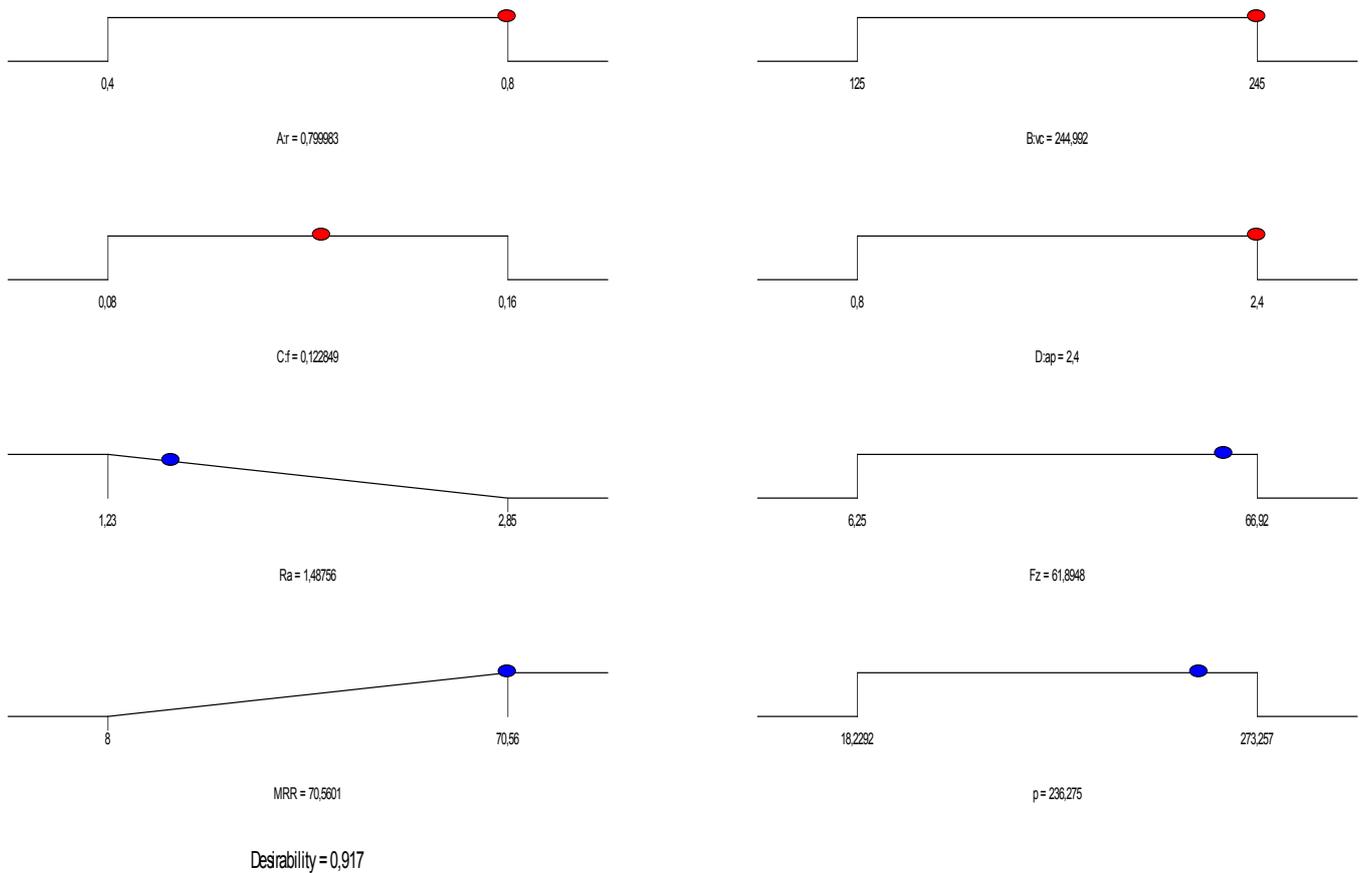


Fig. V.8. Solution optimale liée au régime de coupe étudié pour l'objectif combiné.

La figure V.9 illustre des barres de désirabilité analogique pour les facteurs de réponse optimisés. D'après cette figure, on peut conclure que le meilleur résultat de désirabilité a été obtenu pour le débit de copeaux enlevés avec une valeur de désirabilité égale à 1 ($D_{f1}=1$, le cas idéal). Par contre, la valeur de désirabilité liée à la rugosité de surface a été obtenue dans la limite de 0.84 ($D_{f2}=0.841$). En ce qui concerne la désirabilité combinée, une valeur de désirabilité de 0.917 a été atteinte ($D_c=0.917$). En général, on peut conclure que la plage de désirabilité enregistrée a été entre (0.8 et 1). Ce qui confirme l'importance des résultats d'optimisation et la possibilité d'exploitation ces résultats dans les limites des paramètres étudiés.

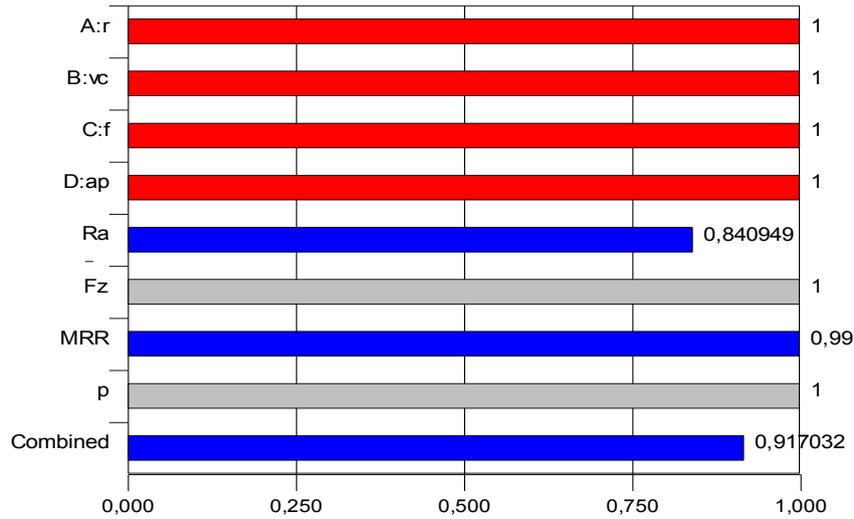
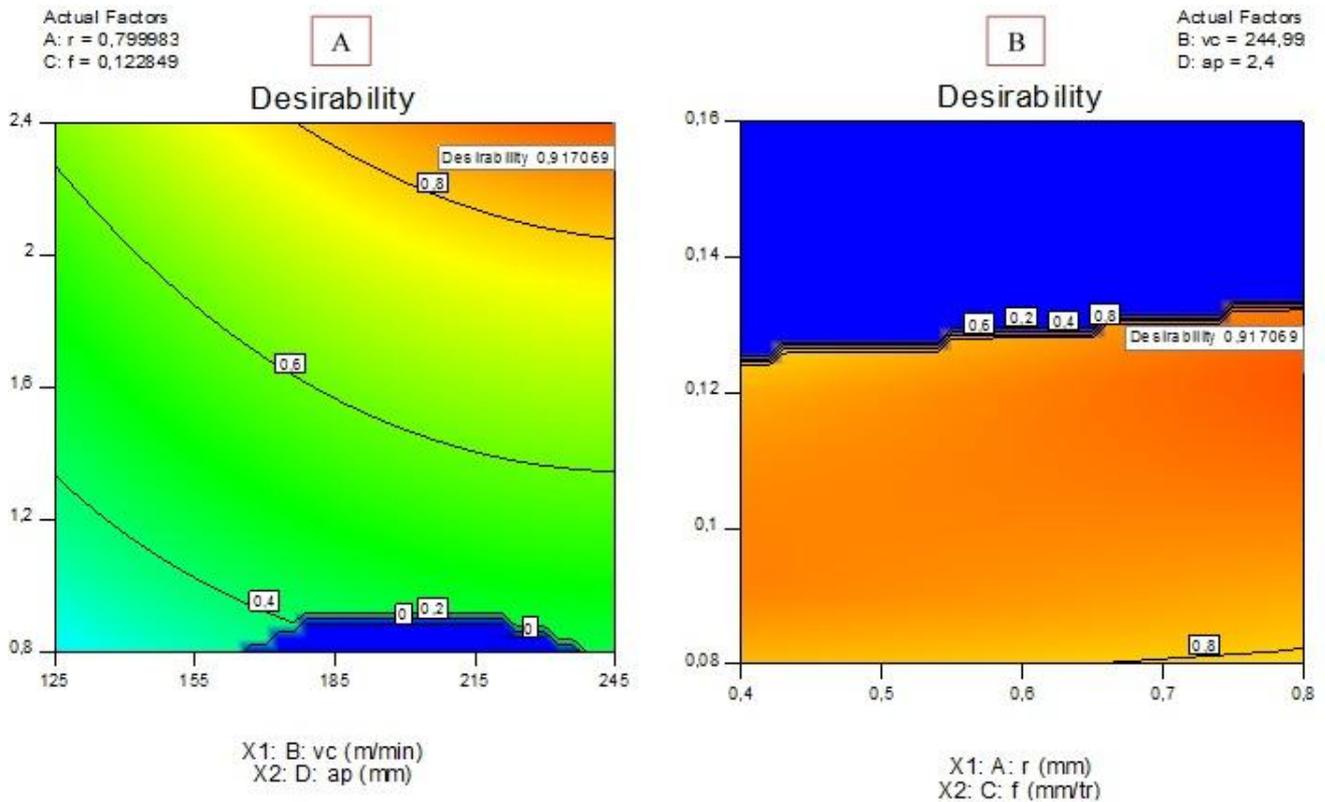


Fig. V.9. Barres de désirabilité analogique pour l'objectif combiné.

La figure V.10 (A, B, C, D) illustre les contours et les surfaces 3D liés à l'évolution de désirabilité combinée en fonction des facteurs d'interaction (ap et Vc), (r et f), (f et ap) et (Vc et f) respectivement. La plage de prédiction de désirabilité combinée liée à la variation de la rugosité de surface en fonction du rayon de bec et l'avance par tour a été présentée dans la figure V.11. La figure V.12 présente l'intervalle de désirabilité combinée concernant l'évolution de débit de copeaux enlevés en fonction des facteurs d'interaction (Vc et ap).



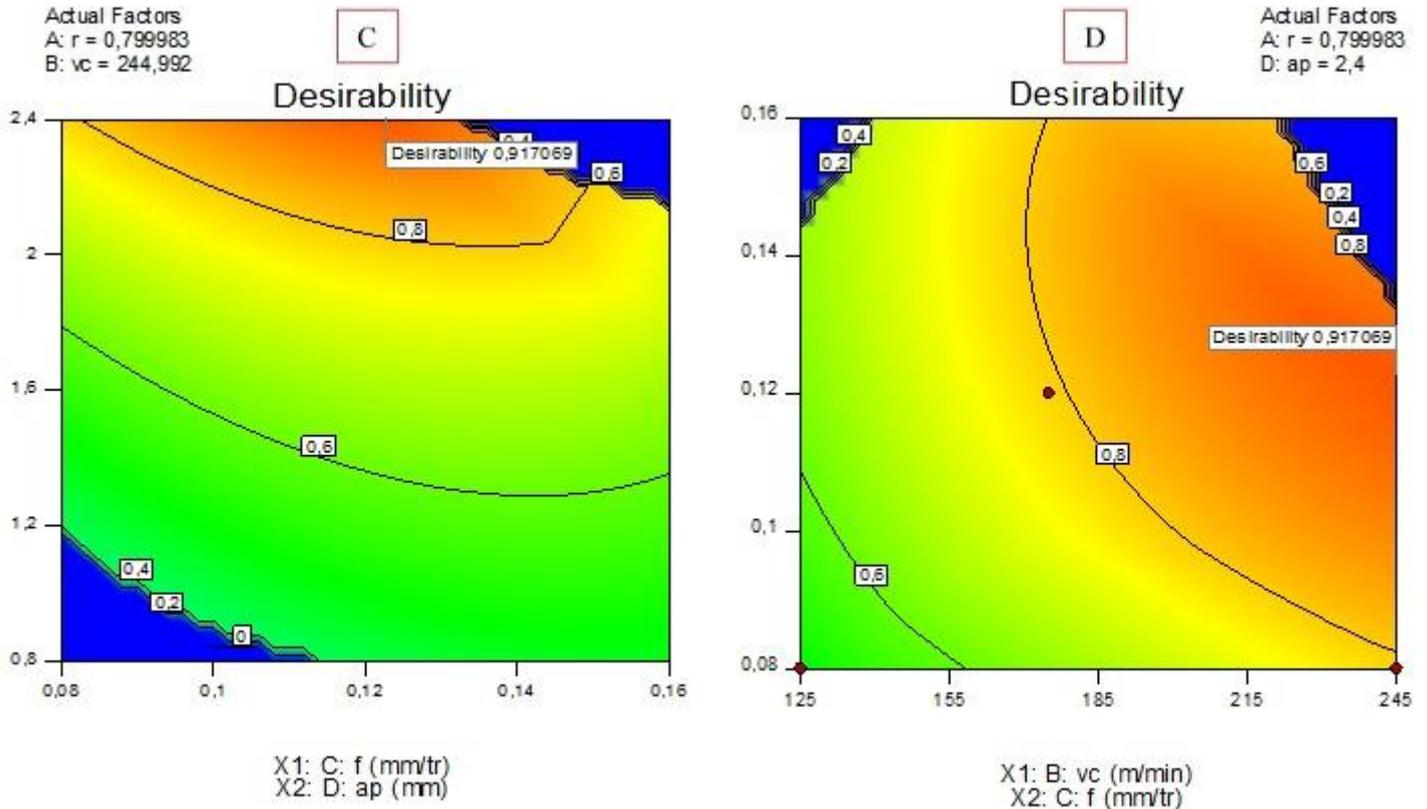


Fig. V.10. Évolution de désirabilité combinée en fonction des effets d'interaction : A. Vc et ap , B. r et f , C. f et ap , D. Vc et f .

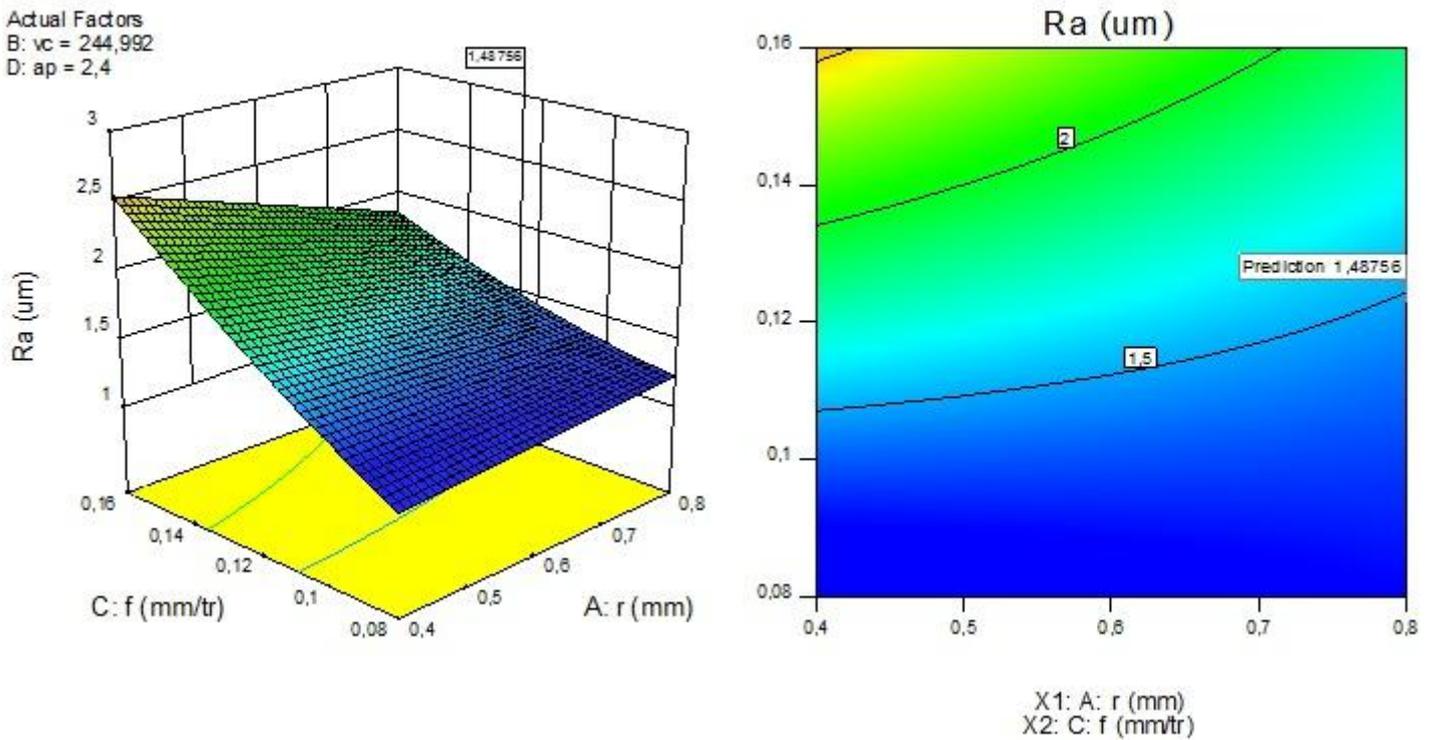


Fig. V.11. Plage de prédiction de désirabilité combinée liée à la variation de la rugosité de surface en fonction de (r et f).

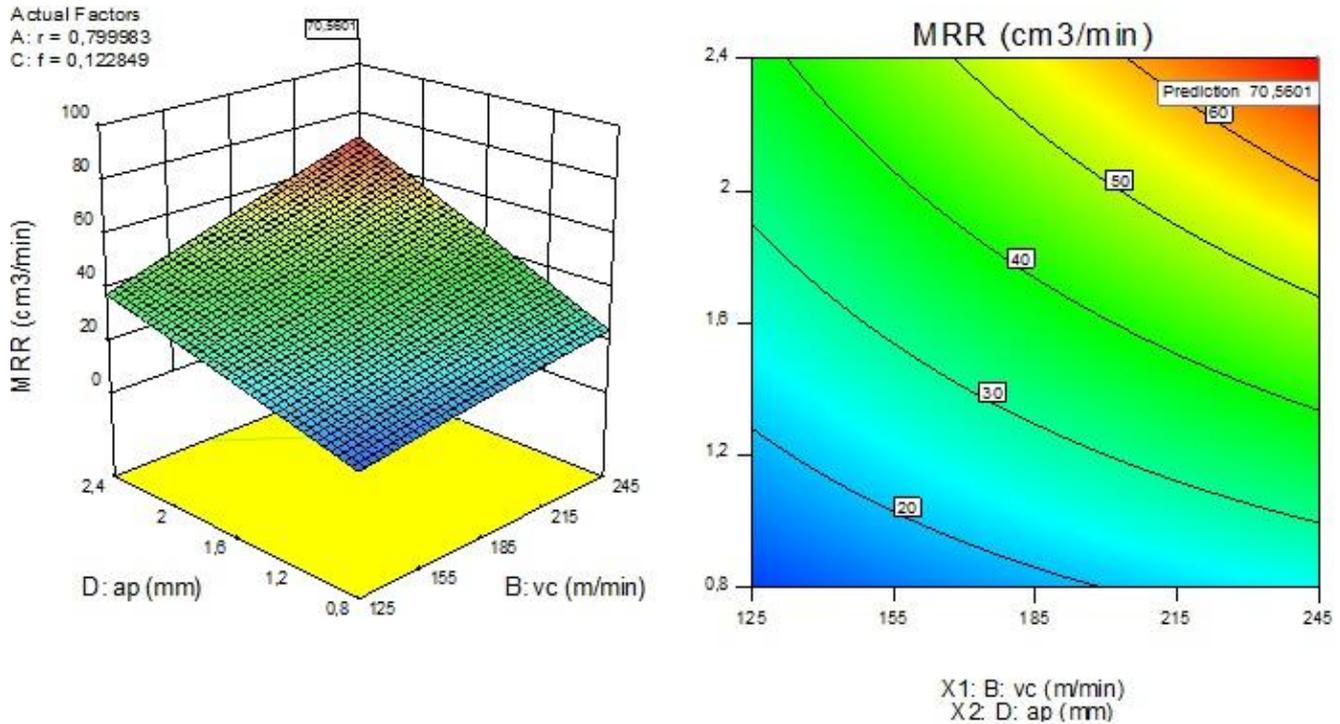


Fig. V.12. Plage de prédiction de désirabilité combinée liée à l'évolution du débit de copeaux enlevés en fonction des facteurs d'interaction (V_c et a_p).

B. Étape 2 :

V.3.1.5. Optimisation du processus d'usinage pour les phénomènes de coupe étudiés (F_z , R_a , p et MRR).

Dans la partie précédente, on a traité un problème d'optimisation visant à améliorer la qualité de surface usinée et la productivité sans prendre en compte des autres facteurs de réponse. Afin de compléter les différents cas possibles liés à l'optimisation du processus de coupe pendant l'usinage du PA66-GF30, nous nous concentrons dans cette partie sur l'objectif de minimiser de la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe principal (F_z), la puissance de coupe (P) et maximiser le débit de copeaux enlevés (MRR). Pour cela, nous utilisons la formule de désirabilité telle qu'exprimée selon les équations (V.6), (V.7) et (V.8) de la première partie d'optimisation.

L'optimisation des surfaces de réponse permet de déterminer les paramètres d'usinage optimaux afin d'atteindre à des paramètres technologiques désirés pendant le processus de tournage. Les objectifs et les paramètres d'optimisation sont présentés dans le tableau V.13.

Tableau V.11. Paramètres d'optimisation

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A: r (mm)	Is in range	0.40	0.80	1	1	3
B: V_c (m/min)	Is in range	125	245	1	1	3
C: f (mm/rev)	Is in range	0.08	0.16	1	1	3
D: ap (mm)	Is in range	0.80	2.40	1	1	3
Ra (μm)	Minimize	1.23	2.85	1	1	5
F_z (N)	Minimize	6.25	66.92	1	1	5
MRR (cm^3/min)	Maximize	8.00	70.56	1	1	5
P (W)	Minimize	18.23	273.2	1	1	5

Le tableau V.14 illustre les résultats de l'optimisation pour les paramètres d'entrée du processus et les facteurs de réponse. D'après les résultats obtenus, on observe que les valeurs optimisées des réponses (Ra , F_z , P et MRR) se situent dans les intervalles de (1.049-1.845) μm , (6.248-17.727) N, (18.231-71.040) W et (24.885-41.943) cm^3/min respectivement. Les valeurs correspondantes pour les conditions de coupe optimisées se situent dans les intervalles de (0.4-0.8) mm, (147.211-216.975) m/min, (0.08-0.16) mm/tr et (0.867-2.4) mm pour le rayon de bec, la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe respectivement.

La figure V.13 illustre les barres de désirabilité pour chaque facteur de réponse en fonction de tous les paramètres combinés. Les résultats indiquent que la désirabilité appropriée ($Di=1$) est associée à la rugosité de surface et à l'effort tangentiel de coupe. Par contre, la désirabilité concernant le débit de copeaux enlevés (MRR) est la plus basse par rapport aux autres paramètres. La désirabilité combinée de tous les facteurs étudiés a été trouvée égale à 0.8119 ($Di=0.8119$).

Les résultats d'optimisation présentés dans le tableau V.14 et la figure V.14 montrent que les valeurs minimales de rugosité de surface, d'effort tangentiel de coupe, de la puissance de coupe et la valeur maximale de débit de copeaux enlevés liées au régime de coupe optimal sont les suivantes ($Ra=1.075$ μm , $F_z=6.248$ N, $P=42.736$ W et $MRR=38.078$ cm^3/min). Ces résultats ont été obtenus en parallèle avec des paramètres de coupe suivantes, ($r=0.4$ mm, $V_c=184.313$ m/min, $f=0.08$ mm/tr et $ap=2.4$ mm).

Tableau V.12. Résultats d'optimisation

Solutions										
Number	r (mm)	V_c (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	Ra (μm)	Fz (N)	MRR (mm/cm ³)	P (W)	Desirability	
1	0.400	184.313	0.080	2.400	1.075	6.248	38.087	42.736	0.810	Selected
2	0.401	177.011	0.082	2.400	1.113	6.252	37.214	37.619	0.810	
3	0.422	181.233	0.080	2.400	1.084	6.250	37.324	39.960	0.809	
4	0.400	190.892	0.080	2.396	1.066	7.869	39.359	51.598	0.807	
5	0.400	183.119	0.080	2.303	1.128	6.250	36.290	39.743	0.802	
6	0.400	180.551	0.085	2.398	1.157	9.762	39.331	49.521	0.802	
7	0.462	178.359	0.080	2.400	1.096	6.995	36.501	38.858	0.802	
8	0.400	177.079	0.086	2.400	1.177	9.893	38.973	47.387	0.801	
9	0.466	172.207	0.080	2.400	1.110	6.392	35.216	33.050	0.800	

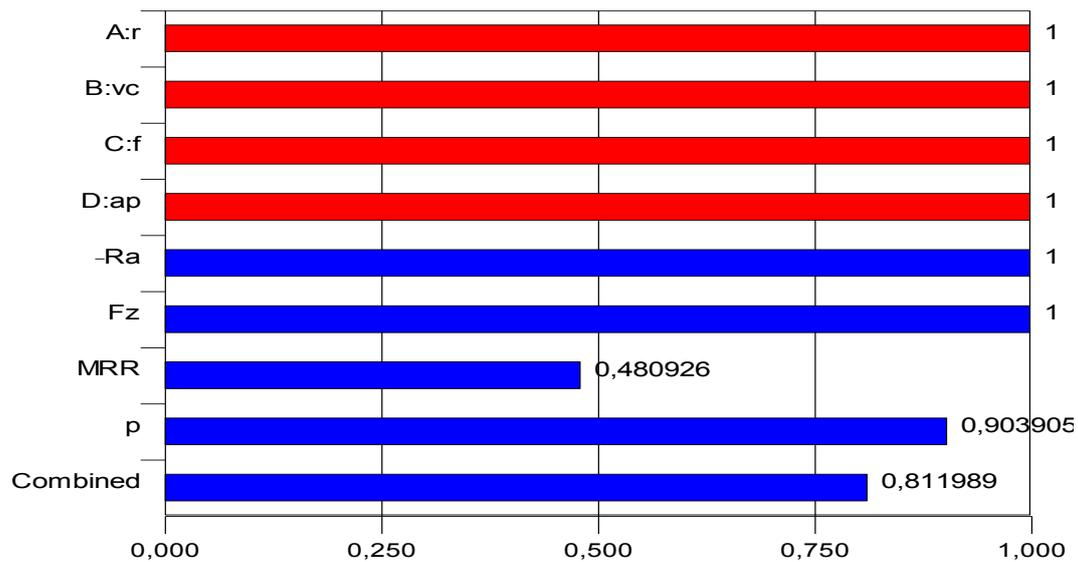


Fig. V.13. Barres de désirabilité pour évaluer l'optimisation des réponses.

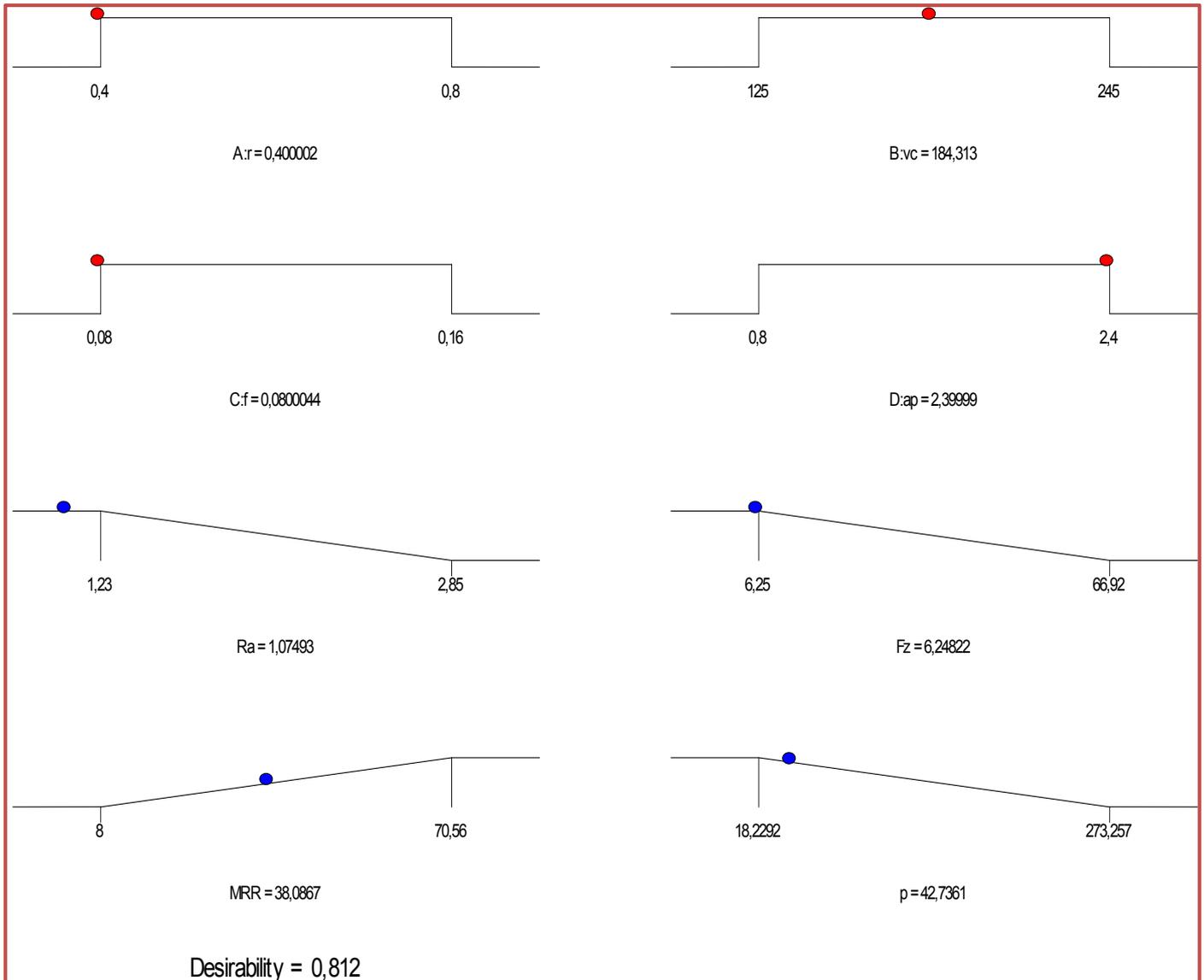
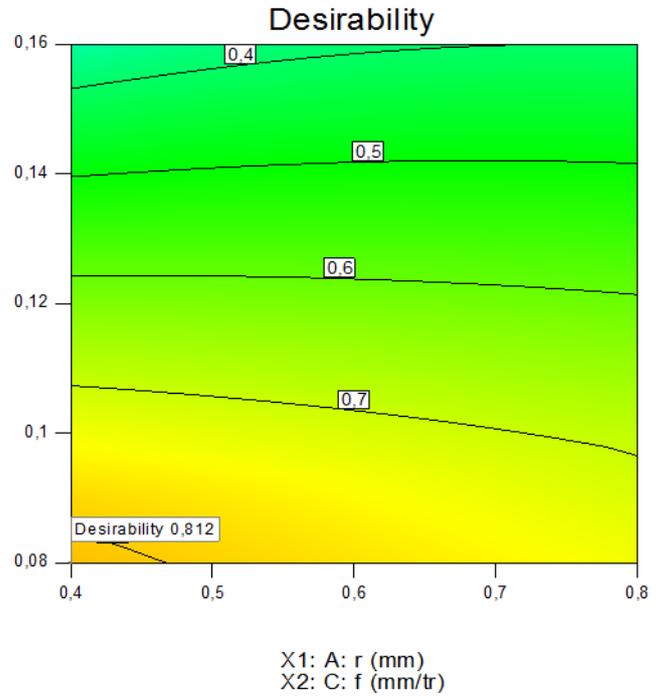
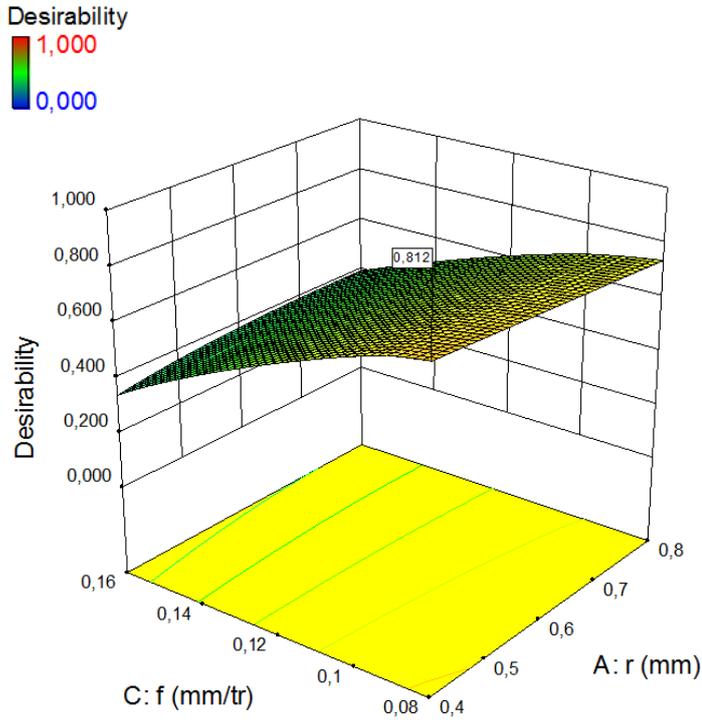


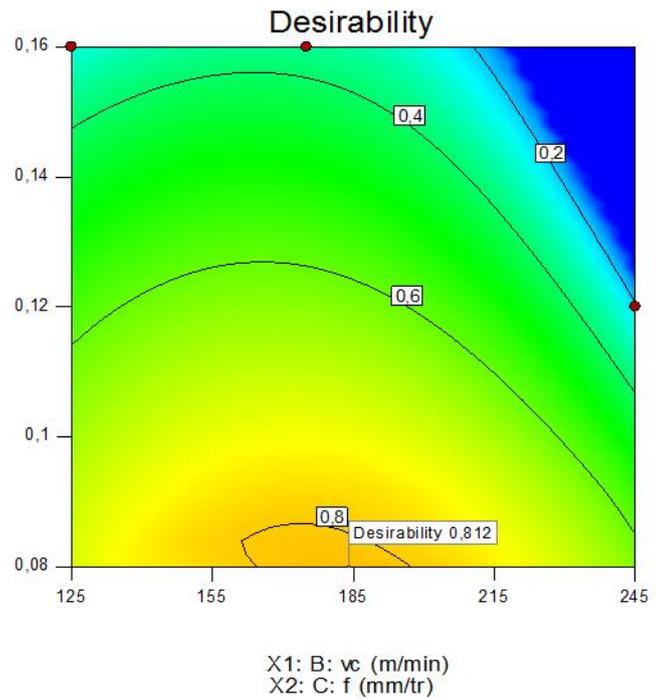
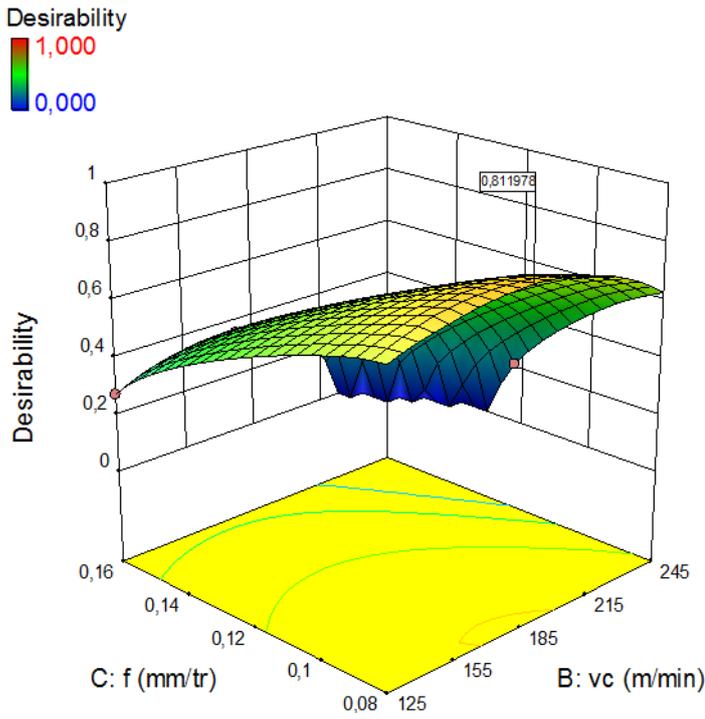
Fig. V.14. Graphique des résultats d'optimisation combinée.

La figure V.15 présente les graphes de désirabilité 3D et les contours en fonction du (rayon de bec-avance par tour, vitesse de coupe-avance par tour, vitesse de coupe-profondeur de passe et avance par tour-profondeur de passe), en maintenant les autres paramètres constants pour chaque cas. Elle montre la solution optimale du régime de coupe relative aux facteurs de réponse désirés en fonction de différentes conditions de coupe (r , V_c , f et ap).

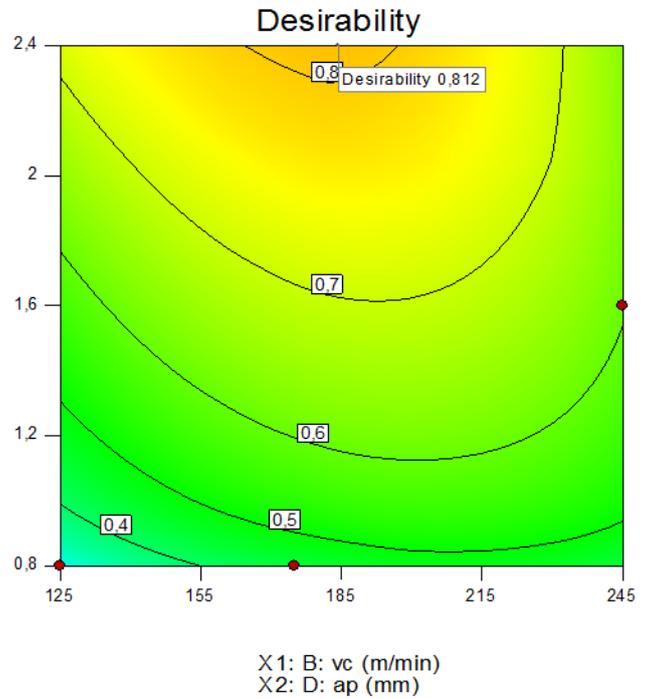
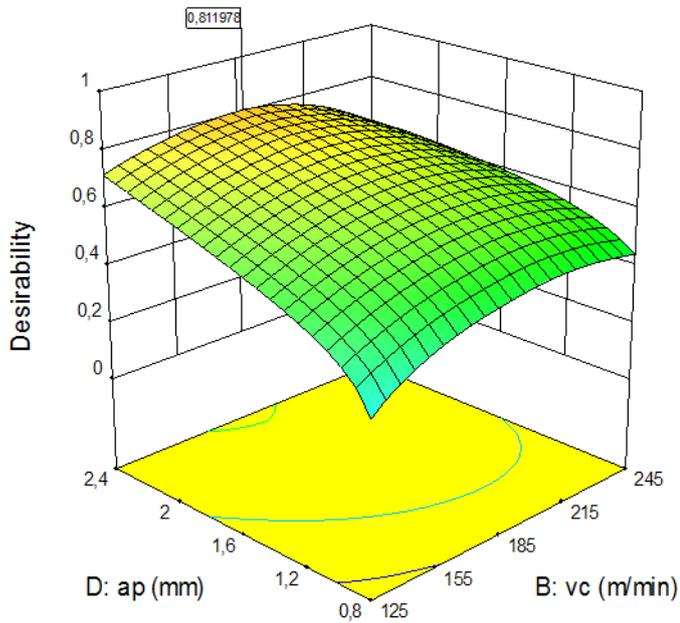
A



B



C



D

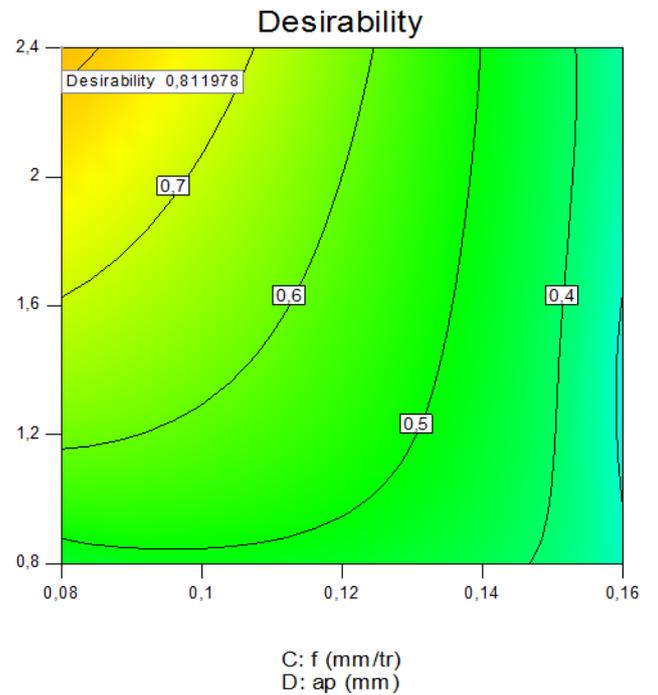
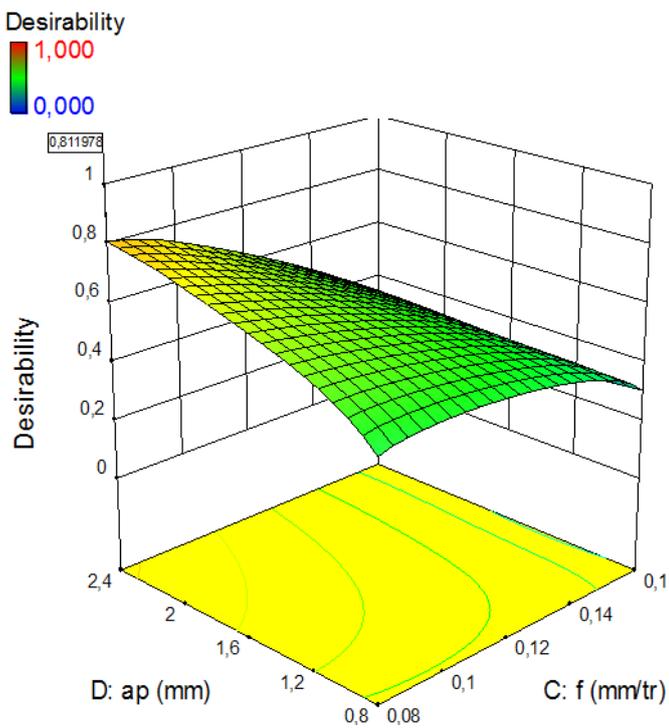


Fig. V.15. Surfaces 3D et les contours de désirabilité en fonction des paramètres de coupe étudiés (A. r et f , B. f et V_c , C. ap et V_c , D. ap et f).

V.3.2. Optimisation multi-objective en utilisant l'approche (ANN-GA)

Les algorithmes génétiques sont inspirés de la génétique classique, ils reposent sur les principes de la sélection naturelle qui est basée sur l'un des lois darwiniens liées au développement des chromosomes au cours de l'évolution de plusieurs générations jusqu'à l'obtention sur l'individu le mieux adapté [54]. Une des méthodes les plus adoptées au traitement des problèmes d'optimisation multi-objectifs. Le nombre des travaux de recherche qui a été réalisés dans ce domaine confirme la dynamique et la grande possibilité qui se propose par ces derniers dans l'espace de la recherche et de développement.

Le principe de l'optimisation par des algorithmes génétiques focalise sur la recherche à un individu optimal qui représente la solution du problème d'optimisation. L'évolution de l'ensemble des individus ou la population pendant les générations successives a été actionnée grâce à des opérateurs génétiques qui dépendent de trois étapes principales à savoir la sélection, le croisement et la mutation [64]. Dans la phase de la sélection, on copie les individus de la population proportionnellement à l'efficacité de chaque individu ou plus précisément, on fait le remplacement des chromosomes dans la population avec des bonnes cordes. Dans la deuxième étape relative au croisement, on fait la combinaison entre les paires des chromosomes dans la population pour l'objectif de produire des nouvelles générations des chromosomes. La dernière étape liée à la mutation se concerne à une légère modification des chromosomes au niveau des gènes de manière aléatoire. Pour cet objectif, on fait le changement de 0 par 1 et à l'inverse au niveau de cette position. Cette opération a été effectuée plusieurs fois jusqu'à l'obtention à un critère d'arrêt, par exemple, (un nombre maximal d'itérations,..) [79]. Un ordre de ces opérations constitue une génération.

Généralement, les algorithmes génétiques se caractérisent par sa capacité dans la détection du minimum global [79]. En outre, ce type des algorithmes capable de nous donner la possibilité d'utiliser n'importe quel langage de programmation pour l'implantation. En d'autre terme, un logiciel spécifique pour effectuer les tâches d'optimisation n'est pas nécessaire. D'autre part, la sélection d'un point de départ pour lancer l'opération de l'optimisation n'est pas nécessaire. D'une part, l'algorithme résiste assez bien au blocage dans les extremums locaux. D'autre part, ce type des algorithmes possède la caractéristique d'améliorer les solutions en cours du processus d'optimisation. Ce qui représente une importance lors du traitement des problèmes d'optimisation complexes. Les méthodes des algorithmes génétiques sont différentes de celles appliquées pour les méthodes non déterministes par les caractéristiques suivantes [54,64] :

1. Le calcul d'un gradient n'est pas nécessaire
2. Le traitement génétique d'une population a effectué sur un ensemble de chromosomes, cependant, un seul individu qui évoluerait jusqu'à la solution optimale.
3. Ce sont des algorithmes très robustes à cause de sa puissance dans le traitement des problèmes d'optimisation liés à des fonctions multimodales, non convexes et non différentiables.

La schématisation globale pour un algorithme génétique est exprimée dans la figure V.16.

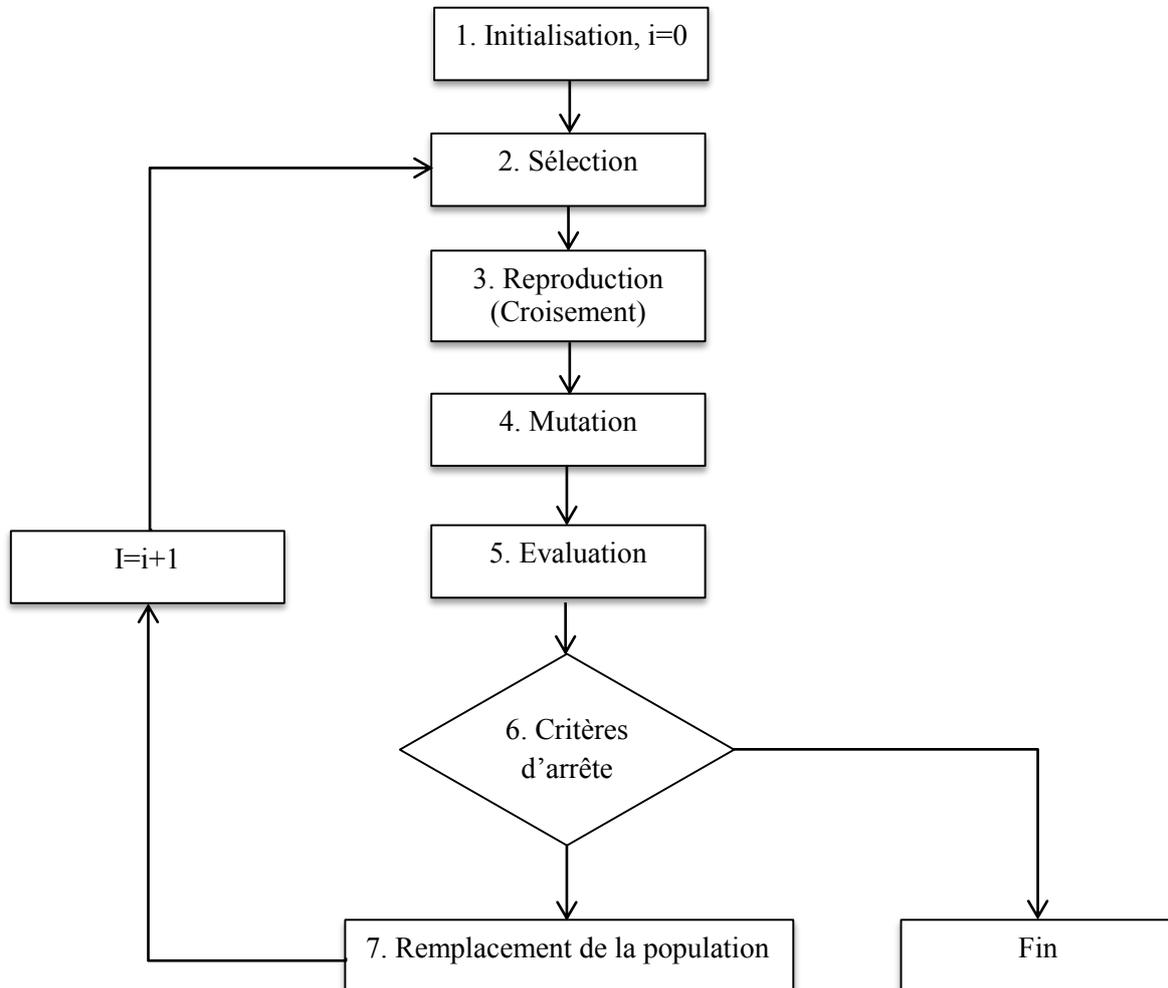


Fig. V.16. Schématisation globale d'un algorithme génétique

L'objectif de l'optimisation est de rechercher une valeur maximale du débit de copeaux enlevés (MRR) et une valeur minimale de la rugosité de surface (Ra), de l'effort de coupe (Fz) et de la puissance de coupe (Pc) simultanément en fonction de différentes conditions de coupe étudiées (r , V_c , f et ap) en se basant sur les modèles développés par l'approche (ANN). La solution est représentée par le front de Pareto, qui aide les ingénieurs à naviguer entre les compromis entre différents critères d'optimisation. Comme les objectifs de cette étude sont de nature conflictuelle, nous ajustons le premier objectif (MRR) pour nous assurer qu'il peut être minimisé. Les fonctions objectives sont énoncées comme suit :

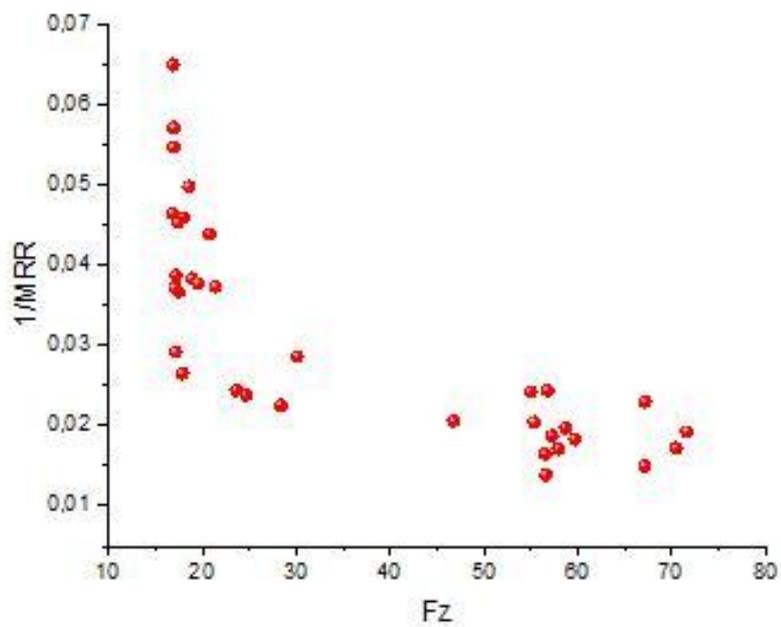
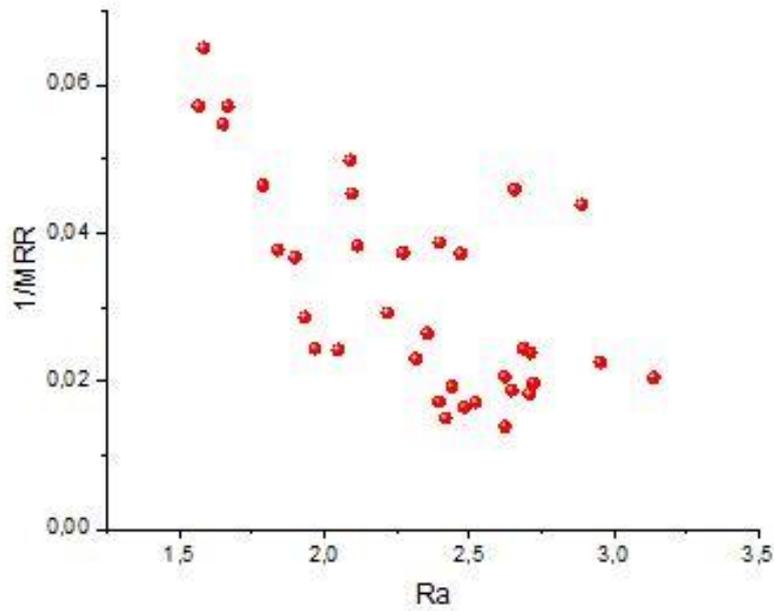
- Objectif 1: Ra
- Objectif 2: Fz
- Objectif 3: Pc
- Objectif 4: 1/MRR

Le Tableau V.15 montre les résultats de l'optimisation par GA pour les paramètres de réponse étudiés sur 264 générations en fonction des paramètres d'entrée optimaux. La figure V.17 illustre les graphiques du front de Pareto pour l'optimisation des paramètres de performance étudiés. Sur la figure, les points rouges représentent les 35 solutions de compromis optimales de Pareto. Ces solutions sont indépendantes les unes des autres car l'obtention de valeurs minimales pour (Ra, Fz et Pc) correspond à de faibles valeurs de (MRR). Par conséquent, il n'y a pas de solution optimale unique, mais plutôt un ensemble de compromis optimaux en fonction des objectifs souhaités. Par exemple, le (Ra) est en conflit avec (MRR) ; la qualité de surface diminue à mesure que (MRR) augmente. Comme aucune des solutions dans l'ensemble optimal de Pareto ne peut être considérée définitivement supérieure aux autres, chacune d'elles peut être considérée comme une solution acceptable.

Tableau V.13. Paramètres optimaux obtenus par GA pour 35 générations

r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	Fz (N)	Pc (w)	MRR (cm ³ /min)
0.5377	125.0000	0.0800	0.8622	1.6040	18.1686	37.8513	8.6217
0.4004	193.6356	0.1316	1.7032	2.0280	62.6362	202.1433	43.4135
0.5900	191.1716	0.0961	0.8007	1.7586	16.9568	54.0275	14.7060
0.7733	245.0000	0.0996	1.5563	2.4050	17.6341	72.0061	37.9948
0.5076	161.8091	0.1035	1.0426	1.8508	18.6988	50.4273	17.4565
0.4177	222.1299	0.1231	2.0953	1.9094	61.7610	228.6492	57.3018
0.5346	192.2199	0.1097	1.9220	2.2170	43.7925	140.2965	40.5410
0.7880	237.6993	0.1195	1.3963	2.7081	17.6781	70.0347	39.6573
0.4934	223.0173	0.1592	2.3494	2.6711	45.5610	169.3480	83.4212
0.6906	144.4441	0.0841	1.2164	2.1068	17.1824	41.3650	14.7710
0.7143	162.5419	0.1097	1.6215	2.7783	18.3221	49.6353	28.9063
0.5416	230.1937	0.1497	2.1676	2.5634	60.1469	230.7575	74.6844
0.7054	196.5982	0.1154	1.3139	2.5903	17.2590	56.5514	29.8057
0.5689	231.3757	0.1508	2.2495	2.6074	60.3421	232.6950	78.4675
0.4675	212.7453	0.1552	2.2154	2.5611	49.9968	177.2764	73.1606
0.6001	135.2280	0.0884	1.1370	1.9357	18.1568	40.9218	13.5966
0.4521	189.4281	0.1112	1.8422	1.9665	43.3388	136.8266	38.8154
0.7710	181.1952	0.0939	1.0714	2.3229	16.9215	51.1017	18.2276
0.5600	137.7202	0.0922	0.8304	1.7642	18.9003	43.3826	10.5491
0.5459	147.1117	0.0838	1.6780	1.9439	17.2776	42.3622	20.6878
0.7951	170.8703	0.1066	1.3848	2.8027	17.3449	49.3953	25.2170
0.6603	225.2312	0.1489	2.3419	2.6640	69.1619	259.6236	78.5479
0.6892	227.2128	0.1600	2.3980	2.7069	68.2500	258.4547	87.1736
0.6572	224.5383	0.1190	1.2780	2.3607	17.3083	64.7730	34.1540
0.5021	184.6362	0.0961	1.5051	1.8287	17.1241	52.6955	26.6934
0.6913	167.4336	0.0916	1.3454	2.2449	17.0248	47.5087	20.6251
0.6132	149.6388	0.0872	1.6475	2.1609	17.2639	43.0559	21.4931
0.6733	158.1493	0.0905	1.5266	2.3019	17.1386	45.1742	21.8579
0.5240	174.0548	0.0951	0.8956	1.6901	17.2095	49.9231	14.8244

0.7119	243.3371	0.1145	1.5011	2.4181	20.9116	84.8093	41.8186
0.7313	204.9768	0.1240	1.1826	2.7086	17.4176	59.5035	30.0666
0.4541	154.0997	0.1046	1.8056	2.0614	21.2336	54.5348	29.0914
0.6316	169.8087	0.0978	1.1466	2.0843	17.2439	48.8028	19.0358
0.5650	203.5170	0.1201	1.5919	2.2991	24.1883	82.0454	38.9005
0.4459	190.6834	0.1215	1.7778	2.0618	52.8433	167.9391	41.1735



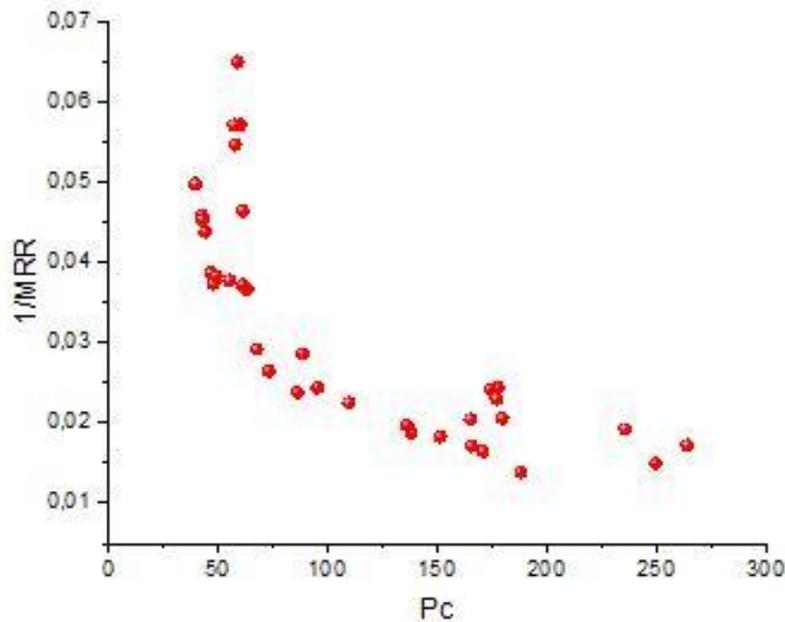


Fig.V.17. Front de Pareto.

V.4. Conclusion

En conclusion, cette étude a permis de définir des paramètres de coupe optimaux pour différentes exigences, qu'il s'agisse de la qualité de surface, de la productivité, de l'effort de coupe et de la puissance de coupe, offrant ainsi des orientations précieuses pour l'usinage efficace du PA66-GF30. L'analyse de Taguchi en se basant sur le signal/bruit a permis de proposer différents régimes optimaux pour les paramètres de sortie individuellement. L'approche de la fonction de désirabilité a permis de trouver des conditions de coupe optimales selon plusieurs objectifs souhaités. Finalement, l'utilisation de l'algorithme génétique (GA) offre de nombreuses solutions pour parvenir à un compromis entre la minimisation de (Ra, Fz et Pc) tout en maximisant simultanément (MRR).

*Conclusion générale et
perspectives*

Conclusion générale

Cette étude concerne une investigation expérimentale sur l'usinabilité du polyamide renforcé en fibres de verre PA66 GF30 en utilisant des outils en carbures revêtus lors du tournage. Une étude statistique sur l'influence des facteurs de coupe sur les différents paramètres technologiques est réalisée. Deux approches de modélisation (RSM et ANN) ont été appliquées et comparées afin de proposer des modèles de prédiction. Finalement, une optimisation mono objective en appliquant l'analyse de Taguchi suivie par deux méthodes d'optimisation multi objective des conditions de coupe en utilisant les approches DF et GA. Selon les résultats trouvés, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

1- D'après les résultats obtenus des essais uni factoriels sur l'usinabilité du PA66 GF30, on peut conclure que :

- La profondeur de passe est le facteur le plus important qui influe sur l'évolution des trois composantes de l'effort de coupe suivie par l'avance par tour.
- L'effet de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe est généralement faible, cependant exceptionnellement, on peut remarquer que l'effort de coupe tangentiel augmente de 33.9% en fonction de la variation de la vitesse de coupe entre (78 et 157 m/min) et diminue presque de la même valeur pour une vitesse de coupe supérieure à 157 jusqu'à 220 m/min.
- L'impact de l'avance par tour sur l'effort axial et tangentiel pour des faibles valeurs entre 0.08 et 0.12 mm/tr est faible. Par contre, l'effort radial est le plus affecté par l'évolution de l'avance par tour entre 0.08 et 0.2 mm/tr, suivie par l'effort de coupe tangentiel.
- L'effort axial est le plus affecté par la variation de la profondeur de passe suivie par l'effort radial et tangentiel respectivement. D'une façon générale, l'effort radial porte les valeurs les plus importantes dans tous les cas étudiés.
- L'avance par tour est le facteur le plus significatif qui possède une influence sur la rugosité de surface suivie par la vitesse de coupe. D'autre part, l'influence de la profondeur de passe sur la rugosité de surface est très faible.
- L'impact du rayon de bec sur l'évolution des efforts de coupe est plus important avec une avance élevée ($f=0.16$ mm/tr) par rapport à une faible valeur ($f=0.08$ mm/tr). Par ailleurs, on peut conclure que l'effort de coupe tangentiel est le plus affecté par la variation du rayon de bec avec une valeur de l'avance minimum. Par contre, pour une valeur maximum, l'effort axial est le plus influencé par l'évolution du rayon de bec.
- Le rayon de bec possède l'effet le plus important sur les efforts de coupe et la rugosité de surface pour une vitesse de coupe minimum ($V_c=78$ m/min) par rapport à une vitesse de coupe élevée ($V_c=157$ m/min).
- concernant l'effet du rayon de bec, les valeurs les plus faibles des efforts de coupe ont été enregistrées avec un rayon de bec réduit ($r=0.4$ mm) et une vitesse de coupe minimum. Par contre, la meilleure qualité de surface a été enregistrée pour un grand rayon de bec ($r=0.8$ mm) et une vitesse de coupe minimum avec ($f=0.08$ mm/tr et $a_p=1$ mm).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

- L'effet de la lubrification prend la grande importance avec des vitesses de coupe et des avances élevées afin de minimiser les efforts de coupe et la rugosité de surface.

2- Les résultats de l'étude statistique ont montré que :

- Les résultats d'ANOVA concernant la rugosité de surface, ont indiqué que l'avance par tour est le facteur le plus dominant avec une contribution de 61.11%. Par contre, l'effet du rayon de bec est moins significatif par rapport à l'avance par tour avec une contribution de 21.6%.
- Pour l'effort de coupe principal, l'avance par tour a été le facteur le plus significatif (33.37%) suivie par la profondeur de passe (29.4%).
- Dans le cas de la puissance de coupe, la profondeur de passe est le facteur le plus important qui possède une influence sur la réponse suivie par la vitesse de coupe et l'avance par tour avec des contributions de 24.9%, 22.5% et 21.63% respectivement.
- Le débit de copeaux enlevés a été affecté principalement par la profondeur de passe et la vitesse de coupe avec des contributions dans le modèle de prévision de 48.8%, 25.48% et 18.19% respectivement.

3- Les résultats de la modélisation par des réseaux de neurones ANN et la méthodologie de la surface de réponse RSM ont montré que :

- Les modèles quadratiques (développés) sont compatibles ou efficaces pour la prédiction de l'évolution de la rugosité de surface, l'effort de coupe principal, la puissance de coupe et le débit de copeaux enlevés.
- Les surfaces de réponse 3D et les contours ont été utilisées pour la meilleure sélection des paramètres de coupe qui conduisent aux réponses désirées (R_a , F_z , P et MRR).
- La comparaison entre les résultats expérimentaux et prédits liés aux paramètres de réponse a démontré une bonne corrélation entre eux.
- La comparaison entre les résultats relatifs à la modélisation par (ANN) et (RSM) pour la prédiction des paramètres technologiques étudiés en fonction des conditions d'usinage concernées (r , V_c , f et a_p) montre que les modèles obtenus par des réseaux de neurones représentent bien la relation non linéaire entre les paramètres de réponse et d'entrée par rapport aux modèles obtenus par (RSM) et cela confirme l'efficacité et la précision de l'approche ANN dans la modélisation non linéaire.

4- La discussion des résultats relatifs à l'optimisation mono-objective et multi-objective des conditions de coupe en utilisant la méthode de Taguchi et les approches de la fonction de désirabilité et GA permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Les résultats obtenus en appliquant la méthode de Taguchi montrent que le régime de coupe optimal qui assure une rugosité de surface minimale est exprimé par les conditions de coupe suivantes ($r=0.8$ mm, $V_c=175$ m/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=0.8$ mm). Par contre, le régime de coupe optimal qui concerne la maximisation du débit de copeau enlevé (MRR) a été obtenu par les paramètres d'usinage suivants ($r=0.4$ mm, $V_c=245$ m/min, $f=0.16$ mm/tr, $a_p=2.4$ mm).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

- Les résultats d'optimisation multi-objectifs qui concernent l'objectif de la qualité en appliquant la fonction de désirabilité montrent que la solution optimale relative au régime de coupe étudié a été obtenue par les paramètres de coupe suivants : ($r=0.44$ mm, $V_c=193.87$ m/min, $f=0.08$ mm/tr, $a_p=2.09$ mm) pour une valeur de la rugosité de surface optimisée ($R_a=1.21$ μ m).
- Les résultats obtenus qui favorisent l'objectif de la productivité ont indiqué que les conditions d'usinage optimales sont exprimées comme suit : ($r=0.54$ mm, $V_c=244.58$ m/min, $f=0.13$ mm/tr, $a_p=2.34$ mm) pour une valeur maximum du débit de copeaux enlevés ($MRR=73.28$ cm³/min).
- Les résultats relatifs à l'objectif d'optimisation combinée de (R_a et MRR) simultanément et à importance égale, montrent que les paramètres optimaux ont été obtenus comme suit : ($r=0.8$ mm, $V_c=245$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=2.4$ mm) pour des valeurs de la rugosité de surface et le débit de copeaux enlevés ($R_a = 1.48$ μ m et $MRR=70.56$ cm³/min). D'une façon générale, on peut conclure que la plage de désirabilité enregistrée a été entre (0.8 et 1). Ce qui confirme l'importance des résultats d'optimisation et la possibilité d'exploitation ces résultats dans les limites des paramètres étudiés.
- La solution optimale qui représente le minimum de la rugosité de surface, de l'effort de coupe principal, de la puissance de coupe et le maximum du débit de copeau enlevé est exprimée par ($r=0.4$ mm, $V_c=184.313$ m/min, $f=0.08$ mm/tr et $a_p=2.4$ mm).
- Les résultats obtenus par GA montrent qu'il est possible de proposer plusieurs solutions pour atteindre le minimum de la rugosité de surface, de l'effort de coupe tangentiel, de la puissance de coupe et le maximum de débit de copeaux enlevés simultanément.

Perspectives

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives liées aux travaux complémentaires, à titre d'exemple :

- 1- La quantification et la modélisation des sorties en tenant compte de l'impact de différentes conditions de coupe étudiées et la géométrie d'outils (rayon de bec, angle d'attaque, ..) sur l'évolution de l'usure des outils et la chaleur engendrée dans la zone de coupe.
- 2- L'étude de l'effet des paramètres de coupe précédents avec une vaste plage permet de comprendre le comportement du matériau dans les limites supérieures et inférieures des paramètres étudiés en comparaison avec des métaux ou d'autres matrices polymères (phénomène de l'arrachement des fibres, la formation des copeaux, la fusion de la matrice,...).
- 3- Une étude au niveau de l'échelle microscopique peut être intéressante pour mieux comprendre les endommagements induits dans la profondeur de la pièce lors de l'usinage, ce qui contribue à l'évaluation de la performance mécanique et la durée de vie des structures composites de manière plus précise.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

- 4- L'analyse de l'effet de vibrations générées pendant le processus d'usinage permet de donner une conception complète pour la prévision de l'état de surface usinée.
- 5- Une étude comparative de l'usinabilité du polyamide renforcé en fibres de verre avec un taux de renforcement distinct peut conduire à des conclusions intéressantes sur l'impact du taux de renforcement sur l'évolution de différents phénomènes de coupe étudiés lors de l'usinage. Par ailleurs, la structure du polyamide et l'impact d'absorption d'eau sur les propriétés mécaniques de ce dernier représentent un autre domaine de recherche lors de l'usinage.
- 6- L'application d'autres techniques de modélisation et d'optimisation pour adopter l'approche la plus compatible pour généraliser les phénomènes de coupe étudiés.
- 7- Enfin, pour répondre aux besoins industriels, il est intéressant d'étudier les phénomènes de la coupe du PA66-GF30 avec d'autres procédés d'usinage tels que le perçage, le fraisage et le contourage.

Références bibliographiques

- [1] L. MERAD, 'Etude par Spectroscopie Raman et Modélisation d'une résine composite RTM', Thèse de doctorat, Physique Energétique et Matériaux, Université Paul Verlaine- Metz et Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, P. 8-14, 2010.
- [2] N.A. Fountas, L. Ntziantzias, J. Kechagias, A. Koutsomichalis, J.P. Davim, N.M. Vaxevanidis, 'Prediction of cutting forces during turning PA66-GF30 Glass Fiber Reinforced Polyamide by soft computing techniques', Materials Science Forum, Vol.766, P. 37-58, 2013.
- [3] J. Y. Sheikh-Ahmad, 'Machining of Polymer Composites', Book, Springer New York, The Petroleum Institute, Abu Dhabi, P. 3, 2009.
- [4] Nodal Consultants, 'Etude prospective stratégique sur les matériaux composites', Industrie française des matériaux composites, P. 80, 2002.
- [5] D. Iliescu, 'Approche expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites Carbone/Epoxy', Thèse de doctorat, Sciences de l'ingénieur, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech, P. 6, 2008.
- [6] L. LASRI, 'Modélisation macromécanique et micromécanique de l'usinage des composites à matrice polymère et fibres longues', Thèse de doctorat, Sciences de l'ingénieur, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech, P. 1, 2009.
- [7] M. CHATAIN, 'Matériaux composites : Présentation générale', *Techniques de l'ingénieur*, L'institut industriel du nord IDN, P. 1-11.
- [8] A. SEYNI, 'Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par Co-broyage', Thèse de doctorat, Génie des procédés et environnement, L'institut National Polytechnique de Toulouse, P. 26, 2008.
- [9] L. Gendre, 'Matériaux composites et structures composites', Resource publiée, 2011.
- [10] M. Dupeux, 'Science des Matériaux', Série Aide-mémoire, Université Joseph Fourier de Grenoble, P. 269-287, 2004. <http://www.dunod.com>.
- [11] H. Nouri, 'Modélisation et identification de lois de comportement avec endommagement en fatigue polycyclique de matériaux composite à matrice thermoplastique', Thèse de doctorat, Sciences de l'ingénieur, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech, P. 16, 2009.
- [12] Berthelot, J.M., 'Matériaux composites-comportement mécanique et analyse des structures', Tec & Doc, 3ème Edition, 1999.
- [13] N. BAHLOULI, 'Cours Matériaux Composites/DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle', IPST-ULP.
- [14] R. PINZELLI, 'Fibres aramides pour matériaux composites', *Technique de l'ingénieur*, DuPont de Nemours International SA-Genève, P. 1-13, 2001.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [15] B. Ledieu, 'Vieillissement en milieu eau/glycol du polyamide 66 renforce fibres de verre courtes pour l'application boite a eau de radiateur de refroidissement moteur', Thèse de doctorat, *Polymers*, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech, P. 23, 2010.
- [16] C. TROMBERT, 'Usinabilité des aciers inoxydables', *Technique de l'ingénieur*.
- [17] A.A. Czaplicki, 'L'usinabilité et la coupe des métaux', *Revue de la société royale belge des ingénieurs et industries*, N°12, P. 7087-1962.
- [18] H. Bouchelaghem, 'Etude du comportement des outils CBN lors de l'usinage de l'acier fortement allié AISI D3', Thèse de doctorat, Département de génie mécanique, Université 8 mai 1945-Guelma, P. 13-28, 2013.
- [19] B. Vieille, 'Production Automatisée', Usinage, Conservatoire National des Arts et Métiers, P. 14-21.
- [20] C. Barlier, B. Poulet, 'MEMOTECH, Génie mécanique, productique mécanique', Deuxième édition, Editions CASTELLA, P. 25-30, 1999.
- [21] Ph. DEPEYRE, 'La coupe des métaux', Université de la Réunion, P. 35-40, 2004-2005.
- [22] J.M. Linares, J.M. Sprauel C. Marty, 'Analyse du processus élémentaire de mesure', *Revue contrôle industriel*, N° 205, P. 27-31, 1997.
- [23] A. DESSARTHE, 'Usinage des composites', *Technique de l'ingénieur*, traité Plastiques et Composites, P. 1-12.
- [24] L.R. Silva, A.M. Abrao, J.P. Davim, 'The Effect of Tool Geometry on the Machinability of Polyamide during Precision Turning', *Journal of Composite Materials*, P. 1-12, 2009.
- [25] L.R. Silva, J.P. Davim, A.M. Abrao, P.E. Faria, 'Marchant Model Applied to precision Orthogonal cutting of PA66 Polyamide with and without Glass fiber Reinforcing', *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, P. 1-11, 2009.
- [26] V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, L.R. Silva, A.M. Abrao, J.P. Davim, 'Machinability study in micro turning of PA66-GF30 Polyamide with a PCD Tool', *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 24 (12), P. 1290-1296, 2009.
- [27] V. Franke, 'Drilling of long fiber reinforced thermoplastics-Influence of the cutting edge on the machining results', *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 60, P. 65-68, 2011.
- [28] E. Else, 'Influence from production parameters on the surface roughness of a machined short fiber reinforced thermoplastic', *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, P. 1611-1618, 1999.
- [29] R. Sreenivasulu, 'Optimization of Surface Roughness and Delamination Damage of GFRP Composite Material in End Milling using Taguchi Design Method and Artificial Neural Network', *Procedia Engineering*, Vol. 64, P. 785-794, 2013.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [30] V. k. vankanti, V. Ganta, 'Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method', *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 3 (1), P. 35-41, 2014.
- [31] C. A. coceição Antonio, J. Paulo Davim, Vitor Lapa, 'Artificial neural network based on genetic learning for machining of polyether-ether-ketone composite materials', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 39, P. 1101-1110, 2008.
- [32] K. Palanikumar, L. Karunamoorthy, 'Optimizing the machining parameters for minimum surface roughness in turning of *GFRP* composites', *Int. J. Manuf. Technol.*, P. 1-2, 2005.
- [33] M. VijayaKini, A.M. Chincholkar, 'Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of ± 30 % glass fiber reinforced polymer pipes', *Materials and Design*, Vol. 31, P. 3590-3598, 2010.
- [34] Ö. Erkan, M. Demetgul , B. Isik, I. Nur Tansel, 'Selection of optimal machining conditions for the composite materials by using Taguchi and GONNs', *Measurement*, Vol. 48, P. 306-313, 2014.
- [35] C. Santiuste, X. Soldani, M. Henar Miguélez, 'Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components', *Composite structures*, Vol. 92, P. 69-698, 2010.
- [36] P. Mehbudi, V. Baghlani, J. Akbari, A.R. Bushroa, N.A. Mardi, 'Applying ultrasonic vibration to decrease drilling-induced delamination in GFRP laminates', *Procedia CIRP 6*, P. 577-582, 2013.
- [37] M. Gupta, S. Kumar, 'Investigation of Surface Roughness and *MRR* for turning of *UD-GFRP* using *PCA* and Taguchi method', *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, P. 70-81, 2015.
- [38] J.P. Davim, L.R. Silva, A. Festas, A.M. Abrao, 'Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing', *Materials and Design*, Vol. 30, P. 228-234, 2009.
- [39] M. Adam Khan et A. Senthil Kumar, 'Machinability of glass fibre reinforced plastic (GFRP) composite using alumina-based ceramic cutting tools', *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 13, P. 67-73, 2011.
- [40] V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, F. Mata, J.P. Davim, 'Modeling and analysis of Machinability Characteristics in PA6 and PA66 GF30 Polyamides through Artificial Neural Network', *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 23, P. 313-336, 2010.
- [41] V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, F. Mata, J.P. Davim, 'Taguchi Approach for Achieving Better Machinability in Unreinforced and Reinforced Polyamides', *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 275, P. 909-924, 2008.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [42] V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, F. Mata, J.P. Davim, 'Study on some aspects of machinability in unreinforced and reinforced polyamides', *Journal of Composite Materials*, P. 1-15, 2009.
- [43] M. Madic, D. Marcovic, M. Radovanovic, 'Optimization of Surface Roughness when Turning Polyamide using ANN-IHSA approach', *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 1 (4), P. 432 - 443, 2012.
- [44] M. Palabiyik, Bahadur, 'Tribological studies of Polyamide 6 and high density Polyethylene Blends Filled with PTFE and Copper Oxide and Reinforced with Short Glass Fibers', *Wear*, Vol. 253, P. 369 - 376, 2002.
- [45] A.G. Pedrose, L.H.A. Mei, J.A.M. Angelli, D.S. Rosa, 'The influence of the Drying Process Time on the Final Properties of Recycled Glass Fiber Reinforced Polyamide', *Polym. Test.*, Vol. 21, P. 229 - 232, 2002.
- [46] J. Jordon, K.I. jacob, R. Tannenbaum, M.A. Sharaf, I. Jasiuk, 'Experimental trends in Polymer Nanocomposites: A review', *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. 393, P. 1-11, 2005.
- [47] G. Mollard, 'Polyamide 6-6', *Technique de l'ingénieur*, Traité Génie des procédés, p. 1-7.
- [48] Michaud Chailly, 'Plastiques Techniques', P. 38, www.michaud-chailly.fr.
- [49] A. Zaidi, 'Contribution à l'étude de l'usinage des matériaux polymères', Mémoire de magister, Département de génie mécanique, Université 8 mai 1945-Guelma, P. 67, 2013.
- [50] H. Bouchelaghem, M.A. Yalesse, A. Amirat, T. Mabrouki, J.F. Rigal, 'Experimental investigation and performance analyses of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3)', *Mach. Sci. Technol.*, Vol. 14, P. 471-501, 2010.
- [51] H. Aouici, M.A. Yalesse, K. Chaoui, T. Mabrouki, J.F. Rigal, 'Analyses of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization', *Measurement*, Vol. 45, P. 34-353, 2012.
- [52] K. Palankumar, L. Karunamoorthy, R. Karthikeyan, 'Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of Glass fiber reinforced polymer composites', *Materials and Design*, Vol. 27, P. 862-871, 2006.
- [53] H.AOUICI, 'Production mécanique 2', Cours, Ecole nationale supérieure de technologie, P. 59, 2013.
- [54] D. LEPADATU, 'Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surfaces de réponse'. Thèse de doctorat, Sciences de l'ingénieur, Institut des sciences et techniques de l'ingénieur d'Angers, P. 49-50, 2006.
- [55] B. LIAUDET, 'Cours de Data Mining 8 : Réseaux de neurones', EPF-4/5ème année -IAP-1ère Edition, P. 1-30, Octobre 2008.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [56] P. Wira, 'Réseaux de neurones artificiels : Architectures et applications', Université de Haute Alsace, 2009. www.trop.mips.uha.fr
- [57] C. TAUZET, 'Les réseaux de neurones artificiels : Introduction aux connexionnismes', P. 23-25, 1992.
- [58] F. SORIN, L. Broussard, P. ROBLIN, 'Régulation d'un processus industriel par réseaux de neurones', *Technique de l'ingénieur*, traité informatique industrielle, P. 2-3.
- [59] AIA-A.DIPANDA, 'Réseaux de neurones', Cours, M2 BDIA, P. 12.
- [60] W. Gerstner, B. Ieroy-Beaulieu, S. Souksavanh, J-Luc Beuchat, 'Réseaux de Neurones Artificiels : Une Introduction à l'apprentissage automatique', School of computer and communication sciences, 4ème édition, P. 11-13, 2006.
- [61] M. WEINFELD, 'Réseaux de neurones', Laboratoire de l'informatique de l'école polytechnique (CNRS), *Technique de l'ingénieur*, traité informatique, P. 6.
- [62] Apstat Technologies Inc, 'Introduction aux réseaux de neurones : considérations actuarielles', info@apstat.com, P. 4-6, 2002.
- [63] G. Dreyfus, 'Les réseaux de neurones', Ecole supérieure de physique et de chimie industrielle de la ville de Paris (ESPCI), *Mécanique industrielle et matériaux*, N°51, 1998.
- [64] R.V. Rao, 'Advanced modeling and optimization of manufacturing processes', Book, Springer-Verlag, London, 2011.
- [65] H. Oktem, T. Erzurumlu, H. Kurtaran, 'Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for Surface Roughness', *Materials Processing Technology*, Vol. 170, P. 11-16, 2005.
- [66] K. Kumar, A. Dvivedi, S. Kumar, 'Parametric optimization of Surface Roughness on wire-EDM using Taguchi method', *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Vol. 24, P. 1-4, 2011.
- [67] N. Muthukrishnan, J.P. Davim, 'Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN Analysis', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, P. 225-232, 2009.
- [68] M. Elbah, H. Aouici, I. Meddour, M.A. Yallese, L. Boulanouar, 'Application of response surface methodology in describing the performance of mixed ceramic tool when turning AISI 4140 steel', *Mechanics & Industry*, P. 1-12, 2015.
- [69] J. Ntziantzias, J. Kechagias, M. Pappas, N.M. Vaxevanidis, 'An experimental study of cutting force system during turning of glass fiber reinforced polymer composite', *Proc. 4th International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN)*, P. 113-122, 2011.
- [70] A. Chabbi, M.A. Yallese, I. Meddour, M. Nouioua, T. Mabrouki, F. Girardin, 'Predictive modeling and Multi-response optimization of technological parameters in turning of

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Polyoxymethylene polymer (POM C) using RSM and desirability function', *Measurement*, 2016.

[71] S.O. An, E.S. Lee, S.L. Noh, 'A study on the cutting characteristics of glass fiber reinforced plastics with respect to tool materials and geometries', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 68, P. 60-67, 1997.

[72] G. Santhanakrishnan, 'Investigations on machining of FRP composites and their tribological behavior', Ph.D. Thesis, 2T Madras, Chennai, India, 1990

[73] E.C. Harrington, 'The desirability function', *Industrial Quality Control*, Vol. 21, P. 494-498, 1965.

[74] G. Derringer, R. Suich, 'Simultaneous Optimization of several Response Variables', *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, P. 214-219, 1980.

[75] A. Selaimia, M. A. Yaltese, H. Bensouilah, I. Meddour, R. Khattabi, T. Mabrouki, 'Modeling and optimization in dry face milling of X2CrNi18-9 austenitic stainless steel using RMS and desirability approach', *Measurement*, Vol. 107, P. 53-67, 2017.

[76] A. CHABBI, 'Modélisation et optimisation des paramètres d'usinage lors du tournage du polyacétal POM C', Thèse de doctorat, Département de génie mécanique, Université 8 Mai 1945 -Guelma, P. 133, 2018.

[77] THIRIONET B., 'Macro Minitab pour le calcul de la fonction de qualité de Taguchi', P. 4-5.

[78] Krishankant, J. Taneja, M. Bector, R. Kumar, 'Application of Taguchi Method for optimizing Turning process by the effects of machining parameters', *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Volume 2, Issue 1, P. 263-264, 2012.

[79] Y. Collette, P. Siarry, 'Optimisation Multiobjectif', livre, Éditions EYROLLES, 61, Bld Saint Germain 75240 Paris Cedex 05. www.editions-eyrolles.com

La liste des figures

Chapitre I

Fig. I.1. Principaux matériaux d'une matrice.....	4
Fig. I.2. Principaux matériaux du renfort.....	5
Fig. I.3. Effort de coupe résultant F et leurs composants (F_T, F_V, F_R) pendant le tournage longitudinal	13
Fig. I.4. présentation graphique de la rugosité.....	17
Fig. I.5. Illustration graphique de différents critères de la rugosité : (A) Ra et Rp , (B) Rz , (C) $Rmax$	19
Fig. I.6. Différents facteurs influençant l'intégrité de surface lors de l'usinage.....	20
Fig. I.7. Effet de l'avance et le rayon du bec sur la rugosité de surface dans le cas du PA66-GF30 (a et b) et dans le cas du PA66 (c et d).....	24
Fig. I.8. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour: (A) l'effort de coupe, (B) la rugosité de surface, (C) la force de coupe spécifique.....	26
Fig. I.9. Effet de l'avance et de la vitesse de coupe : (A) sur la rugosité de surface, (B) sur la pression de coupe spécifique, (C) sur l'effort de coupe.....	27
Fig. I.10. Architecture du réseau de neurone artificiel.....	29
Fig. I.11. Comparaison entre les valeurs prédites et expérimentales de la rugosité de surface en utilisant ANN	29
Fig. I.12. Comparaison entre les valeurs prédites et expérimentales pour le coefficient d'endommagement de délaminage en utilisant ANN	29
Fig. I.13. Organigramme d'étude et d'essai d'ANN	30
Fig. I.14. Topologie du réseau de neurone artificiel	31
Fig. I.15. Appareils expérimentaux.....	31
Fig. I.16. Processus d'essai d'ANN avec la topologie optimale : (A) comparaisons pour l'effort de coupe, (B) pour l'effort d'avance	31
Fig. I.17. Diagramme des effets principaux : (A) pour la rugosité Ra , (B) pour MRR	33
Fig. I.18. Diagrammes d'interaction : (A) pour la rugosité de surface Ra , (B) pour MRR	34
Fig. I.19. Structure de GONN.....	35
Fig. I.20. Résultats du réseau neurone pour la rugosité de surface avec des outils de coupe distinctes : (a) 2 arêtes de coupe, (b) 3 arêtes de coupe, (c) 4 arêtes de coupe.....	35
Fig. I.21. Évolution des dommages de la matrice CFRP et GFRP pendant la formation des copeaux : (a) écrasement, (b) fissuration, l'orientation de fibre 45°	36
Fig. I.22. Comparaison avec différentes vitesses d'avance pour : (A) l'effort d'avance, (B) le coefficient de délaminage.....	37
Fig. I.23. Graphes de réponse de la rugosité de surface (effet de six paramètres).....	38
Fig. I.24. Graphes de réponse de MRR : (a) l'effet du rayon de bec, (b) l'angle de coupe de l'outil, (c) l'effet de l'avance par tour, (d) l'effet de la vitesse de coupe, (e) l'effet d'environnement de coupe (froid, chaude, humide), (f) l'effet de la profondeur de passe.....	39
Fig. I.25. Rugosité de surface pendant le tournage du PA66 (a et b) et PA66-GF30 (c et d).....	40
Fig. I.26. Évolution des efforts de coupe pendant le tournage du PA66 et PA66-GF30 avec $V_c=70$ m/min, $f=10$ $\mu\text{m}/\text{tr}$, $a_p=150$ μm pour les outils suivants : carbure revêtu de diamant, CVDD, PCD, carbures (K15 et K15-kf)	41
Fig. I.27. Effet de l'avance sur les efforts de coupe et la force de coupe spécifique pendant le tournage du PA66 et PA66-GF30 avec $V_c=70$ m/min, $a_p=150$ μm et les outils précédents	42

Fig. I.28. Usure des flancs des outils d'alumine en fonction du temps d'usinage et la vitesse de coupe	43
Fig. I.29. Effet de la vitesse de coupe sur : (A) l'effort de coupe principal, (B) la rugosité de surface, lors de l'usinage d'un matériau composite GFRP pour les deux types des outils de coupe d'alumine	44
Fig. I.30. Modèle sur le profil observé de la surface usinée pendant l'usinage d'un matériau composite GFRP	44
Fig. I.31. Architecture d'ANN	45
Fig. I.32. Diagramme des effets principaux du rapport S/N pour l'usinabilité du Polyamide renforcé PA66 GF30	46
Fig. I.33. Préparation expérimentale pour mesurer les efforts de coupe.....	46
Fig. I.34. Valeurs expérimentales et prédites du model basé sur RSM pour : (A) la puissance de coupe, (B) l'effort de l'usinage, (C) la pression de coupe spécifique.....	47
Fig. I.35. Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur : (A) l'effort de l'usinage, (B) la puissance de coupe	47
Fig. I.36. Pourcentage de contribution des facteurs affectants sur les efforts de coupe.....	49

Chapitre II

Fig. II.1. Tour parallèle SN 40 C	51
Fig. II.2. Plaquettes de coupe utilisées.....	52
Fig. II.3. Porte-outil utilisé.....	52
Fig. II.4. Nature des liaisons chimiques dans le polyamide 66 (phase cristalline)	53
Fig. II.5. Exemple des éprouvettes utilisées du PA66 GF30	54
Fig. II.6. Exemple d'acquisition des composantes de l'effort de coupe lors de l'usinage	59
Fig. II.7. Vision interne sur les composantes du capteur Kistler	59
Fig. II.8. Rugosimètre 2D (surfest mitutoyo (SJ-201)).....	60
Fig. II.9. Configuration expérimentale et l'organigramme de l'étude	61

Chapitre III

Fig. III.1. Évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance par tour	64
Fig. III.2. Évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse coupe	65
Fig. III.3. Évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe	66
Fig. III.4. Évolution de la rugosité de surface en fonction de l'avance par tour.....	67
Fig. III.5. Évolution de la rugosité de surface en fonction de la vitesse de coupe.....	68
Fig. III.6. Évolution de la rugosité de surface en fonction de la profondeur de passe.....	69
Fig. III.7. Évolution des efforts de coupe en fonction du rayon de bec-avance par tour	70
Fig. III.8. Évolution de la rugosité de surface en fonction du rayon de bec-avance par tour	72
Fig. III.9. Évolution des efforts de coupe en fonction du rayon de bec-vitesse de coupe	74
Fig. III.10. Évolution de la rugosité de surface en fonction du rayon de bec-vitesse de coupe.....	75
Fig. III.11. Évolution des efforts de coupe en fonction de la lubrification-avance par tour	77
Fig. III.12. Évolution de la rugosité de surface en fonction de la lubrification-avance par tour	79

Fig. III.13. Évolution des efforts de coupe en fonction de la lubrification-vitesse de coupe	80
Fig. III.14. Évolution de la rugosité de surface en fonction de la lubrification-vitesse de coupe.....	82

Chapitre IV

Fig. IV.1. Nature de l'architecture et des connexions dans un réseau multicouche	87
Fig. IV.2. Réseau à connexions locales.....	88
Fig. IV.3. Réseau à connexions récurrents.....	88
Fig. IV.4. Réseau à connexions complètes	88
Fig. IV.5. Principaux types d'architecture d'un réseau de neurones.....	89
Fig. IV.6. Exemple d'un réseau de neurones multicouche (Perceptron multicouche).....	89
Fig. IV.7. Exemple sur une fonction binaire.....	90
Fig. IV.8. Fonctions de transfert hyperboliques : (a) standard, (b) normalisée entre 0 et 1	91
Fig. IV.9. Étapes principales pour calculer la valeur prédite dans un réseau multicouche.....	93
Fig. IV.10. Exemple sur le processus d'apprentissage supervisé.....	93
Fig. IV.11. Effet du terme de momentum sur une descente de gradient. Les ellipses représentent les espaces d'erreur.....	95
Fig. IV.12. Structure ANN (4-3-1) pour la rugosité (Ra)	97
Fig. IV.13. Profileur de prévision de (Ra) en fonction des conditions de coupe	98
Fig. IV.14. Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la rugosité de surface lors de l'apprentissage et la validation par ANN.....	98
Fig. IV.15. Structure ANN (4-3-1) pour l'effort de coupe (Fz).....	100
Fig. IV.16. Profileur de prévision de l'effort (Fz) / (r, Vc, f et ap).....	101
Fig. IV.17. Graphique des valeurs observées et prédites de l'effort (Fz) lors de l'apprentissage et la validation par ANN	101
Fig. IV.18. pourcentage des contributions de différents facteurs pour la rugosité (Ra).....	108
Fig. IV.19. pourcentage des contributions de différents facteurs pour (Fz).....	109
Fig. IV.20. pourcentage des contributions de différents facteurs pour la puissance (P).....	110
Fig. IV.21. pourcentage des contributions de différents facteurs pour (MRR)	111
Fig. IV.22.a. Diagramme des effets principaux pour la rugosité (Ra).....	112
Fig. IV.22. Diagramme des effets principaux pour les réponses : (b) Fz , (c) P , (d) MRR	113
Fig. IV.23. Diagramme de probabilité des résidus pour les facteurs de réponse : (A) Rugosité de surface, (B) Effort tangentiel de coupe, (C) Puissance de coupe, (D) Débit de copeaux enlevés.....	115
Fig. IV.24. Résultats expérimentaux et prédites pour les facteurs de réponse : (A) Ra , (B) Fz , (C) P and (D) MRR	117
Fig. IV.25. Surface de réponse 3D et les contours pour les effets d'interactions de l'avance par tour et du rayon de bec sur la rugosité de surface.....	118
Fig. IV.26. Surface de réponse 3D et les contours pour les effets d'interactions de (f) et de (ap) sur l'effort tangentiel.....	119
Fig. IV.27. Surface de réponse 3D et les contours pour les effets d'interactions de (Vc) et de (ap) sur la puissance de coupe	120
Fig. IV.28. Surface de réponse 3D et les contours pour les effets d'interactions de (Vc) et de (f) sur le débit de copeaux enlevés.....	121
Fig. IV.29. Erreurs enregistrées pour les essais de validation.....	122

Fig. IV.30. Comparaison entre les résultats expérimentaux et celles obtenus par ANN et RSM pour la rugosité de surface (Ra).....	124
Fig. IV.31. Comparaison entre les résultats expérimentaux et celles obtenus par ANN et RSM pour l'effort tangentiel de coupe (Fz).....	125
Fig. IV.32. Pourcentage de l'erreur enregistré pendant la prédiction des facteurs de réponse : (A) et (B) Modèles ANN et RSM pour Ra , (C) et (D) Modèles ANN et RSM pour Fz	126

Chapitre V

Fig. V.1. Exemple sur les étapes principales d'optimisation par la méthode de Taguchi.....	129
Fig. V.2. Graphique des effets principaux : A. pour la rugosité de surface (Ra), B. pour MRR	135
Fig. V.3. Solution optimale liée au régime de coupe étudié pour l'objectif de la qualité.....	138
Fig. V.4. Évolution de désirabilité en fonction du rayon de bec et de l'avance par tour pour l'objectif de la qualité.....	139
Fig. V.5. Plage de prédiction de la rugosité de surface optimisée en fonction du rayon de bec et de l'avance par tour.....	140
Fig. V.6. Solution optimale liée au régime de coupe dans le but d'optimiser la productivité.....	141
Fig. V.7. Effet de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur l'évolution de : (A. la désirabilité, B. le débit de copeau enlevé) pour l'objectif de la productivité.....	142
Fig. V.8. Solution optimale liée au régime de coupe étudié pour l'objectif combiné.....	144
Fig. V.9. Barres de désirabilité analogique pour l'objectif combiné.....	145
Fig. V.10. Évolution de désirabilité combinée en fonction des effets d'interaction : A. Vc et ap , B. r et f , C. f et ap , D. Vc et f	146
Fig. V.11. Plage de prédiction de désirabilité combinée liée à la variation de la rugosité de surface en fonction de (r et f).....	146
Fig. V.12. Plage de prédiction de désirabilité combinée liée à l'évolution du débit de copeaux enlevés en fonction des facteurs d'interaction (Vc et ap).....	147
Fig. V.13. Barres de désirabilité pour évaluer l'optimisation des réponses.....	149
Fig. V.14. Graphique des résultats d'optimisation combinée.....	150
Fig. V.15. Surfaces 3D et les contours de désirabilité en fonction des paramètres de coupe étudiés (A. r et f , B. f et Vc , C. ap et Vc , D. ap et f).....	152
Fig. V.16. Schématisation globale d'un algorithme génétique.....	154
Fig. V.17. Front de Pareto.....	157

La liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1. Composition chimique de différents types de verre E, D et R selon Berthelot.....	6
Tableau I.2. Caractéristiques mécaniques des fibres de verre E et R selon Berthelot.....	7
Tableau I.3. Caractéristiques principales de différents types des fibres de carbone	7
Tableau I.4. Propriétés principales de différentes fibres d'aramide.....	8
Tableau I.5. Principaux défauts de l'état de surface et son ordre.....	16
Tableau I.6. Ancienne désignation de la rugosité de surface: Correspondance	17
Tableau I.7. Indication de la rugosité par des classes	18
Tableau I.8. Géométrie des outils de coupe	24
Tableau I.9. Comparaison et résultats d'optimisation.....	48

Chapitre II

Tableau II.1. Description dimensionnelle des plaquettes de coupe utilisées	52
Tableau II.2. Caractéristiques mécaniques et thermiques du PA66-GF30	54
Tableau II.3. Valeurs et niveaux des facteurs d'entrée.....	55
Tableau II.4. Plan d'expériences de Taguchi L18.....	56
Tableau II.5. Conditions de coupe et plan d'expériences pour les essais uni factoriels	56
Tableau II.6. Plan d'expériences pour les essais de l'effet du rayon de bec de l'outil.....	57
Tableau II.7. Plan d'expériences pour les essais de l'impact de type d'usinage	58
Tableau II.8. Caractéristiques du dynamomètre Kistler 9257 B.....	59

Chapitre III

Chapitre IV

Tableau IV.1. Définition de différentes fonctions de transfert	90
Tableau IV.2. Principaux résultats du test d'apprentissage et de validation pour (Ra)	96
Tableau IV.3. Principaux résultats liés au test d'apprentissage et de validation pour (Fz).....	99
Tableau IV.4. Résultats expérimentaux	107
Tableau IV.5. Résultats d'ANOVA pour la rugosité de surface (Ra).....	108
Tableau IV.6. Résultats d'ANOVA pour l'effort tangentiel (Fz)	109
Tableau IV.7. Résultats d'ANOVA pour la puissance (P).....	110
Tableau IV.8. Résultats d'ANOVA pour le débit de copeaux enlevés (MRR)	111
Tableau IV.9. Résultats des essais de validation.....	122
Tableau IV.10. Comparaison entre les modèles développés en termes du coefficient de détermination pour les deux facteurs de réponse (Ra et Fz).....	123

Tableau IV.11. Comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs estimées par les modèles RSM et ANN pour les deux facteurs de réponse (<i>Ra</i> et <i>Fz</i>).....	124
--	-----

Chapitre V

Tableau V.1. Exemple sur un plan factoriel incomplet de Taguchi $L_8(2^7)$	131
Tableau V.2. Exemple sur un plan factoriel incomplet de Taguchi $L_{18}(2^1 \times 3^3)$	132
Tableau V.3. Exemple sur un plan de Taguchi $L_{16}(4^3)$	132
Tableau V.4. Résultats expérimentaux et analyse de Taguchi (S/N) pour <i>Ra</i> et <i>MRR</i>	133
Tableau V.5. Conditions d'optimisation pour l'objectif de la qualité.....	137
Tableau V.6. Principaux résultats d'optimisation pour l'objectif de la qualité.....	138
Tableau V.7. Conditions d'optimisation pour l'objectif de la productivité.....	140
Tableau V.8. Principaux résultats d'optimisation pour l'objectif de la productivité	141
Tableau V.9. Conditions d'optimisation pour l'objectif combiné.....	143
Tableau V.10. Principaux résultats d'optimisation pour l'objectif combiné.....	143
Tableau V.11. Paramètres d'optimisation	148
Tableau V.12. Résultats d'optimisation	149
Tableau V.13. Paramètres optimaux obtenus par GA pour 35 générations	155

Glossaire

- r***: Rayon de bec, mm
- Vc*** : Vitesse de coupe, m/min
- f***: Avance par tour, mm/tr
- ap***: Profondeur de passe, mm
- Ra***: Écart moyen arithmétique de la rugosité, μm
- Rt***: Rugosité de surface totale, μm
- Rz***: Hauteur moyenne des irrégularités pour dix points, μm
- Rq***: Rugosité quadratique, μm
- Fz***: Effort de coupe tangentiel, N
- Fv***: Effort de coupe axial, N
- Fr***: Effort de coupe radial, N
- P***: Puissance de coupe, W
- MRR***: Débit de copeau enlevé, cm^3/min
- Ks***: Force de coupe spécifique, MPa
- RSM***: Méthodologie de la surface de réponse
- ANOVA***: Analyse de variance
- ANN***: Réseau de neurone artificiel
- PCA***: analyse des composantes principales
- GFRP***: Polymères renforcés en fibres de verre
- SFRTP***: Thermoplastiques renforcés par des fibres courtes
- Di***: Fonction de désirabilité