



République Algérienne Démocratique & populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Mémoire de Magister



Département de Génie Mécanique

Contribution à l'étude de l'usinage des matériaux polymères

Option : Mécanique des matériaux

Présenté par :

ZAIDI Ahmed

Devant le jury composé de MM :

A. BEZZAZI

Pr. à l'université de Guelma

Président

M.A YALLESE

Pr. à l'université de Guelma

Rapporteur

H. HAMADACHE

MC/ A à l'université d'Annaba

Examineur

A. BELBAH

MC/ A à l'université de Guelma

Examineur

REMERCIEMENTS

Je saisis cette occasion pour remercier mon encadreur le professeur M.A. YALLESE pour ses conseils.

Je remercie aussi monsieur le professeur **BEZZAZI A.Rezak** pour avoir présidé le jury.

Mes remerciements vont également à monsieur **HAMADACHE .H**, et à monsieur **BELBAH .A** pour leur participation au jury.

Que toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail trouvent ici ma reconnaissance la plus sincère MM : **Mohamed AIB** et **A/Aziz MADI**.

Je voudrais remercier de tout mon cœur tout le personnel du LMS que j'ai connu au cours de ces deux années, pour les discussions scientifiques mais aussi amicales.

J'exprime ma profonde gratitude à toute ma famille pour son soutien et particulièrement remercier mes parents, ma femme et mon fils **Louai**.

ملخص

البوليمير يلعب دورا هاما للغاية في الصناعات اليومية ، وهو موجودة في العديد من القطاعات الصناعية . هذا الأخير يندرج ضمن المواد التي تصادفنا صعوبات كبيرة أثناء تشغيلها أو انجاز قطعة منها باستعمال آلة الخراطة و ذلك بسبب الخصائص الفيزيائية والميكانيكية الخاصة به. من هنا، ومن المثير العثور على شروط قطع الخاصة بها، بحيث تكون أدوات القطع مثمرة و ذات كفاءة عالية أثناء تشغيل هذا البوليمير. عملنا يندرج ضمن هذا السياق ، وينقسم إلى قسمين .

الجزء الأول يعالج تأثير مختلف شروط القطع (سرعة القطع، سرعة التغذية، عمق التمريرة والتبريد أثناء التشغيل) في قوى القطع، الضغط النوعي و خشونة السطح أثناء تشغيل البولياميد PA6 بأداتا قطع من الكريبد المعدني وفقا لمستوى أحادي المتغير.

أما الجزء الثاني من العمل فيتعلق بدراسة إحصائية وصولا إلى نماذج رياضية لخشونة السطح وقوى القطع. تحقيقا لهذه الغاية أنجزنا مستويين أو جدولين مصممان على الجدول الكامل لتاجوشى (27 تجربة)، الجدول الأول للتشغيل الجاف والثاني للتشغيل باستعمال التبريد، تم إجراء التحليل الإحصائي اعتمادا على التحليل التبايني (ANOVA) و منهجية مساحات الاستجابة (RSM). وتظهر النتائج أن عمق القطع هو العامل الأكثر تأثيرا على القوات القطع وان القيم المنخفضة للقوات القطع قد سجلت خلال التشغيل باستعمال التبريد مع ادات SPMR ، متبوعا بالتشغيل الجاف بنفس الأداة مما يبين أن كاسرات الرقاكات لها تأثير ايجابي على قوى القطع وكذلك على خشونة السطح.

Résumé

Les polymères jouent un rôle extrêmement important dans l'industrie d'aujourd'hui, ils sont présents dans de nombreux secteurs industriels. Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques physiques et mécaniques. De là, il est très intéressant de trouver des conditions du régime de coupe où les outils de coupe peuvent productivement et efficacement usiner ces polymères. Notre travail rentre dans ce cadre, il est divisé en deux parties.

La première partie traite l'influence des paramètres d'usinage (V_c , f , a_p , et lubrification) sur les efforts de coupe, les pressions spécifiques et la rugosité de surface lors de l'usinage du polyamide PA6, avec deux carbures métalliques suivant un plan unifactorielle.

La deuxième partie du travail, concerne la modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe. A cet effet nous avons réalisé deux plans d'expérience de 27 essais (plan factoriel complet) pour un usinage à sec et lubrifier. Une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été effectuée et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques de la rugosité et des efforts pour d'éventuelles prédictions. Les résultats trouvés montrent que la profondeur de passe est le paramètre le plus influent sur les efforts de coupe, et les faibles valeurs des efforts de coupe a été enregistrés lors l'usinage lubrifié avec la nuance SPMR (brise-copeaux), suivie par l'usinage à sec, ce qui montre que la présence de brise-copeaux influe positivement sur les efforts de coupe et la qualité de surface.

Mots-clés: *tournage, brise-copeaux, rugosité de surface, analyse de variance, méthodologie de surface de réponse (RSM), modélisation, plan d'expérience, plan unifactorielle.*

Abstract

Polymers play an extremely important role in the industry today; they are present in many industrial sectors. These present difficulties when cutting because of their physical and mechanical properties. From there, it is very interesting to find conditions of cutting regime where the cutting tools can productively and efficiently machine these polymers. Our work falls within this context; it is divided into two parts.

The first part deals with the influence of machining parameters (V_c , f , p , and lubrication) on cutting forces, specific pressures and surface roughness during machining of PA6 with two metal carbides following univariate plan.

The second part of the work concerns the modeling of surface roughness and cutting forces. To this end we conducted two experimental designs of 27 trials (full factorial design) for dry machining and lubrication. A statistical analysis of the results based on the analysis of variance (ANOVA) and response surface methodology (RSM) was performed and this in order to provide mathematical models of roughness and effort for any predictions. The obtained results show that the depth of cut is the most influential parameter on the cutting forces and low values of cutting forces was recorded during machining lubricates with SPMRs shade (Breaker), followed by dry machining, which shows that the presence of chip breaker positively influences the cutting forces and surface quality.

Keywords: *machining, chipbreaker, surface roughness, analysis of variance, response surface methodology (RSM), modeling, experimental design, univariate level.*

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 7 |
| Chapitre I Étude Bibliographique | |
| I-1 Introduction | 10 |
| I-2 Généralité sur la coupe des métaux | 10 |
| I-3 Définition de l'usinabilité | 11 |
| I-3.1 Critères d'évaluation de l'usinabilité | 11 |
| I-3.2 Facteurs influençant l'usinabilité | 12 |
| I-3.2.1 La résistance mécanique | 12 |
| I-3.2.2 Les caractéristiques thermiques | 12 |
| I-3.3 Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils | 13 |
| I-3.3.1 Essai d'usure de longue durée à vitesse constante | 13 |
| I-3.3.2 Essai d'usure à vitesse croissante | 13 |
| I-4 Les polymères | 13 |
| I-4.1 Définition | 13 |
| I-4.2 Noms courants | 14 |
| I-4.3 Abréviations de nomination | 14 |
| I-4.4 Classifications des polymères | 15 |
| I-4.4.1 Selon la structure chimique et la microstructure | 15 |
| I-4.4.2 Selon la structure des polymères | 16 |
| I-4.4.3 Selon l'origine, on peut classer les polymères en trois groupes | 17 |
| I-4.4.4 Selon le mode de synthèse | 18 |
| I-4.4.5 Selon les propriétés | 18 |
| I-4.4.6 Selon l'importance économique | 19 |
| I-4.4.7 Selon l'utilisation | 20 |
| I-5 Les matériaux composites a matrice polymère | 20 |
| I-5.1 Les matrices polymères | 20 |
| I-5.2 Les renforts | 21 |
| I-6 Domaines d'utilisation | 23 |
| I-7 Mise en œuvre des polymères | 24 |
| I-7.1 Comportement des polymères vis-à-vis de l'usinage | 25 |
| I-7.1.1 La dilatation et la conductivité thermique | 26 |
| I-7.1.2 Le module d'élasticité et la dureté | 26 |
| I-7.1.3 Les contraintes internes | 26 |
| I-7.1.4 L'usure des outils | 27 |
| I-7.1.5 L'hygrométrie | 27 |
| I-7.1.6 L'électrostatique | 27 |
| I-7.2 Usinage des polymères | 27 |
| I-8 paramètres d'usinage du polyamide PA6 | 29 |
| I-8.1 définition des critères de Rugosité | 30 |
| I-8.2 Les efforts de la coupe | 32 |
| I-8.3 Effort spécifique de coupe (pression de coupe) | 33 |

| | |
|---|----|
| I-8.4 La puissance de coupe | 34 |
| I-9 Travaux de recherches concernant l'usinage des plastiques (polymères) | 35 |
| I-10 Position du problème | 43 |

Chapitre II Procédure expérimentale

| | |
|--|----|
| II-1 Introduction | 45 |
| II-2 Matériels utilisés | 45 |
| II-2.1 Machine-outil | 45 |
| II-2.2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage | 45 |
| II-2.2.1 propriétés techniques du ZELLAMID 202(PA6) | 47 |
| II-2.3 Plaquettes de coupe | 48 |
| II-2.4 Porte outil | 48 |
| II-2.5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe | 49 |
| II-2.5.1 Chaîne de mesure et caractéristiques | 51 |
| II-2.6 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité | 52 |
| II-2.7 STANDARD GAGE - VISUAL 250 | 53 |
| II-2.8 Autres équipements | 54 |
| II-3 Conditions de coupe | 54 |
| II-4 Planification des expériences | 55 |
| II-4.1 Méthode de planification des expériences | 55 |
| II-5 Conclusion | 57 |

Chapitre III Étude de l'Usinabilité du polyamide PA6

| | |
|--|----|
| III-1 Introduction | 59 |
| III-2 Essais réalisés | 59 |
| III-3 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe | 60 |
| III-3.1 Influence de la vitesse de coupe | 60 |
| III-3.2 Influence de l'avance | 63 |
| III-3.3 Influence de la profondeur de passe | 66 |
| III-4 Evolution des pressions de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe | 69 |
| III-4.1 Influence de la vitesse de coupe | 70 |
| III-4.2 Influence de l'avance | 71 |
| III-4.3 Influence de profondeur de passe | 73 |
| III-5 Evolution de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe | 75 |
| III-5.1 Influence de la vitesse de coupe | 76 |
| III-5.2 Influence de l'avance | 78 |
| III-5.3 Influence de la profondeur de passe | 81 |
| III- 6 Evolution de la rugosité en fonction du temps | 82 |
| III-7 Morphologie du copeau | 85 |
| III-7.1 Introduction | 85 |
| III-7.2 Impact des conditions de coupe sur la morphologie du copeau | 85 |
| III-7.3 l'effet de la présence de brise coupeaux dans la plaquette de coupe sur la formation de copeau | 87 |
| III-8 Conclusion. | 88 |

Chapitre IV Modélisation de la rugosité et des efforts de coupe

| | |
|---|----|
| IV-1 Introduction | 90 |
| IV-2 Modélisation des efforts de coupe et de la rugosité pour l'usinage a sec | 90 |

| | |
|---|-----|
| <i>IV-2.1 Analyse des efforts de coupe</i> | 92 |
| <i>IV-2.1.1 Modélisation de l'effort axial F_x</i> | 92 |
| <i>IV-2.1.2 Modélisation de l'effort radial F_y</i> | 98 |
| <i>IV-2.1.3 Modélisation de l'effort tangentiel F_z</i> | 104 |
| <i>IV-2.2 Analyse des critères de la rugosité</i> | 110 |
| <i>IV-2.2.1 Analyse de la rugosité de surface R_a</i> | 110 |
| <i>IV-2.2.2 Modélisation de la rugosité de surface R_t</i> | 116 |
| <i>IV-3 Modélisation des efforts de coupe et de la rugosité pour l'usinage lubrifié</i> | 122 |
| <i>IV-3.1 Analyse des efforts de coupe</i> | 123 |
| <i>IV-3.1.1 Modélisation de l'effort axial F_x</i> | 123 |
| <i>IV-3.1.2 Modélisation de l'effort radial F_y</i> | 129 |
| <i>IV-3.1.3 Modélisation de l'effort tangentiel F_z</i> | 135 |
| <i>IV-3.2 Analyse des critères de la rugosité</i> | 141 |
| <i>IV-3.2.1 Analyse de la rugosité de surface R_a</i> | 141 |
| <i>IV-3.2.2 Analyse de la rugosité de surface R_t</i> | 147 |
| <i>IV-4 Conclusion</i> | 153 |
| <i>Conclusion générale</i> | 156 |
| <i>Perspectives</i> | 158 |
| <i>Nomenclature</i> | 159 |
| <i>Références bibliographiques</i> | 160 |

Liste de figures

| Figure | page |
|---|-------------|
| Figure I-1 Différents types de macromolécules a) linéaire (PE ; b) ramifiée (PE) ; c) graphite ; d) réseau. | 16 |
| Figure I-2 Enchaînement des unités constitutives dans un copolymère. | 16 |
| Figure I-3 Configurations du polypropylène. | 16 |
| Figure I-4 Formation d'un polymère. | 17 |
| Figure I-5a Les principaux groupes de polymères. | 18 |
| Figure I-5b Classification des plastiques. | 19 |
| Figure I-6 Schéma général de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques. | 24 |
| Figure I-7 Distribution des sources de chaleur en coupe orthogonale. | 26 |
| Figure I-8 définit différent angle d'un outil de tour. | 29 |
| Figure I-9 Critères de rugosité. | 31 |
| Figure I-10 Hauteur des irrégularités sur dix points Rz. | 31 |
| Figure I-11 Écart moyen arithmétique du profil Ra. | 32 |
| Figure I-12 représentation graphique des efforts de coupe. | 33 |
| Figure I-13 La relation entre Ra et la vitesse d'avance a)outil avec rayon de bec =1 ; b) outil avec rayon de bec =0,4. | 36 |
| Figure I-14 La relation entre Ra et la vitesse de coupe a) outil avec rayon de bec =1 ; b) outil avec rayon de bec =0,4. | 36 |
| Figure I-15 Exemples d'évolution d'efforts de coupe pour la PA66GF ($V_c=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev) :(a) outil de PCD; (b) K10 & (c) outil de diamant CVD. | 37 |
| Figure I-16 Représentation de rapport F_f/F_c pour plusieurs types d'outil et les deux des matériaux ($V_c=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev). | 37 |
| Figure I-17 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance (V , $a_p = \text{const}$), pour l'ébauchage. | 39 |
| Figure I-18 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance pour tournage de finition. | 39 |
| Figure I-19 Influence de paramètre de coupe sur la l'effort de coupe. | 40 |
| Figure I- 20 L'évolution de la rugosité de surface en fonction d'orientation des fibres. | 42 |
| Figure II-1 Tour parallèle modèle SN40C. | 45 |
| Figure II-2 Eprouvettes pour différents essais. | 46 |
| Figure II-3 Photos des plaquettes de coupe utilisées. | 48 |
| Figure II-4 différentes angles de coupe. | 49 |
| Figure II-5 Porte outil utilisé. | 49 |
| Figure II-6 Montage du dynamomètre sur la table de la machine. | 50 |
| Figure II-7 Capteur d'effort de coupe KISTLER . | 50 |

| | |
|---|----|
| Figure II-8 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ». | 51 |
| Figure II-9 Chaîne de mesure des efforts de coupe. | 52 |
| Figure II-10 Mesure de rugosité sans démontage de la pièce. | 53 |
| Figure II-11 VISUAL 250 pour la mesure de l'usure. | 53 |
| Figure III-1 Exemple d'acquisition des efforts de coupe. | 60 |
| figure III-2 Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$. | 62 |
| Figure III-3 Comparaison entre les efforts enregistrés pour les deux expériences pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.2\text{mm}$. | 63 |
| Figure III-4 Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance; $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0.2\text{mm}$. | 65 |
| Figure III-5 Comparaison entre les deux régime de coupe ; $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{ mm}$ | 66 |
| Figure III-6 Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe; $V_c=110\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$. | 68 |
| Figure III-7 Comparaison entre les deux nuances de matériau de coupe ; $V_c=110\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$. | 69 |
| Figure III-8 Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse pour $f=0,08\text{mm/tr}$; $a_p=0,2\text{mm}$. | 71 |
| Figure III-9 Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance pour $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$. | 73 |
| Figure III-10 Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=110\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$. | 75 |
| Figure III-11 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour $V_c=110\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$. | 77 |
| Figure III-12 Comparaison entre les deux nuances de matériau de coupe ; $a_p=0,2$ m/min , $f=0,08\text{mm/tr}$. | 78 |
| Figure III-13 Evolution de la rugosité en fonction de l'avance par tour pour $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0,5\text{mm}$. | 80 |
| Figure III-14 Comparaison entre les deux nuances de matériau de coupe pour $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$. | 80 |
| Figure III-15 Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=110\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$. | 82 |
| Figure III-16 l'évolution de la rugosité en fonction du temps de coupe pour $V_c=110\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$ et $a_p=1\text{ mm}$. | 85 |
| Figure III-17 L'évolution de la vitesse sur la formation de coupeaux $f= 0,08$ $A_p=0,2$ mm . | 86 |
| Figure III-18 L'effet de la brise coupeaux sur la formation de coupeau $V_c=110$ m/min ; $f= 0,08$ $A_p=0,5\text{ mm}$. | 87 |
| Figure III-19 Phénomènes reconnaître dans l'usinage des plastiques. | 87 |
| Figure IV-1 Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur F_x . | 93 |
| Figure IV-2 Diagramme d'interaction pour F_x . | 94 |

| | |
|---|-----|
| Figure IV-3 <i>La surface de réponse de l'effort (F_x) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 97 |
| Figure IV-4 Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur F_y . | 99 |
| Figure IV-5 <i>Diagramme d'interaction pour F_y.</i> | 100 |
| Figure IV-6 <i>La surface de réponse de l'effort (F_y) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 103 |
| Figure IV-7 Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur F_z . | 105 |
| Figure IV-8 <i>Diagramme d'interaction pour F_z.</i> | 106 |
| Figure IV-9 <i>La surface de réponse de l'effort (F_z) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 109 |
| Figure IV-10 Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur R_a | 111 |
| Figure IV-11 <i>Diagramme d'interaction pour R_a.</i> | 112 |
| Figure IV-12 <i>La surface de réponse de l'effort (R_a) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 115 |
| Figure IV-13 Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur R_t . | 117 |
| Figure IV-14 <i>Diagramme d'interaction pour R_t.</i> | 118 |
| Figure IV-15 <i>La surface de réponse de l'effort (R_t) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 121 |
| Figure IV-16 Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur F_x | 124 |
| Figure IV-17 <i>Diagramme d'interaction pour F_x.</i> | 125 |
| Figure IV-18 <i>La surface de réponse de l'effort (F_x) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 128 |
| Figure IV-19 Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur F_y . | 130 |
| Figure IV-20 <i>Diagramme d'interaction pour F_y.</i> | 131 |
| Figure IV-21 <i>La surface de réponse de l'effort (F_y) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 134 |
| Figure IV-22 Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur F_z . | 136 |
| Figure IV-23 <i>Diagramme d'interaction pour F_z.</i> | 137 |
| Figure IV-24: <i>La surface de réponse de l'effort (F_z) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 140 |
| Figure IV-25 Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur R_a . | 142 |
| Figure IV-26 <i>Diagramme d'interaction pour R_a.</i> | 143 |
| Figure IV-27 <i>La surface de réponse de la rugosité de surface (R_a) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 146 |
| Figure IV-28 Graphes des effets principaux de V_c, f et ap sur F_z . | 148 |
| Figure IV-29 <i>Diagramme d'interaction pour R_t.</i> | 149 |
| Figure IV-30 <i>La surface de réponse de la rugosité de surface (R_t) en fonction de V_c, f, ap et les graphes de contour.</i> | 152 |

Liste des Equations

| <i>Equation</i> | <i>Page</i> |
|------------------|-------------|
| Equation (I-1) | 31 |
| Equation (I-2) | 31 |
| Equation (I-3) | 32 |
| Equation (I-4) | 33 |
| Equation (I-5) | 34 |
| Equation (I-6) | 34 |
| Equation (I-7) | 34 |
| Equation (I-8) | 34 |
| Equation (II-1) | 55 |
| Equation (III-1) | 69 |
| Equation (IV-1) | 92 |
| Equation (IV-2) | 93 |
| Equation (IV-3) | 98 |
| Equation (IV-4) | 99 |
| Equation (IV-5) | 104 |
| Equation (IV-6) | 105 |
| Equation (IV-7) | 110 |
| Equation (IV-8) | 111 |
| Equation (IV-9) | 116 |
| Equation (IV-10) | 117 |
| Equation (IV-11) | 124 |
| Equation (IV-12) | 124 |
| Equation (IV-13) | 129 |
| Equation (IV-14) | 130 |
| Equation (IV-15) | 134 |
| Equation (IV-16) | 136 |
| Equation (IV-17) | 141 |
| Equation (IV-18) | 142 |
| Equation (IV-19) | 147 |
| Equation (IV-20) | 148 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau | Page |
|---|-------------|
| Tableau I-1 Valeurs approximatives de la conductivité thermique pour une série de matériaux. | 12 |
| Tableau I-2 Nom et désignation des quelques matières plastiques. | 15 |
| Tableau I-3 Présentation de quelques polymères courants. | 15 |
| Tableau I-4 les charges en fonction de propriété désiré. | 23 |
| Tableau I-5 paramètres de coupes pour l'usinage des polyamides. | 30 |
| Tableau II-1 propriétés techniques. | 47 |
| Tableau II-2 Informations relatives aux plaquettes de coupe. | 48 |
| Tableau II-3 Caractéristiques de porte plaquette utilisé. | 48 |
| Tableau II-4 Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité (essais courte durée). | 54 |
| Tableau II-5 Conditions de coupe pour les essais de la rugosité en fonction du temps (essais longue durée). | 54 |
| Tableau II-6 Matrice de planification pour un plan 3^3 . | 56 |
| Tableau IV-1 Résultats de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe usinage sans lubrification. | 91 |
| Tableau IV-2 Résultats de l'analyse de la variance pour F_x . | 92 |
| Tableau IV-3 Résultats de l'analyse de variance pour F_y . | 98 |
| Tableau IV-4 Résultats de l'analyse de variance pour F_z . | 104 |
| Tableau IV-5 Résultats de l'analyse de variance pour R_a . | 110 |
| Tableau IV-6 Résultats de l'analyse de variance pour R_t . | 116 |
| Tableau IV-7 : Résultats de la rugosité et effort de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe lubrifié (Le tableau orthogonal standard de Taguchi L27; $N=3^3$). | 123 |
| Tableau IV-8 Résultats de l'analyse de variance pour F_x . | 123 |
| Tableau IV-9 Résultats de l'analyse de variance pour F_y . | 129 |
| Tableau IV-10 Résultats de l'analyse de variance pour F_z . | 135 |
| Tableau IV-11 Résultats de l'analyse de variance pour R_a . | 141 |
| Tableau IV-12 Résultats de l'analyse de variance pour R_t . | 147 |

Introduction générale

Introduction générale

Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets de la vie courante, dans lesquels ils ont souvent remplacé les substances naturelles, ils sont présents dans de nombreux domaines industriels (Automobile, l'aviation etc...). Parmi les types de ces polymères il y a les thermodurcissables, les élastomères et les thermoplastiques. Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques distinguées telles que le faible module d'élasticité, le taux d'absorption d'humidité, le coefficient de dilatation thermique élevé et les contraintes internes.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'usinabilité du polymère PA6 en utilisant deux plaquettes différentes. Ces plaquettes sont en carbure métallique et la seule différence entre eux, est la présence de brise coupeau.

La première partie est consacré a l'étude de l'évolution des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z), les paramètres de rugosité de la surface (R_a , R_t , R_z et R_q) et les pressions de coupe (K_x , K_y et K_z) en fonction des variables d'entrée (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, temps d'usinage et l'arrosage). La deuxième partie porte sur la détermination des modèles mathématiques traduisant l'évolution des différents phénomènes de la coupe en fonction des paramètres du régime de coupe.

Le mémoire de Magister est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux et sur un état d'art concernant l'usinage des différents polymères en appuyant sur les divers articles, revues et thèses. Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction sur l'usinabilité et la coupe des métaux, suivie par l'usinage des matériaux plastiques (polymères) et les matériaux de coupe et leurs caractéristiques et en dernier lieu nous avons présentée différents phénomènes intervenant dans la coupe.

Dans le deuxième chapitre nous avons défini une méthodologie de travail qui repose sur la planification des expériences. Nous avons présenté les conditions de coupe ainsi que les équipements et le matériel de mesure utilisé.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les résultats des différents essais réalisés tels que :

- L'évolution des efforts et des pressions de coupe en fonction des paramètres de coupe (f , V_c , a_p); avec deux régimes de coupe différent
- L'évolution de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe (f , V_c , a_p et temps de coupe).

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté une étude statistique (analyse de variance, interactions) basée sur la méthodologie de surface de réponse et cela dans le but de déterminer des modèles mathématiques qui permettent la prédiction de la rugosité, des efforts de coupe et cela en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , a_p et T_c).

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

Chapitre I
Étude Bibliographique

I-1 Introduction

L'interaction de l'outil de coupe avec la pièce, dans le but de l'enlèvement de la matière est appelée système MODOP. Un usinage plus rapide et plus efficace est très souhaitable et peut mener à l'épargne du temps et de l'argent. L'efficacité du procédé de l'enlèvement de la matière dépend de nombreux facteurs; parmi eux est l'outil de coupe, les vitesses de coupe, la géométrie de l'outil, la matière à usiner et le fluide de refroidissement qui est employé dans le processus [1].

Les opérations de tournage des matériaux synthétiques thermoplastiques techniques ne présentent pas de difficulté particulière. Comme pour toutes les autres opérations d'usinage, il est important de respecter le bon affûtage des outils, vitesses de coupe et d'avance. Dans la majorité des cas avec les thermoplastiques, les copeaux sont longs et doivent être rapidement dégagés pour éviter qu'ils s'enroulent sur les pièces. Avec les thermodurcissables, la matière s'usine plutôt avec des copeaux courts et des poussières, dans ce cas, des installations d'aspiration sont conseillées [2].

Dans ce chapitre, nous présentons une revue bibliographique qui est divisée en trois parties. La première est consacrée aux définitions de quelques phénomènes intervenants dans le processus de coupe, La seconde partie est dédiée aux matériaux polymères, à leur mode de synthèse, leur utilisation, leur propriétés physiques et mécaniques. On présente aussi dans cette partie les matériaux composites à matrice polymères avec une synthèse destinée à apporter les éléments nécessaires pour les travaux présentés dans ce mémoire. La troisième partie porte sur les différents travaux de recherche sur l'usinage des polymères.

I-2 Généralité sur la coupe des métaux

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

Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage [1].

I-3 Définition de l'usinabilité

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

Selon les auteurs [3] et [4]; l'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée.

I-3.1 Critères d'évaluation de l'usinabilité

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont: [3], [4].

- ✓ La durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps ;
- ✓ les conditions de coupe;
- ✓ les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe;
- ✓ le fractionnement du copeau ;
- ✓ l'état de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité;
- ✓ la productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités.

I-3.2 Facteurs influençant l'usinabilité

I-3.2.1 La résistance mécanique

On pense couramment que la résistance mécanique, ou la dureté qui lui est équivalente constitue un indice d'usinabilité significatif. En réalité, des aciers dont la dureté est rendue plus élevés par un traitement de trempe et revenu au lieu d'un traitement de recuit, par contre pour les polymères les éléments d'addition jouent un rôle significatif comme dans le cas des polyamides PA6, l'ajout de 1% de charge bisulfure de molybdène, en comparaison avec le PA6 non chargé, les propriétés de glissement sont améliorées avec une résistance à la compression légèrement supérieure.

Le PA6 possède aussi une meilleure résistance à l'usure et une abrasion plus faible que le PA6 non chargé. L'absorption d'humidité est aussi plus faible, Donc on peut avoir une usinabilité meilleure dans l'état le plus dur. On rencontre alors des difficultés de trouver les conditions d'usinage due au changement brutal de caractéristique de la matière chargé avec des additifs.

I-3.2.2 Les caractéristiques thermiques

Le *tableau I-1* présente la conductivité thermique de quelques polymères comparé avec d'autres matériaux. Cette caractéristique est en relation étroite avec l'usinabilité car les polymères qui ont une conductivité réduite ne dissipent pas rapidement la chaleur générée lors de la coupe, ce qui conduit à la concentration de la chaleur au niveau du contact pièce-outil-copeau et par conséquent à la diminution de la qualité de surface usinée par l'effet de l'apport du métal sur l'outil de coupe.

| Matériau | Conductivité thermique W/(m.°K) |
|------------------|---------------------------------|
| Diamant | 900 ~ 2320 |
| Argent | 429 |
| Cuivre | 380 |
| Or | 318 |
| Aluminium | 200 |
| Acier inoxydable | 12,11 ~ 45,0 |
| Zellamid 250 XPE | 0,27 |
| PEEK | 0,25 |
| Zellamid 202 PA6 | 0,23 |

*Tableau I-1 Valeurs approximatives de la conductivité thermique
Pour une série de matériaux.*

I-3.3 Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils

I-3.3.1 Essai d'usure de longue durée à vitesse constante

Pour des conditions de coupe déterminées, on effectue des essais à des vitesses de coupe différentes, et on relève la durée de vie de l'outil, on effectue ainsi plusieurs essais. Cette méthode classique est très sûre, mais elle est assez longue et laborieuse et exige une quantité assez considérable de matière à usiner et plusieurs outils.

I-3.3.2 Essai d'usure à vitesse croissante:

Afin d'abréger la durée des essais et réduire la consommation du métal, on fait travailler l'outil jusqu'à détérioration de l'arête (ou jusqu'à un degré d'usure déterminé), avec des vitesses croissantes suivant une loi bien déterminée:

- La croissance continue (par exemple: dressage sur tour d'une face plane, l'outil avance radialement).
- La croissance peut être obtenue par chariotage conique.
- Ou croissance par paliers, si le tour est équipé d'un variateur de vitesse.

I-4 Les polymères

I-4.1 Définition

Le centre d'étude des matières plastiques donne une définition acceptable qui est la suivante :

" Une matière plastique est un mélange contenant une matière de base qui est susceptible d'être moulé ou qui a été moulé. La matière de base est en général un mélange de macromolécules au hauts polymères organiques ou semi-organique à caractère résineux, résultat le plus souvent d'une réaction naturelle ou artificielle de polycondensation ou de polymérisation " [5].

I-4.2 Noms courants

Pour certains polymères, l'usage a consacré une terminologie, bien que celle-ci soit souvent imprécise. Ainsi, le poly (hexaméthylène adipamide) est universellement connu sous le nom de polyamide PA6. Certains noms courants sont en fait des noms commerciaux. Par exemple, le polyamide PA6 est également appelé Nylon 6-6, du nom de la marque commerciale de *ZELLAMID 250 MO* [6].

I-4.3 Abréviations de nomination

Les polymères peuvent être désignés de façon abrégée, à l'aide de sigles anglo-saxons

Tableau I-2.

Ainsi, dans le langage courant, on parle beaucoup plus de PVC pour Poly (VinylChloride) que de PCV poly (chlorure de vinyle) [6].

| <i>Désignation</i> | <i>Appellation</i> | <i>Appellation commerciale</i> |
|--------------------|----------------------------------|--|
| PA 6 | Polyamide 6 | Nylon, Ertalon, Nylatron, Akulon, Durethan, Sniamid, Ultramid B, Orgamide, zellamid 202. |
| PA 6G | Polyamide 6G | Ertalon 6 XAU+, Ertalon LFX, Nylatron MC 901, Nylatron NSM, Ultralon. |
| PA 11 | Polyamide 11 | Rilsan, Ertalon 11 SA; Grilon . |
| PA 12 | Polyamide 12 | Vestamid, Grilon, zellamid 1200. |
| PA 66 | Polyamide 66 | Nylon 66, Ertalon 66 SA, Celanese, Nylatron, Vydyne, Ultramid A; Zytel, Maranyl A, Minlon, Technyl, zellamid 250. |
| PC | Polycarbonate | Axxis PC; Lexan; Makrolon; Erta PC; Xantar; Panlite; Calibre; Durolon; Novarex; Sinvet. |
| PEBD | Polyéthylène Basse Densité | Lupolan, Vestolen, Hostalengur. |
| PEHD | Polyéthylène Haute Densité | Ertalen HD, Cesticolor, Cestidur, Cestitech, Cestiguide, Cestishield, Borolène Cestilite, Ultrawear, Alathon, Alcathène, Baylon, Bluemax, Celene, Cestilène, Dekalen, Dylan, Eltex, Hostalen, Lotrene, Polydur, Robalon, Supralen. |
| PEEK | Polyéther- éthercétone | Victrex-PEEK, Ketron. zellamid 1500 |
| PVC | PVC Polychlorure de vinyle | Armodur, Trovidur, Hostalit, Bréon, Vinoflex, Simona, Astralon, Benvic, Corvic, Ekavyl, Gedevyl, Géon, Irvinyl, Lucoflex, Marvinol, Rhodopas, Sicron, Solvic, Supradur, Trovidur, Vestolit, Vinnol, Vinopac, Welvic. |
| PI | Polyamide | Kinel, Vespel, Kapton, zellamid 2200. |

| | | |
|------|-----------------------------|---|
| PMMA | Polyméthacrylate de méthyle | Altuglass, Plexiglass, Casocryl, Transpalite, Perspex (sous forme de feuilles), Orgalan, Sustonat, Jupilon, Campco C119, Lucite, Diakon. |
| PP | Polypropylène | Ertalène PP, Hostalen PP, Vestalen, Novolen, Napryl, Eltex, Moplen, Coroflex, Daplen, Escon, Lotren P, Noblen, Poly-pro, Propathène, Profax, Propylex, Prylène, Rhiamer PP, Symalen, Trolen, Trovidur PP. |

Tableau I-2 Nom et désignation des quelques matières plastiques [7].

| Nom sigle synthèse | Monomères | Unité constitutive |
|---|---|---|
| Polyéthylène PE polymérisation | éthylène $CH_2 = CH_2$ | $-CH_2 - CH_2 -$ |
| Polypropylène PP polymérisation | propylène $CH_2 = \underset{\begin{array}{c} \\ CH_3 \end{array}}{CH}$ | $-CH_2 - \underset{\begin{array}{c} \\ CH_3 \end{array}}{CH} -$ |
| Poly (chlorure de vinyle) PVC polymérisation | chlorure de vinyle $CH_2 = \underset{\begin{array}{c} \\ Cl \end{array}}{CH}$ | $-CH_2 - \underset{\begin{array}{c} \\ Cl \end{array}}{CH} -$ |
| Polystyrène PS Polymérisation | styrène $CH_2 = \underset{\begin{array}{c} \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}}{CH}$ | $-CH_2 - \underset{\begin{array}{c} \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}}{CH} -$ |
| Polyamide 6-6 PA6-6 polycondensation | acide adipique $HOOC - (CH_2)_4 - COOH$ examéthylène diamine $H_2N - (CH_2)_6 - NH_2$ | $-NH - (CH_2)_6 - NH$ $-CO - (CH_2)_4 - CO -$ |
| Poly (téréphtalate d'éthylène) PET polycondensation | acide téréphtalique $HOOC - \text{C}_6\text{H}_4 - COOH$ éthylène glycol $HO - CH_2 - CH_2 - OH$ | $-O - CH_2 - CH_2 - O$ $-CO - \text{C}_6\text{H}_4 - CO -$ |

Tableau I-3 Présentation de quelques polymères courants [6].

I-4.4 Classifications des polymères

Les polymères peuvent être classés selon divers critères, qui ne s'excluent pas les uns les autres [6] :

I-4.4.1 Selon la structure chimique et la microstructure : nous ne présentons ici que les éléments intervenants dans la classification :

- ✓ **constitution** : polymères à chaîne carbonée ou non (silicones), homo- et copolymères;
- ✓ **dimensionnalité** : polymères linéaires, ramifiés, réticulés ;

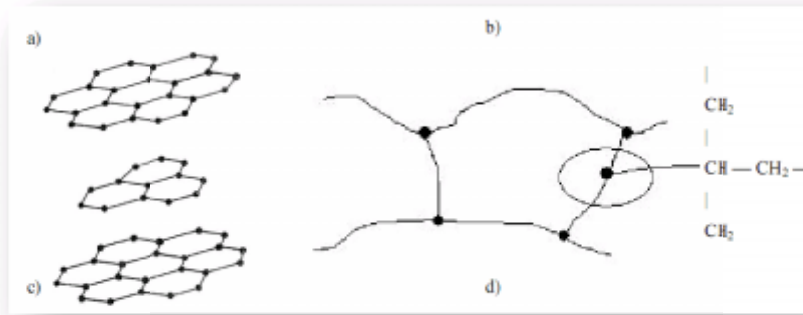


Figure I-1 Différents types de macromolécules [6]
 a) linéaire (PE ; b) ramifiée (PE) ; c) graphite ; d) réseau.

✓ **enchaînements des unités constitutives dans les copolymères** : copolymères statistiques, alternés, à blocs, greffés

| | |
|-------------|---------------------------------------|
| • Aléatoire | - AABABABBBABAABABBABAA - |
| • Alterné | - ABABABABABABAB - |
| • A blocs | - AA.....AA - BB.....BB - AA.....AA - |
| • Greffé | - AAA.....AAA.....AAA.....A - |
| | |
| | B B B |
| | B B B |

Figure I-2 Enchaînement des unités constitutives dans un copolymère, [6].

✓ **Configuration** : isotactique, syndiotactique, atactique ;

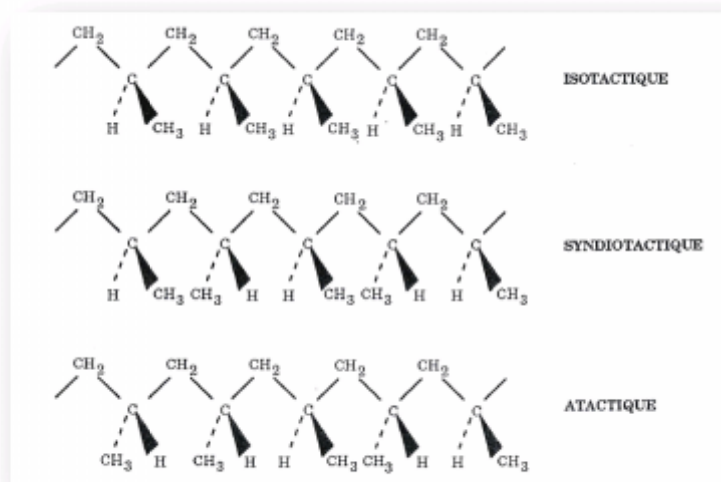


Figure I-3 Configurations du polypropylène, [6].

I-4.4.2 Selon la structure des polymères : on peut les classer en quatre types d'état :

✓ **l'état amorphe**, dans lequel les arrangements moléculaires n'ont pas d'ordre prédéfini. Les macromolécules ont enchevêtrées en pelotes. Cette absence d'ordre engendre une absence de point de fusion, l'existence d'une température de transition

vitreuse qui marque le passage d'un état vitreux (où le matériau se comporte comme un verre, c'est-à-dire dur et cassant) à un état caoutchoutique (où les chaînes peuvent glisser plus facilement), ainsi qu'une transparence dans le visible comme cela est le cas du polystyrène « cristal » ou du poly (chlorure de vinyle) « cristal » qui sont tous deux amorphes.

✓ **l'état amorphe orienté**, où les arrangements moléculaires sont tous orientés dans la même direction.

✓ **l'état cristallin**, caractérisé par un arrangement organisé des molécules. Les chaînes s'organisent de façon ordonnée et compacte. Le cristal polymère est décrit par son réseau et son motif. Le réseau caractérise la périodicité dans les trois directions de l'espace. Les principales caractéristiques de l'état cristallin sont une compacité supérieure à celle de la phase amorphe, l'existence d'un point de fusion et l'absence de transition vitreuse, une rigidité supérieure à celle de la phase amorphe.

✓ **l'état semi cristallin**, qui associe à la fois un arrangement organisé et des zones amorphes, *figure I-4*.

On rencontre généralement soit des polymères amorphes, soit des polymères semi-cristallins.

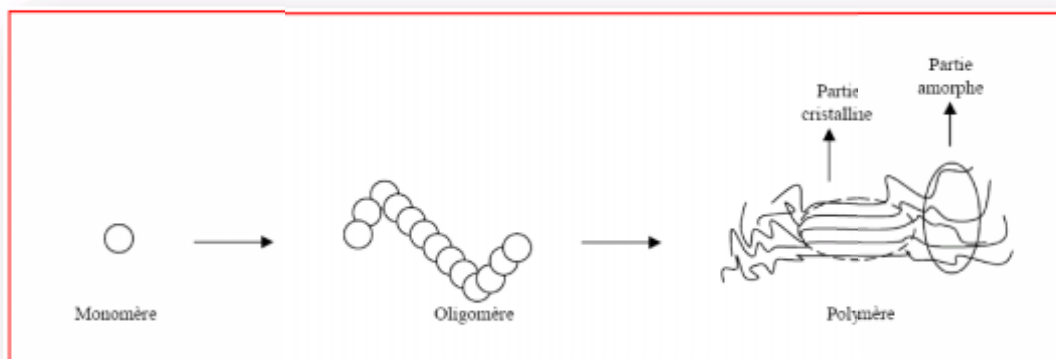


Figure I-4 Formation d'un polymère [8].

I-4.4.3 Selon l'origine, on peut classer les polymères en trois groupes

- ✓ les polymères naturels : cellulose, caoutchouc naturel, etc. ;
- ✓ les polymères artificiels, dérivés des polymères naturels : nitrate et acétate de cellulose, ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre) ;
- ✓ les polymères synthétiques, produits dans des réactions de polymérisation en chaîne ou de polycondensation.

I-4.4.4 *Selon le mode de synthèse* : polymérisats et polycondensats.

I-4.4.5 *Selon les propriétés* : une des propriétés mises en cause est l'influence d'une élévation de température. Une autre est le comportement élastique. Il en résulte qu'on distingue trois grandes familles *figure I-5(a et b)*.

✓ **les thermoplastiques** : qui sont des composés formés par addition et fondent lorsqu'on les chauffe. Ce sont des matières transformables à l'état fondu. Dans la plupart des procédés de fabrication, les thermoplastiques sont chauffés, puis formés par moulage, injection, extrusion ou thermoformage, avant d'être refroidis afin que le produit fini conserve sa forme. On trouve aujourd'hui de nombreux types de thermoplastiques offrant une vaste gamme de propriétés intéressantes. On peut les rendre aussi souples que le caoutchouc, aussi rigides que le métal et le béton, ou aussi transparents que le verre, pour un usage dans de nombreux produits de tuyauterie et autres composants. Certains d'entre eux peuvent supporter des températures atteignant 315 °C. D'autres conservent leurs propriétés jusqu'à -73 °C. Ils ne s'oxydent pas, ont une haute résistance à la corrosion et sont d'excellents isolants thermiques et électriques. De par leur légèreté, leur haute résistance mécanique et leur résistance aux effets de l'environnement, les thermoplastiques constituent un matériau idéal pour de très nombreuses applications. Dans cette catégorie de polymères, on distingue entre autres le polyéthylène basse et haute densité (PE), le polystyrène (PS), le polychlorure de vinyle (PVC), le polypropylène (PP), le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), le polyamide (PA), le polycarbonate (PC), les polyesters saturés, ...

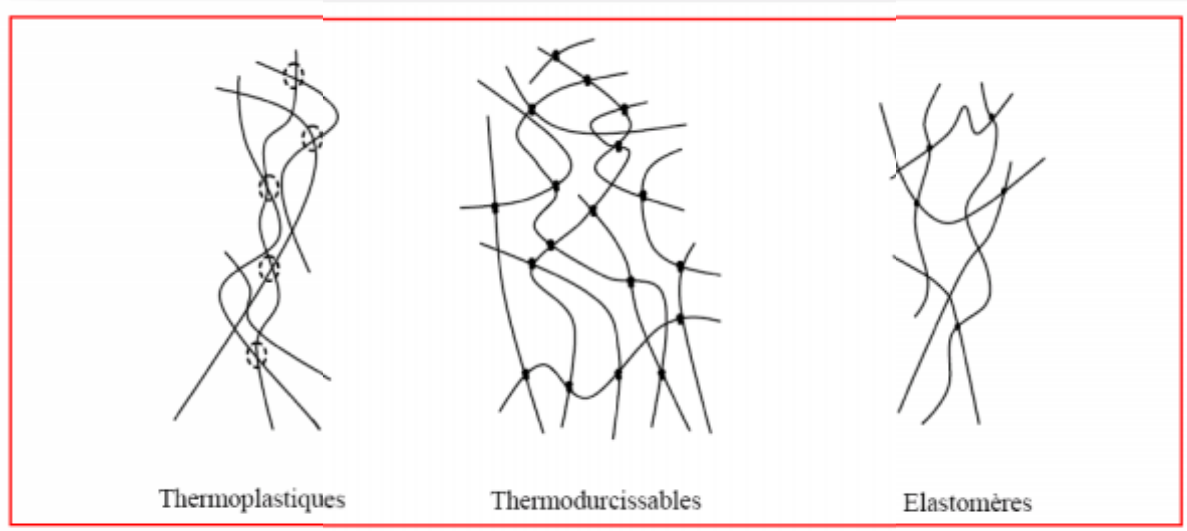


Figure I-5a Les principaux groupes de polymères [8].

Les polymères réticulés à structure tridimensionnelle, subdivisés en deux catégories: les thermodurcissables à haut degré de réticulation et les élastomères.

✓ **Les thermodurcissables** : durcissent quand on les chauffe. Ils sont très employés comme pièces de structure thermostable. On les met en forme lorsqu'ils sont encore à l'état mou. Les réticulations et pontages ont lieu dans toutes les directions, empêchant tout ordre d'orientation, provoquant l'isotropie du matériau. Cela ressemble à un enchevêtrement de lianes s'accrochant les unes aux autres par des tentacules en de multiples points. Ils sont généralement utilisés dans l'automobile, l'aéronautique, l'aéronavale, les équipements de ski, ... On distingue les polyesters insaturés, les résines phénoliques ou les résines époxy.

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

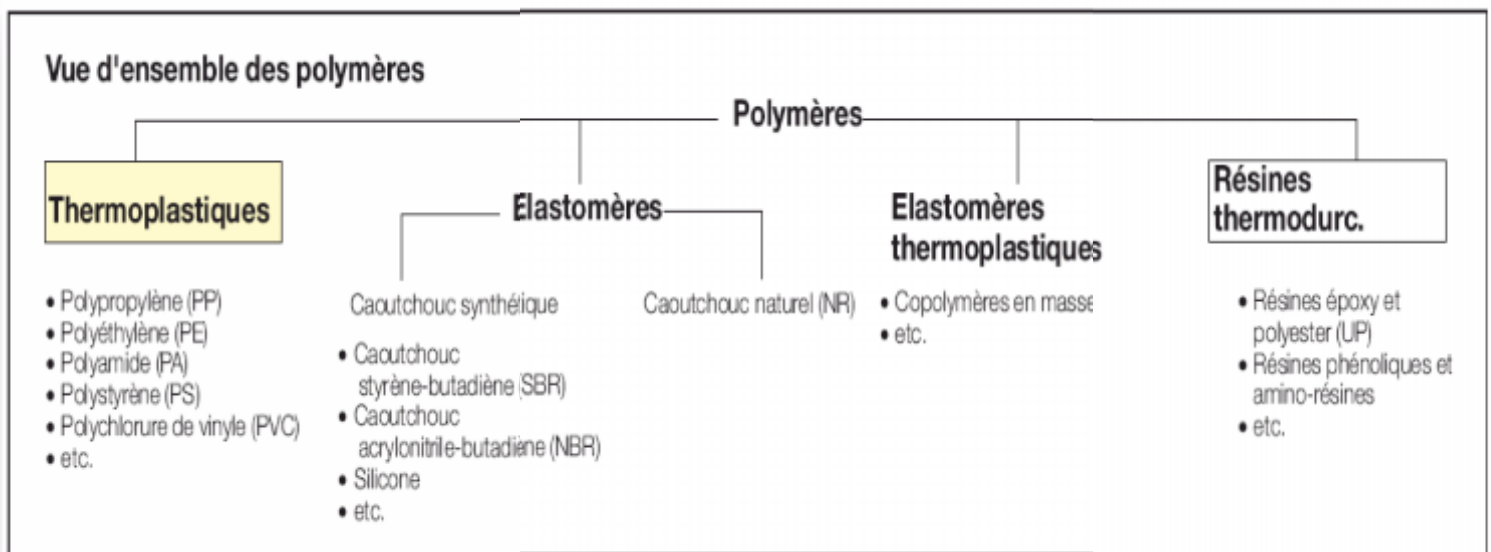


Figure I-5b Classification des plastiques [9].

I-4.4.6 Selon l'importance économique: pour les polymères comme pour tout produit industriel, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix. Ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux :

✓ **Les polymères de grande diffusion**, dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible. Exemples: PE, PP, PS, PVC.

✓ **Les polymères à hautes performances**, dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés.

✓ **Les polymères techniques**, dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes, exemples : polyamides, PET.

I-4.4.7 Selon l'utilisation: colles et adhésifs, peintures, vernis, mastics, matières plastiques, caoutchoucs, fibres textiles, mousses, etc.

En fonction du cycle de vie: matériaux jetables (durée de vie inférieure à un an), durables (1 à 20 ans), pour infrastructure (durée de vie supérieure à 20 ans).

I-5 Les matériaux composites a matrice polymère

D'une manière générale, les propriétés d'un polymère seul sont insuffisantes pour conférer à l'objet que l'on veut fabriquer toutes les propriétés souhaitées en terme de rigidité, résistance mécanique, légèreté ou autre propriété physico-chimique, électrique, optique.

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice. La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite. La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons. Nous ne présenterons pas ici une revue exhaustive sur les matériaux composites mais nous nous concentrerons sur ceux dont la matrice est constituée d'un polymère [8].

I-5.1 Les matrices polymères

Le rôle de la matrice polymère est de recevoir les renforts, répartir les contraintes, apporter la tenue de la structure et donner la forme désirée au composite. On peut utiliser

des polymères thermoplastiques ou des polymères thermodurcissables tels que ceux qui ont été présentés précédemment dans ce chapitre.

Les thermoplastiques se présentent sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme et les refroidir pour les fixer. Cette opération est réversible. Les matrices thermoplastiques ont de faibles propriétés mécaniques; un renforcement par l'incorporation de charge leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Les matrices les plus courantes sont le poly (chlorure de vinyle) qui est utilisé dans la fabrication des tuyauteries, le poly (acétate de vinyle) que l'on trouve dans les colles et adhésifs, le polyéthylène dont on se sert pour fabriquer les jouets, les bouteilles de shampoing ou les sacs de supermarchés, le polypropylène pour les boîtes alimentaires ou les revêtements de sols, le polystyrène qui intervient dans la composition des contenants alimentaires, de la vaisselle jetable, des jouets ou des vitres.

Les thermodurcissables durcissent de façon définitive lors de leur synthèse. La transformation est donc irréversible. Ce sont les matrices les plus utilisées dans la production de matériaux composites. On trouve les résines polyester qui, associées à des fibres de verre ont une bonne tenue à la température et aux agents chimiques, les résines époxy qui possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et chimiques, et les résines phénoliques qui résistent bien au feu [8].

I-5.2 Les renforts

L'incorporation d'une charge au sein d'une matrice permet d'agir sur plusieurs propriétés du matériau composite formé:

- ✓ Propriétés physico-chimiques (résistances aux produits acido-basiques...).
- ✓ Propriétés mécaniques (résistances aux chocs, à la compression, aux cisaillements...).
- ✓ Propriétés électriques (amélioration de la conductivité ou de la résistance),
- ✓ Facilité de mise en œuvre.
- ✓ Réduction du coût....
- ✓ Les renforts sont répartis en trois familles qui sont:
 - Les charges organiques: ce sont des polymères qui peuvent apporter une bonne tenue mécanique.

- Les charges minérales qui sont souvent utilisées comme additifs et permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du composite tout en réduisant son prix de revient.
- Les charges métalliques qui améliorent les propriétés électriques et thermiques du composite.

On peut également les classer selon leurs aspects. On distingue ainsi:

- les charges particulières renforçantes dont certaines peuvent permettre de modifier la masse volumique du composite, ses propriétés électriques, mécaniques et physicochimiques. Elles sont généralement de petites tailles et peuvent être sphériques, en paillettes.
- les charges particulières inertes qui, de par leur faible coût, réduisent le prix du composite. Ce sont essentiellement des minéraux comme le carbonate de calcium, la craie, la silice ou le kaolin. Ce type de charge peut éventuellement augmenter la dureté et la résistance à la rupture du composite.
- les fibres qui peuvent être minérales (verre, carbone, céramique) ou organiques, et conférer au composite un module de Young, une résistance à la rupture ou une conductivité électrique élevés.

Le **tableau I-4** rassemble les propriétés courantes qui peuvent être modifiées par l'incorporation, dans une matrice polymère, d'une charge telle que celles évoquées ci-dessus

| <i>Propriétés recherchées</i> | <i>Types de propriétés</i> | <i>Types de charges</i> |
|-------------------------------|---|--|
| <i>Mécaniques</i> | Résistance à l'abrasion | Carbure de silicium, oxyde d'aluminium, silice, métaux |
| | Force à l'impact | Fer, aluminium, fibres, particules d'élastomères |
| | Module de flexion | Carbonate de calcium, sulfate de calcium |
| | Résistance à la compression ou à la flexion | Silice, alumine, fer, aluminium, carbure de silicium |
| | Résistance à la traction | Fibres, métaux |
| <i>Electriques</i> | Résistance électrique | Alumine, silice, talc, mica |
| | Conductivité électrique | Or, argent, cuivre, électrolyte, aluminium, graphite |

| | | |
|--------------------------|---------------------------|---|
| Physico-chimiques | Résistance à la corrosion | Zinc |
| Nucléaire | Boucliers antiradiations | Plomb, carbure de bore |
| Thermiques | Transfert de chaleur | Aluminium, alumine, beryllium, silice, or, argent |
| | Réduction de chaleur | Fer, aluminium, silice |

Tableau I-4 les charges en fonction de propriété désiré [8].

I-6 Domaines d'utilisation

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

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

I-7 Mise en œuvre des polymères

La mise en œuvre des polymères thermoplastiques s'effectue selon le schéma général de la **Figure I-6**. Le polymère est mélangé à différents produits (stabilisants, lubrifiants, plastifiants, charges, etc.) pour élaborer une formulation qui se présente le plus souvent sous forme de poudre ou de granulés. Cette formulation est ensuite fondue (cas des polymères semi-cristallins) ou plastifiée (cas des polymères amorphes), à la fois par conduction thermique depuis les parois de l'outillage de mise en forme et par dissipation d'énergie mécanique. Cette matière liquide très visqueuse est ensuite forcée dans un outillage qui va donner une première forme au produit : tube, jonc, film, pièce injectée, etc. Cette matière thermoplastique mise en forme est alors refroidie, dans certains cas étirée et biétirée, pour obtenir le produit semi-fini. De ce processus de mise en forme, des paramètres d'étirage et de refroidissement, vont dépendre la microstructure du polymère, et donc ses propriétés [29].

Parmi les nombreuses techniques de mise en œuvre des polymères est l'usinage par des tours conventionnelles ou à commande numérique sa concerne principalement les produits longs (barres), en trouve aussi d'autres opérations d'usinage (perçage, fraisage, taraudage) dans la mise en œuvre des produits plats, comme elles précèdent souvent un assemblage à l'aide de moyens mécaniques: vis, boulons, rivets.

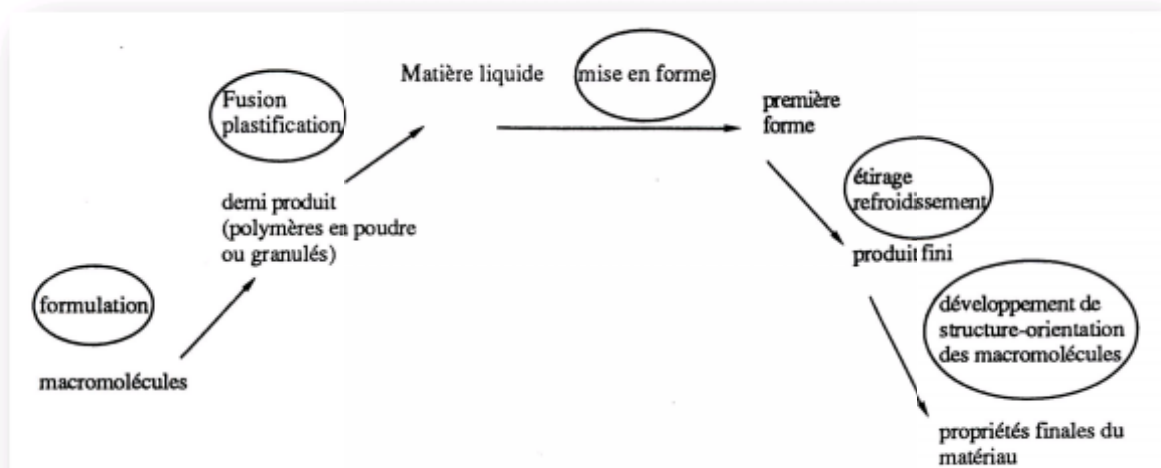


Figure I-6 Schéma général de la mise en œuvre des polymères thermoplastiques [29].

À l'usinage qui est l'opération de mise en œuvre par enlèvement de matière à l'aide d'un outil de coupe, on associe le concept d'usinabilité concernant une nuance ou une famille de nuances [3], [4].

I-7.1 Comportement des polymères vis-à-vis de l'usinage

Les caractéristiques physiques des plastiques (point de fusion et la conductibilité thermique), ont des valeurs inférieures à celles des métaux et il est donc nécessaire de limiter au minimum la chaleur engendrée en diminuant la friction. Des outils émoussés ou bien des tranchants qui raclent plutôt qu'ils ne coupent provoquent un dégagement de chaleur excessif, qui risque de générer des contraintes internes préjudiciables à la géométrie et à la fiabilité de la pièce finie. Les arêtes des outils doivent donc être toujours parfaitement affûtées et la dépouille doit être suffisante pour garantir que seule l'arête de coupe soit en contact avec la pièce usinée. On obtient généralement les meilleurs résultats en travaillant à très grandes vitesses avec une faible avance et des outils bien affûtés et lisses. Pour les pièces de faibles sections, une passe trop profonde est susceptible de provoquer son fléchissement. L'utilisation d'une lunette est conseillée pour les pièces assez longues, et pour les plastiques ayant un point de fusion bas, la lunette sera équipée de galets car des sabots risqueraient de porter la pièce en fusion. L'emploi d'un fluide de refroidissement est indispensable pour la réalisation de ces pièces.

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

Parmi les caractéristiques des polymères qui ont une influence sur les opérations d'usinage on peut citer [11]:

I-7.1.1 La dilatation et la conductivité thermique

Nous pouvons retenir que les sources de chaleur lors de la formation du copeau sont localisées dans les zones de cisaillement primaire et cisaillement secondaire *Figure I-7*, Une conductivité thermique élevée évite un échauffement trop important dans la zone de coupe grâce à une bonne évacuation de la chaleur produite à l'interface outil-copeau dans toute l'épaisseur du copeau.

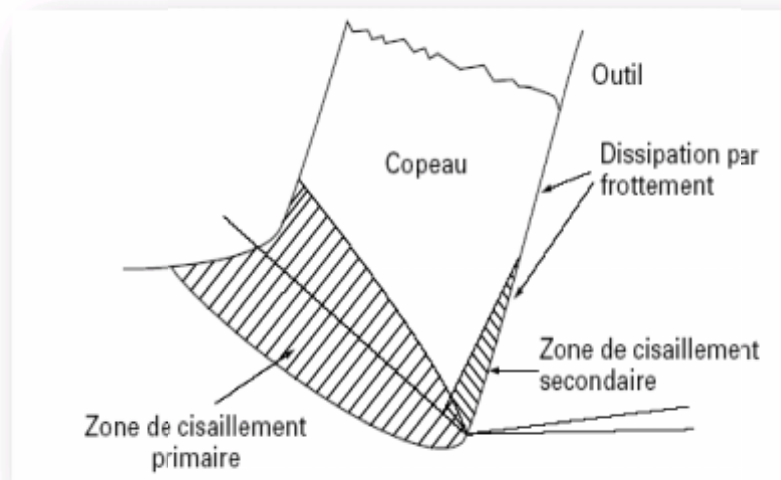


Figure I-7 Distribution des sources de chaleur en coupe orthogonale [1].

Les matières plastiques non chargées ont des coefficients de dilatation thermique généralement compris entre 50 et 200 m/m.k. Ce sont des matériaux isolants, la combinaison de ces deux caractéristiques, fait que la chaleur engendrée par l'opération d'usinage reste concentrée sur la zone usinée et entraîne une déformation thermique importante, voire un risque de dégradation thermique.

I-7.1.2 Le module d'élasticité et la dureté : On comparant aux aciers les matériaux plastiques sont très souples (modules compris entre 1000 et 2000 MPa), et moins durs, ce qui impose par exemple des précautions de serrage particulières pour ne pas déformer la pièce ni en marquer la surface.

I-7.1.3 Les contraintes internes: Les pièces plastiques contiennent souvent des contraintes internes après moulage, dues, en particulier, au retrait de la matière passant de l'état liquide à l'état solide. Il arrive fréquemment que l'usinage modifie la répartition de ces contraintes. **Rao, G.V & all [12]**; il a été prouvé que le tournage préserve la rigidité

mais perd beaucoup sur δ_f et δ_y . Des précautions doivent par conséquent être prises pour qu'il n'y ait pas d'accumulation de contraintes susceptibles d'entraîner des fissurations. Un des remèdes peut être de pratiquer un recuit des pièces après moulage. La vitesse de refroidissement est un élément essentiel pour réduire les contraintes internes. Plus la température de recuit est élevée, plus la baisse de température doit être lente. Parfois, l'usinage est réalisé après dégrossissage d'une ébauche. Dans ce cas, l'ébauche est généralement sans contraintes internes car celles-ci sont libérées lors du dégrossissage.

I-7.1.4 L'usure des outils: Une grande partie des plastiques non chargés ont un comportement autolubrifiant et ne créent pas d'usure importante des outils. Par contre, Ceux qui comportent des charges minérales (verre) ont tendance à accentuer l'usure des outils traditionnels d'usinage par enlèvement de copeaux.

I-7.1.5 L'hygrométrie: Certains polymères absorbent un taux important d'humidité (polyamide, par exemple). Les phénomènes d'absorption ne sont pas instantanés mais se produisent au bout de quelques minutes, voire de quelques heures. Cela modifie les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles. Cette évolution entre l'instant où on usine le polymère (échauffement donc séchage) et celui où on l'utilise (ambiance humide éventuellement donc dimensions différentes). Il faut donc tenir compte du comportement du polymère en présence d'humidité, de la présence ou non d'un liquide de refroidissement, de l'ambiance hygrométrique de l'atelier, du fait que l'échauffement dû à l'usinage va sécher le matériau en surface, etc....

I-7.1.6 L'électrostatique: Certains plastiques développent des charges électrostatiques superficielles importantes par frottement, qui attire les copeaux ou la poudre issus de l'usinage.

I-7.2 Usinage des polymères

La production de pièces en matières plastiques doit prendre en compte, à part égale, les conditions de fabrication, les caractéristiques propres du matériau, le type de sollicitation et les conditions d'utilisation, ainsi que les interactions entre ces différents critères. Les précautions essentielles consistent à éviter toute déformation. Il faut penser aussi que l'effort d'usinage est inférieur à celui nécessaire pour usiner une pièce similaire en acier; il

n'est donc pas nécessaire de serrer la pièce plastique avec le même effort. Les plastiques sont plus souples et fléchissent; c'est pourquoi les profondeurs de passe et les avances ne doivent pas être excessives. Par fois le refroidissement n'est pas nécessaire, c'est le cas de certains usinages de matières plastiques à faible coefficient de frottement tels que le polyéthylène. Dans ce cas très particulier, il peut être intéressant de prévoir quand même un soufflage d'air comprimé pour repousser le copeau et éviter qu'il ne vienne s'enrouler autour de l'outil. Il est en effet fréquent que le copeau ne se fragmente pas pendant l'usinage.

- Plusieurs facteurs affectent la qualité et l'intégrité de la surface en tournage. Ces derniers peuvent être classés en facteurs concernant le matériau de la pièce à usiner (dureté, propriétés métallurgique), facteurs liés à l'outil de coupe (composition chimique du matériau, géométrie) et les paramètres de coupe. La qualité de la surface est influencée par la dureté et les propriétés du matériau usiné. M.KADDACHE [13] Il est prouvé en générale que la rugosité de la surface diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce pour le matériau polyéthylène, elle est très inférieure à celle des matériaux coupant, ce qui n'influe donc guère sur la durée de vie de l'outil de coupe

- lors le tournage la surface obtenue n'est pas parfaitement cylindrique, elle comporte des sillons hélicoïdaux résultants de la forme plus ou moins pointue de l'outil de coupe et du mouvement hélicoïdal outil/pièce. Ces sillons ont un profil d'autant plus profond que le rayon du bec de l'outil est faible. Par ailleurs ils sont d'autant plus larges que l'avance par tour est grande, [14]. D'autre part, la forme de la surface engendrée par l'outil peut être affectée par les perturbations de la trajectoire de l'outil par rapport à la pièce, occasionnées par des vibrations importantes de l'un de ces éléments (ou des deux). Lorsque les conditions dynamiques (flexibilité et inertie des éléments, insuffisance d'amortissement mécanique) sont telles que les vibrations oscillatoires de cette trajectoire deviennent autoentretenues il en résulte des perturbations périodiques de la surface découpée. Elles prennent la forme de marques ou de stries plus ou moins accusées, qui peuvent modifier sensiblement la rugosité du profil idéal défini par la trajectoire théorique de l'outil [15].

I-8 paramètres d'usinage du polyamide PA6

Les matériaux d'outils peuvent être en acier rapide qui est les moins chers à l'achat. Ils ont une durée de vie moins longue, surtout lors de l'usinage des matériaux renforcés de fibre de verre. Les carbures, qui ont une plus grande résistance à l'abrasion que les aciers rapides et ils ont un bon rapport prix/usure. Pendant l'usinage, Parfois le refroidissement n'est pas nécessaire. C'est le cas de certains usinages de matières plastique à faible coefficient de frottement, par exemple polyéthylène. La précaution essentielle consiste à éviter toute déformation. Il faut penser aussi que l'effort d'usinage soit inférieur à celui nécessaire pour usiner une pièce similaire en acier, l'utilisation des montages spéciaux est conseillée pour éviter toute déformation, par exemple dans le chariotage des tubes creux en plastique la pièce doit être supporté par un manchon (cylindre) en bois [30].

La **figure I-8** définit les différents angles d'un outil de tour. Les principaux paramètres préconisés pour l'usinage des polyamides sont illustrés sur le **tableau I-5**.

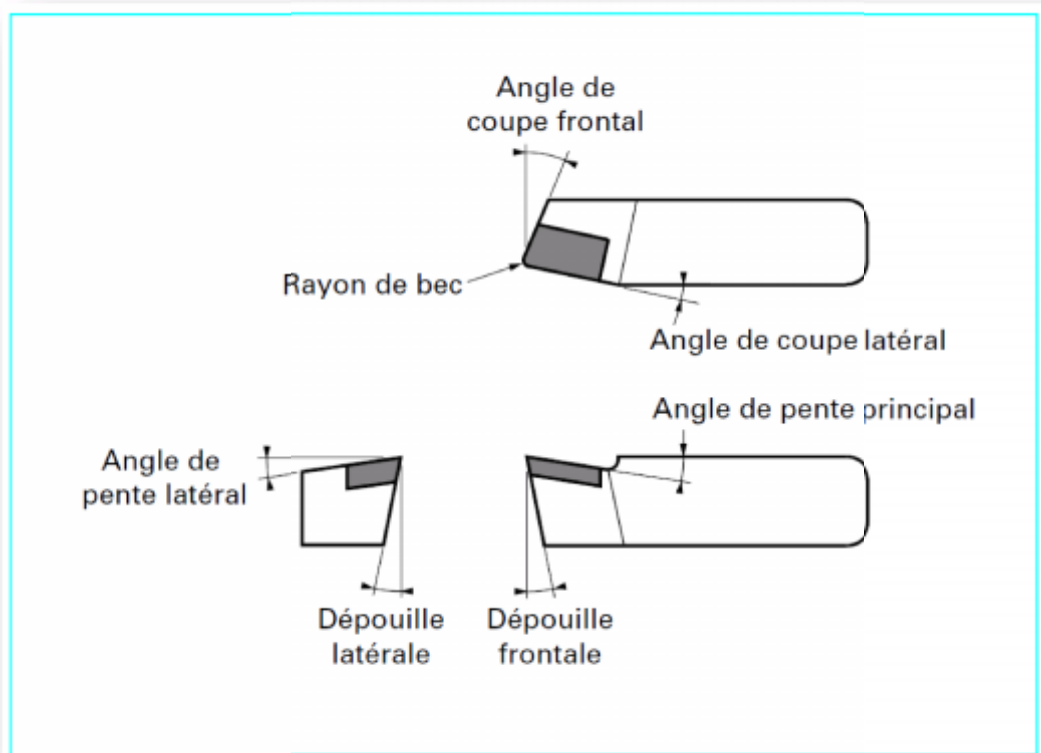


Figure I-8 définit différent angle d'un outil de tour [16].

| Procédé | Paramètres | Unité | PA 6, PA 6-6 |
|-----------------------------|---------------------|---------|---------------|
| Sciage à la scie circulaire | Angle de dépouille | degré | 10 à 40 |
| | Angle de coupe | degré | 4 à 8 |
| | Pas de denture | mm/dent | 5 à 10 |
| | Avance | mm/tr | 8 |
| | Vitesse de coupe | m/min | jusqu'à 3 000 |
| Sciage à la scie à ruban | Angle de dépouille | degré | 10 à 40 |
| | Angle de coupe | degré | 4 à 8 |
| | Pas de la denture | mm/dent | 3 à 15 |
| | Avance | mm/tr | 8 |
| | Vitesse de coupe | m/min | 50 à 1 000 |
| Tournage | Angle de dépouille | degré | 0 à 15 |
| | Angle de coupe | degré | négatif |
| | Profondeur de coupe | mm | 0,5 à 10 |
| | Avance | mm/tr | 0,05 à 0,5 |
| | Vitesse de coupe | m/min | 50 à 1 000 |
| Fraisage | Angle de dépouille | degré | 15 à 30 |
| | Angle d'attaque | degré | 5 à 15 |
| | Avance | mm/tr | jusqu'à 0,5 |
| | Vitesse de coupe | m/min | 1 000 |

Tableau I-5 paramètres de coupes pour l'usinage des polyamides [16].

I-8.1 définition des critères de Rugosité

Les paramètres de la rugosité de surface sont codifiés par les normes : ISO 468-1982, ISO 4287/1,2-1984 et ANSI/ASME B46.1-1985[19]. Cette normalisation porte sur des profils dans un espace à deux dimensions. Les paramètres de la rugosité définissent seulement les caractéristiques micro-géométriques de la surface. Une valeur déterminée de chaque paramètre peut correspondre à plusieurs surfaces obtenues par différentes techniques d'élaboration. Évidemment les propriétés mécaniques de chacune de ces surfaces peuvent être différentes, c'est pourquoi pour caractériser exhaustivement une surface, il faut souvent préciser plusieurs paramètres accompagnés du mode d'élaboration de cette surface. Pour cette étude la caractérisation de la qualité de la surface usinée a été limitée aux trois critères de rugosité (Ra, Rt ou Rc et Rz ou Rp) [17].

Selon les normes ISO 4287/1-1984 et ANSI/ASME B46.1-1985 les trois critères de rugosité, précédents, sont définis comme suit :

La hauteur des irrégularités sur dix points Rz : Moyenne des valeurs absolues des hauteurs, des cinq saillies du profil les plus hautes et des profondeurs des cinq creux du profil les plus bas, à l'intérieur de la longueur de base.

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

La hauteur maximale du profil R_t : Distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux à l'intérieur de la longueur de base.

L'écart moyen arithmétique du profil R_a : Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil dans les limites de la longueur de base.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x) dx| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (I-2)$$

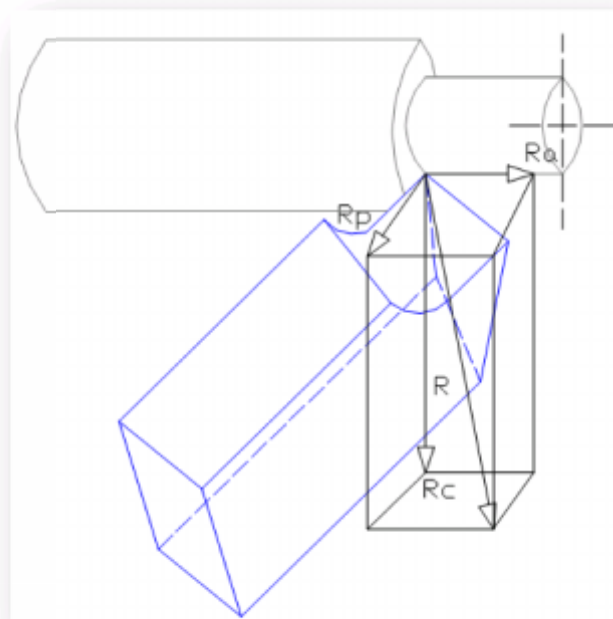


Figure I-9 critères de rugosité [18].

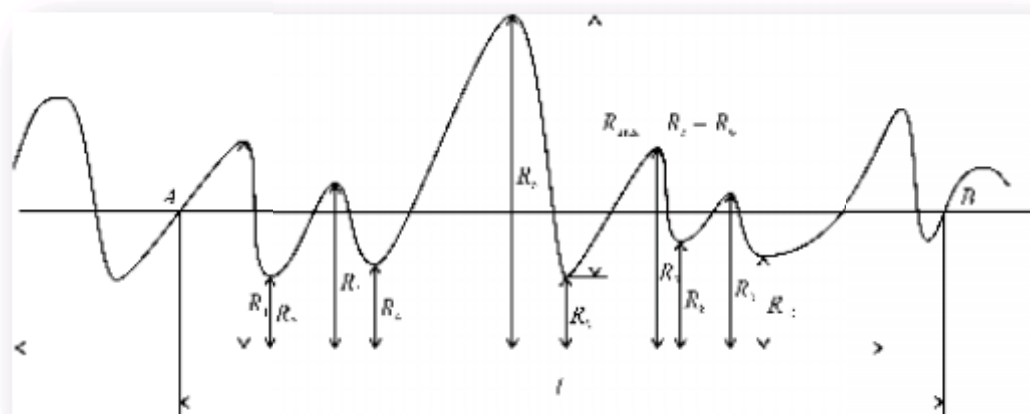


Figure I-10 Hauteur des irrégularités sur dix points R_z [20].

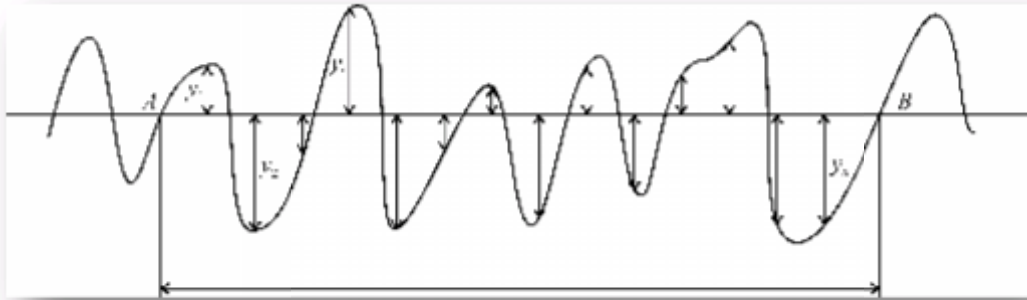


Figure I-11 Écart moyen arithmétique du profil Ra [20].

I-8.2 Les efforts de la coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire, l'effort double environ quand la vitesse d'avance double).

✓ Définition et intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage [14], comme montre la *figure I-12*.

- ❖ $F_z = F_c$: composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.
- ❖ $F_x = F_a$: composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.
- ❖ $F_y = F_p$: composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.

✓ Rapport des composantes

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

$$\text{égale à : } F_{rés} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2} \quad (I-3)$$

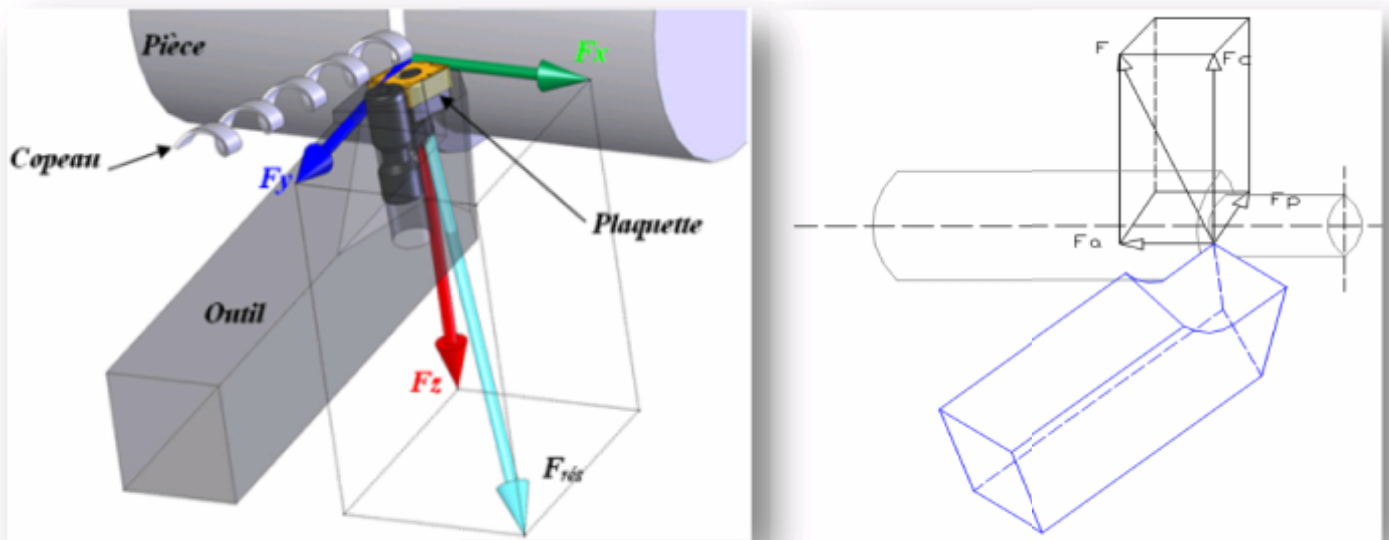


Figure I-12 représentation graphique des efforts de coupe [18].

✓ Intérêt de mesure des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage [1].

I-8.3 Effort spécifique de coupe (pression de coupe)

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

$$K_z = F_z / S \quad (I-4)$$

Fz: effort de coupe (N) ;

Kz: pression de coupe (N/mm²) ;

S: section du copeau (mm²).

$$S = a_p \times f \quad (I-5)$$

f: avance (mm/tr) ;

a_p: profondeur de passe (mm) ;

L'effort spécifique varie en fonction de:

- ✓ matériau usiné ;
- ✓ épaisseur de coupe ;
- ✓ angle de coupe (diminution de 1,5 environ, pour augmentation de 1°) ;
- ✓ usure de l'outil

I-8.4 La puissance de coupe

Elle est donnée par la relation: $P_c = F_z \times V_c$ (I-6)

V_c : vitesse de coupe (m/s) ;

F_z : force de coupe (N) ;

P_c : puissance de coupe (W).

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

$$P_c = K_z \times a_p \times f \times V_c \quad (I-7)$$

P_c: puissance de coupe (W) ;

K_z: pression de coupe (N/mm²) ;

a_p: profondeur de passe (mm) ;

f: avance (mm/tr) ;

V_c: vitesse de coupe (m/s).

La puissance de la machine se déduit de la puissance de coupe en fonction du rendement η

$$P = P_c / \eta \quad (I-8)$$

P: puissance absorbée par la machine ;

η : rendement de la machine.

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

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

Marin MOŢOI [21] a présenté une recherche sur l'influence de la géométrie de l'outil (rayon de bec) sur l'intégrité de la surface et la précision dimensionnelle lors des opérations chariotage du polyamide PA66–MoS₂. Utilisant deux nuances différentes des outils de coupe en céramique, ayant différentes rayons de becs. L'intégrité de la surface a été évaluée par la mesure de la rugosité, micro-dureté, et la technique métallographique. L'outil de coupe s'est avéré avoir un effet significatif sur l'intégrité de la surface aussi bien que la précision dimensionnelle.

L'auteur a observé que la plus grande influence sur la rugosité de la surface entre les paramètres de coupe est la vitesse d'avance, suivi par la vitesse de coupe et enfin la profondeur de passe avec une très petite influence.

Le rayon de bec de l'outil a une influence positive sur la rugosité de la surface usinée. En augmentant le rayon de bec, les valeurs de la rugosité diminuent jusqu'à une valeur minimale *figure I-13*.

Ces outils de coupe donnent un bon état de surface à une épaisseur réduite de la couche déformée plastiquement et une meilleure précision dimensionnelle.

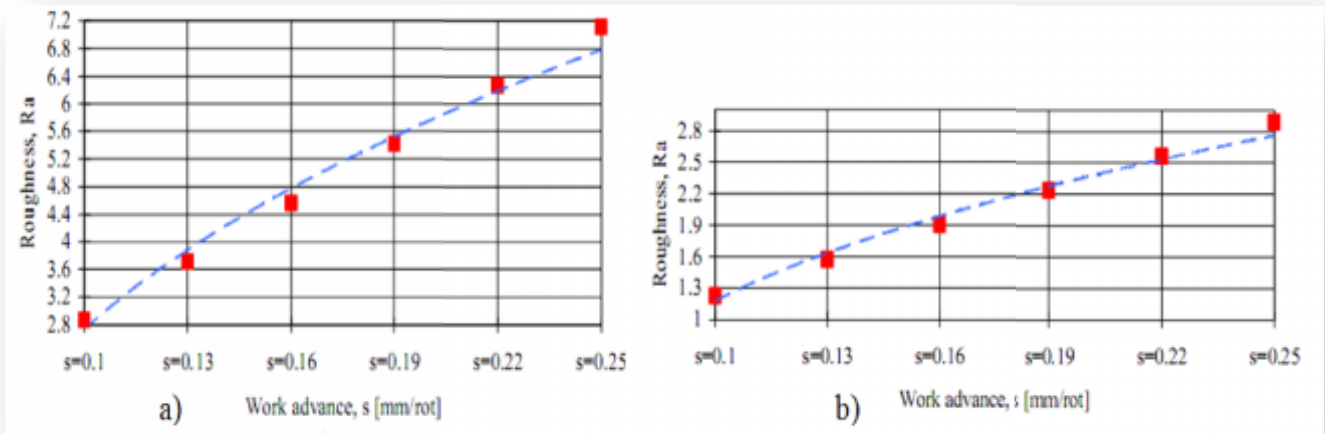


Figure I-13 La relation entre Ra et la vitesse d'avance

a) outil avec rayon de bec = 1 ; b) outil avec rayon de bec = 0,4 [21].

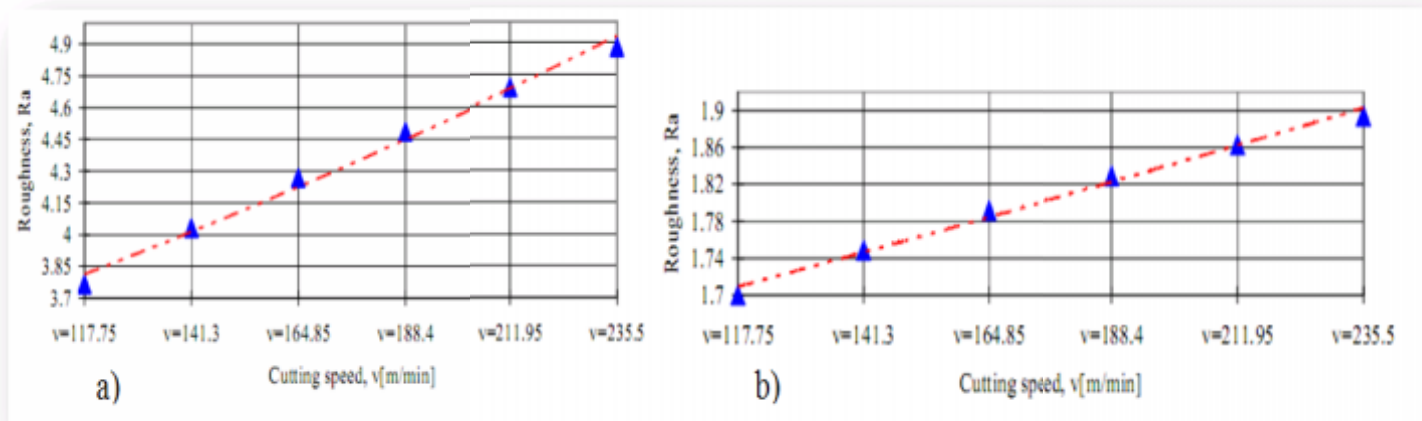


Figure I-14 La relation entre Ra et la vitesse de coupe

a) outil avec rayon de bec = 1 ; b) outil avec rayon de bec = 0,4 [21].

F. Mata et J. Paulo Davim [22], ont étudié les performances des outils de coupe en diamant revêtu (CVD) avec des outils en diamant polycristallin (PCD) et (K10), lors de l'usinage de matériau composite en polyamides

Les polyamides PA6 et les polyamides renforcés par 30% des fibres de verre (PA 66GF) sont employés pour les essais. Les polyamides sont des matériaux largement utilisés dans l'aérospatiale, l'automobile, les robots et des machines, dus à leurs bonnes propriétés.

Selon les auteurs, Le diamant revêtu (CVD) présente une précision dimensionnelle et une basse force de coupe, donc une faible consommation d'énergie par rapport aux autres

outils en raison de leur dureté et bonnes propriétés physiques et de la présence du briscopeaux.

Ces paramètres jouent un rôle très important en termes de coûts de production mineurs du diamant de CVD en comparaison avec le PCD, *figure I-15*.

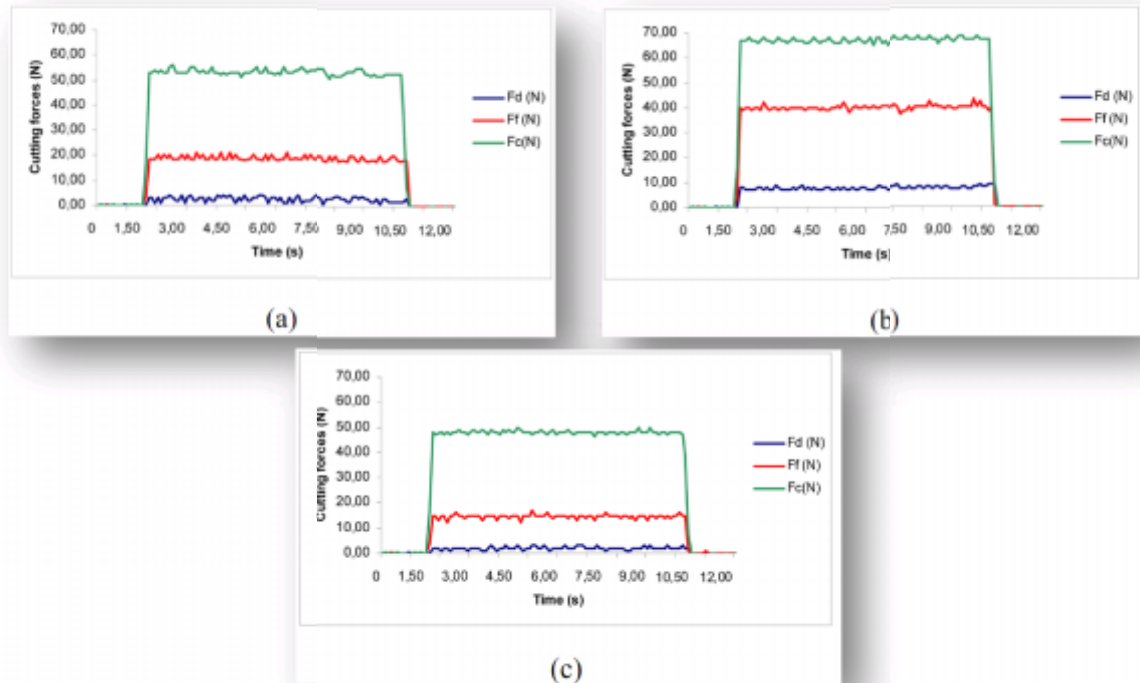


Figure I-15 Exemples d'évolution d'efforts de coupe pour la PA66GF ($V_c=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev) : (a) outil de PCD; (b) K10 & (c) outil de diamant CVD [22].

La *figure I-16* illustre le rapport F_x/F_z pendant l'usinage de deux polyamides, PA6 et PA66 renforcé par les fibres de verre avec trois outils de coupe K10, PCD et CVD. L'outil revêtu (CVD) présente les valeurs mineures du rapport. Ce qui indique une efficacité importante lors de l'usinage.

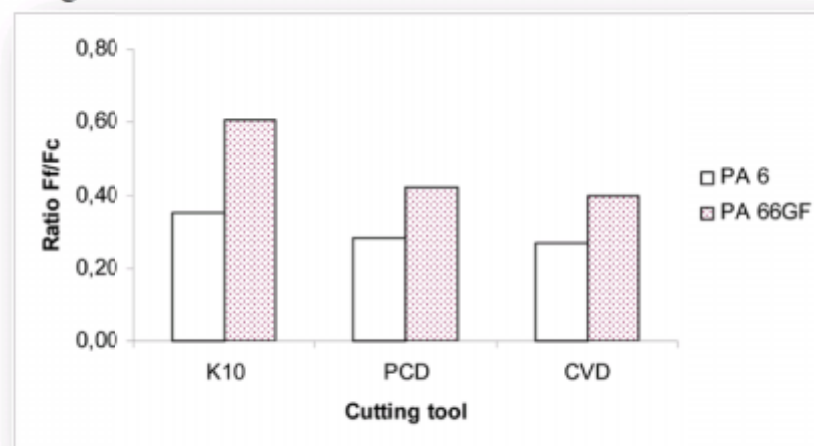


Figure I-16 Représentation de rapport F_f/F_c pour plusieurs types d'outil et les deux des matériaux ($V_c=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev) [22].

V. N. Gait et all [23] ont fait une analyse des effets des paramètres de coupe, la vitesse de coupe (v) et l'avance par tour (f) sur des aspects d'usinabilité, tels que l'effort de coupe (F_c), rugosité de la surface (R_a), effort de coupe spécifique (K_s), et puissance (p) pendant le micro-usinage du polyamide avec 30% des fibres (PA66 GF30) avec l'outil de PCD, la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été employée.

Les résultats des expériences de micro-usinage trouvés par les auteurs montrent :

1) L'analyse de la variance (ANOVA) indique que les modèles quadratiques d'usinabilité sont proportionnés à l'intervalle de confiance de 99%.

2) L'effort de coupe augmente avec l'avance par tour pour une vitesse de coupe fixe. De plus, l'effort de coupe diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. L'effort de coupe est sensible à des valeurs plus élevées d'avance par tour par rapport à des valeurs plus basses de vitesse de coupe.

3) la rugosité de la surface diminue avec des valeurs plus basses d'avance et des valeurs plus élevées de vitesse de coupe.

4) l'effort de coupe spécifique est minimal à une avance de 60 microns/rev et d'une vitesse de coupe de 200 m/min.

5) Pour réduire la puissance en minimum il faut prendre des valeurs plus basses possibles de vitesse de coupe et d'avance.

Marin MOŢOI [24], a présenté une étude sur l'influence des éléments d'additions sur la rugosité de la surface usinée lors du chariotage longitudinal des certaines polyamides.

Les types de polyamide étudiés sont: PA66, PA66–GF30 et PA66MoS2 (PA avec MoS2). Il a observé que le polyamide PA66 donne des bons résultats en tournage longitudinale, ainsi les éléments d'additions supplémentaires à ce polyamide influencent négativement sur la qualité de surface dans le cas d'ébauchage. La différence entre les valeurs moyennes approximatives de l'avances sont, 42% vis-à-vis de la PA 66-GF30 et de 18% pour le PA66MoS2, *figure I-17*.

Par contre dans le cas de finition en tournage des pièces en PA66 les éléments d'addition jouent un rôle significatif sur la qualité de surface, *figure I-18*.

Pour obtenir un meilleur état de surface des polyamides l'utilisation des adjuvants comme le molybdène et phosphore sont conseillés. Si la qualité de surface réalisée n'est pas importante, il est préférable d'utiliser le PA66GF30

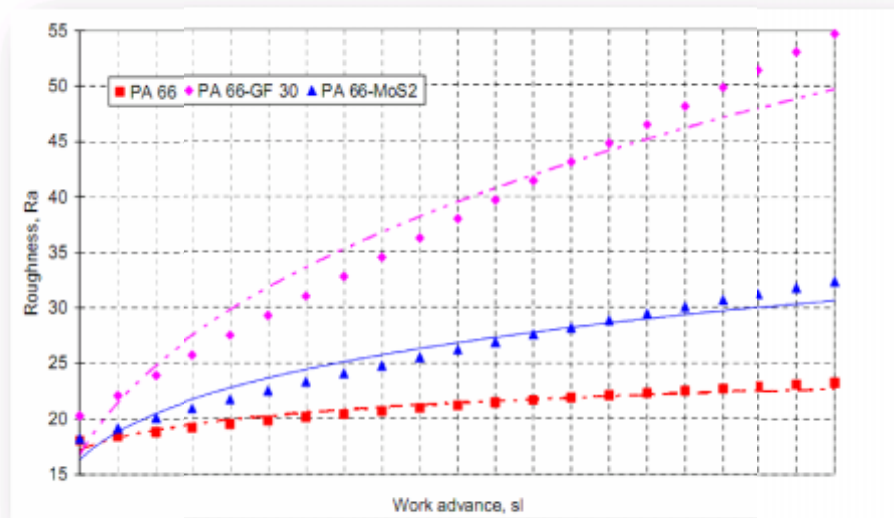


Figure I-17 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance (V , $a_p = \text{const}$), pour l'ébauchage [24].

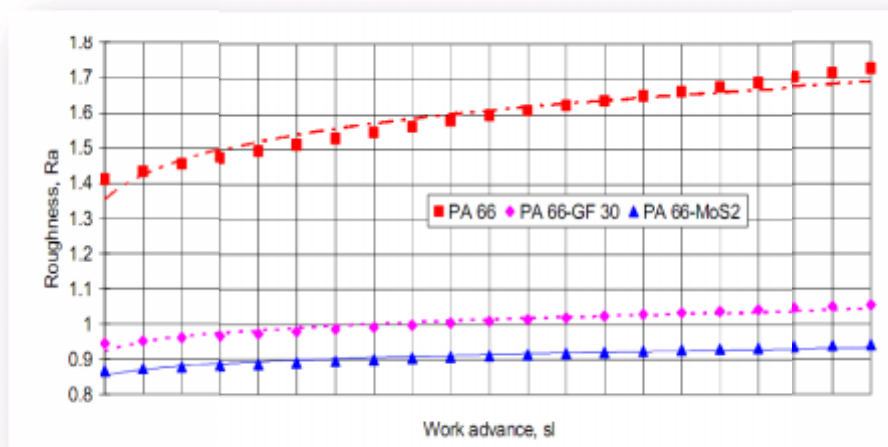
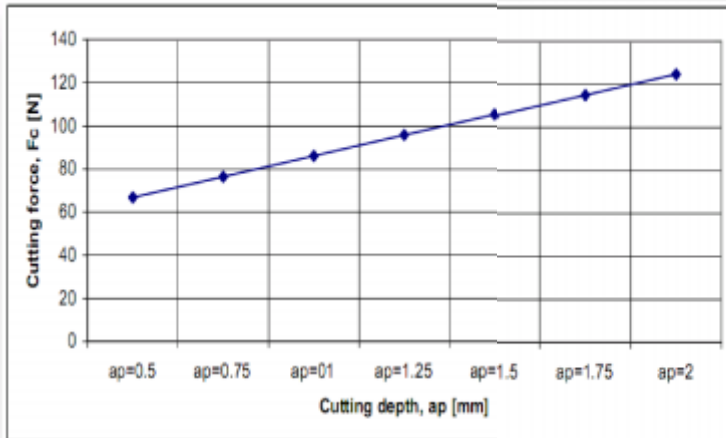


Figure I-18 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance Pour tournage de finition [24].

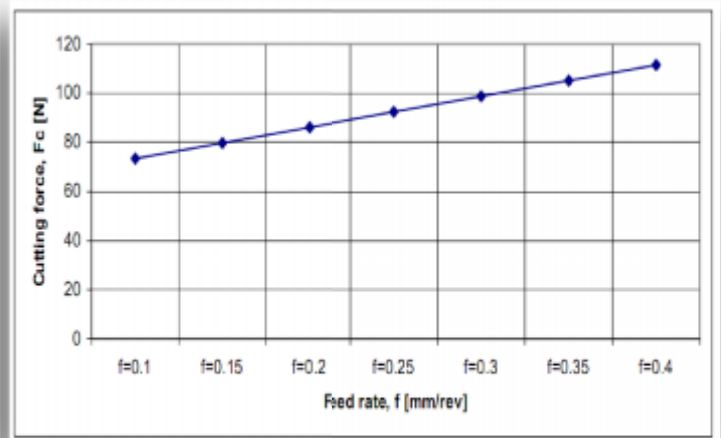
MOŢOI Marin, [25] a présenté une étude sur l'influence des paramètres et régime de coupe sur l'effort de coupe principal produit lors d'usinage de plastique semi extrudé PA66 (ERTA) avec un outil en carbures cémentés non-revêtue sans brise-copeaux K15 (code CNMG 12 08 02). Il a utilisé la méthode d'analyse de variance ANOVA pour indiquer l'influence des facteurs de coupe sur l'effort de coupe principale.

Il a observé que la plus grande influence sur l'effort de coupe principal entre les paramètres de coupe est successivement la profondeur de passe (t), la vitesse d'avance (SL) et la vitesse de coupe (v).

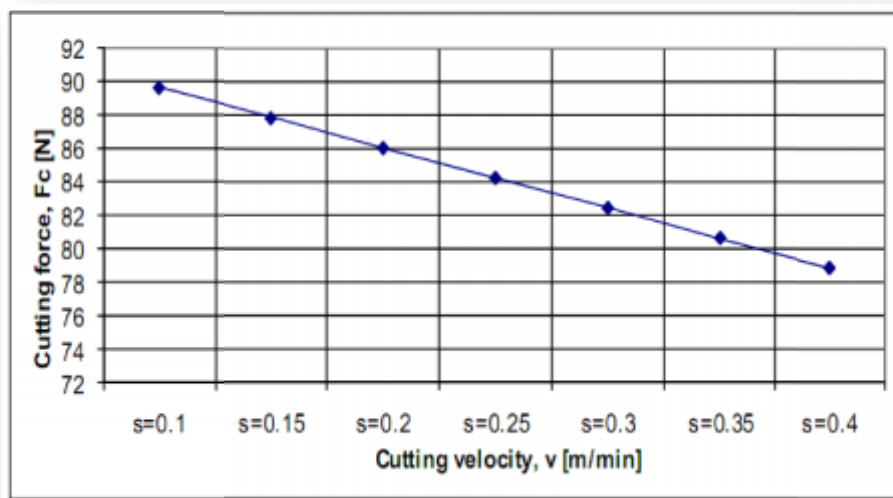
La vitesse de coupe a une influence négative sur la force de coupe. En augmentant la vitesse de coupe, les valeurs de la forces diminuent, **Figure I-19**.



a) Force de coupe $F_c=f$ (la profondeur de passe) pour ($f=0.2\text{mm/rev}$, $v=117.75$)



b) Force de coupe $F_c=f$ (vitesse d'avance) pour ($a_p=1\text{mm}$, $v=117.75$)



c) Force de coupe $F_c=f$ (vitesse de coupe) pour ($a_p=1\text{mm}$, $f=0.2\text{ mm/rev}$)

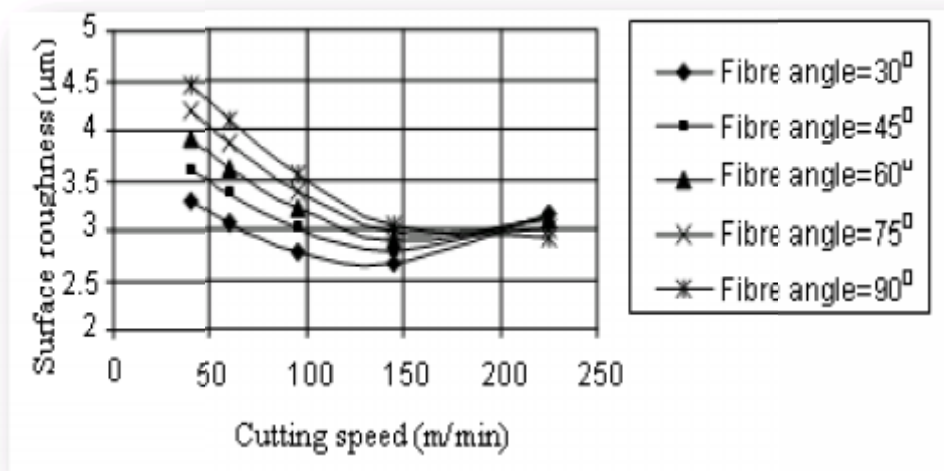
Figure I-19 influence de paramètre de coupe Sur la l'effort de coupe [25]

MOȚOI Marin, [26] présenté une étude de simulation du processus de coupe du polyamide (PA66) basée sur les résultats expérimentaux avec une marge d'erreur inférieur a 10%, puisque la simulation est moins chère que la recherche expérimentale. Le fait que

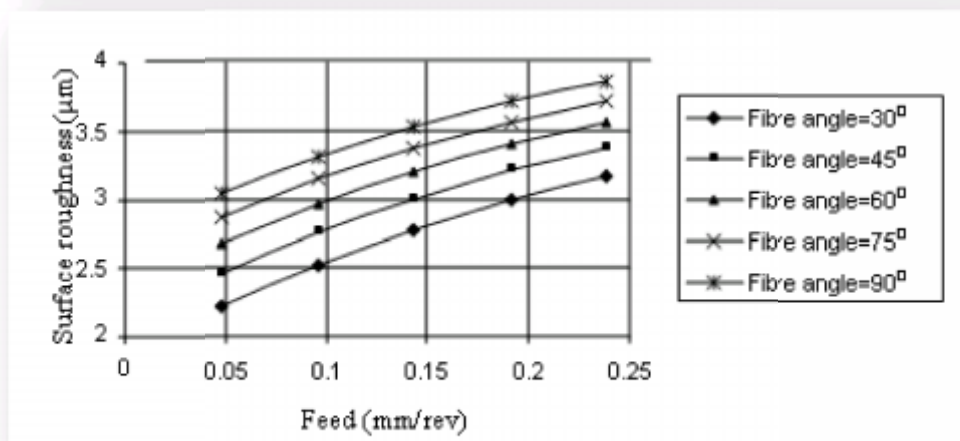
nous pouvons employer la méthode des éléments finis dans le cas des matériaux en plastique comme dans le cas des matériaux métalliques afin de déterminer quelques paramètres du processus de coupe, avec aucune matière à dépenser.

Syed A. H. & all [27] ont étudié l'évolution d'orientation des fibres sur la rugosité de surface lors de l'usinage d'un plastique renforcé en fibres de verre GFRP par l'outil du carbure K20. Les auteurs ont élaboré des modèles de second ordre de la rugosité en fonction de paramètres de coupe (V_c , f , a_p) et l'angle orientation des fibres (Φ) basé sur la méthode de surface de réponse (RSM). Selon les résultats, les auteurs ont observé que la rugosité de surface est minimum pour une vitesse de 147 m/min et une profondeur de 1 mm pour différents angles d'orientation (Φ), et meilleure dans le cas au la vitesse d'avance et l'angle d'orientation de fibre sont minimum *figure I-20*.

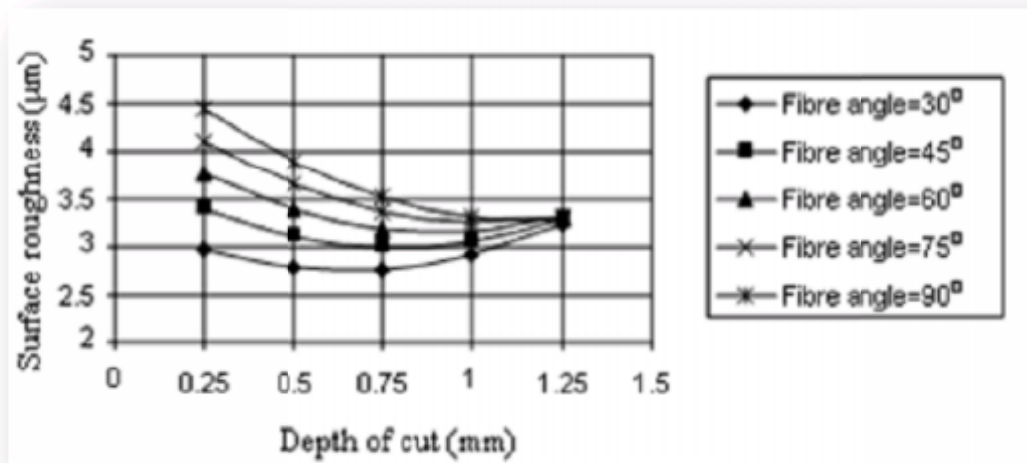
L'avance est le paramètre dominant qui affecte la rugosité de la surface des composés de GFRP, suivie de vitesse de coupe, angle d'orientation de fibre. La profondeur de passe montre un effet minimal sur la rugosité de la surface comparée à d'autres paramètres.



a) V_c et a_p constants.



b) f et a_p constants.



c) Vc et f constants.

Figure I- 20 L'évolution de la rugosité de surface
En fonction d'orientation des fibres [27].

M. Setareh [28], a étudié la performance d'un outil en HSS et en carbure pour l'usinage du plastique de type téflons (PTFE). Ce plastique est de la famille thermoplastique et a une bonne dureté, un coefficient de frottement bas et une résistance élevée contre la corrosion et la fatigue. De ce fait il est considéré comme un des facteurs très importants dans l'application industrielle.

Les performances en termes de rugosité de surface pour l'outil en HSS et en carbure dans différentes conditions d'usinage étaient étudiées et leurs résultats étaient comparés.

Selon l'auteur, le paramètre le plus important qui devrait être considéré est la concentration de chaleur due au frottement de l'arête tranchante des outils et la pièce usinée; cette dernière est due à la faible conductivité thermique des plastiques.

Les aciers rapides sont meilleurs que les carbure en termes de cout et de fragilité par contre les carbures sont durables pendant l'usinage à haute température en raison d'une meilleure conductivité thermique.

L'auteur indique aussi que pour atteindre une bonne qualité de surface sur le plastique (PTFE), la vitesse de coupe élevée est exigée pour les outils en carbure revêtu, ce dernier peut réaliser un meilleur état de surface en évitant la génération de l'arête rapporté sous l'effet de dégagement de chaleur générée pendant l'usinage.

CHEN, Y.K; est all [31], ont prouvé que la géométrie de l'outil de coupe présente un impact important sur la contrainte résiduelle et risque de provoquer des vibrations lors de l'usinage. Une arête arrondie favorise l'apparition des contraintes compressives. D'autre part le rayon du bec de l'outil a un effet considérable sur l'intégrité de la surface en diminuant la hauteur des stries. En effet la rugosité est inversement proportionnelle au rayon. Les paramètres de coupe ont des effets considérables sur la qualité de surface obtenue en tournage. L'augmentation de la vitesse de coupe et la diminution de l'avance permettent la diminution de la rugosité et améliorent la qualité de la surface. Du point de vue théorique, la profondeur de passe est moins importante que l'avance. Pour un outil correctement affûté, la rugosité est directement liée à la valeur de l'avance par tour.

I-10 Position du problème

L'étude bibliographique sur la coupe de métaux réalisée dans ce chapitre, a permis de définir les matériaux polymères, leurs classifications selon plusieurs critères et leurs modes de synthèses et certains travaux de recherche réalisés sur l'usinage des matériaux polymères. De définir aussi les différents matériaux de coupes utilisés dans l'usinage des polymères en tournage, tels que, les aciers rapides et les carbures. Dans ce chapitre on a évoqué aussi des différents paramètres d'entrée (régime de coupe, géométrie de la partie actif de l'outil) sur le processus de coupe en général et en particulier sur les différents paramètres de sortie tel que, les efforts de coupe et la rugosité de la surface usinée.

En se basant sur l'étude bibliographique, nous pouvons conclure que les polyamides sont classés parmi les matériaux difficiles à usiner à cause de leurs caractéristiques physico-mécaniques

Ces caractéristiques nous ont forcés de choisir le carbure comme un matériau de coupe en raison de bon rapport usure/prix et de compatibilité avec l'usinage des matériaux plastiques. Pour étudier le comportement des matériaux à usiner et le rôle lubrification lors du tournage des polyamides, nous avons choisi deux plaquettes de même rayon de bec et la seule différence est la présence de brise coupeau.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, un banc d'essais comportant un tour, une plateforme pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée.

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

II-2 Matériels utilisés

II-2.1 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN40C de puissance sur la broche égale à 6.6KW (*figure II-1*). Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont comme suit (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min.

Les avances disponibles sont: (0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24...0,8) mm/tr.



Figure II-1 Tour parallèle modèle SN40C.

II-2.2 Matériau utilisé pour les essais d'usinage

Le polyamide PA6 extrudé est une matière robuste avec une résistance élevée à l'abrasion et à l'impact. Le PA6 est communément utilisé comme matériau de substitution du bronze, de l'aluminium et d'autres métaux non ferreux, car il possède

des avantages de poids significatifs. Le ZELLAMID 202 (PA6) a un poids spécifique de $1,15 \text{ g/cm}^3$ et le bronze de $8,8 \text{ g/cm}^3$, rendant le prix du rapport poids volume très attractif. L'utilisation du PA6 réduit aussi les exigences de lubrification et il est non abrasif sur les surfaces d'ajustement. Il possède de bonnes propriétés mécaniques. Les nylons peuvent absorber jusqu'à 8% d'eau (en poids) par humidité ou immersion dans l'eau. Ceci augmente la résistance excellente aux chocs et aux vibrations mais peut aussi entraîner des variations de dimensions. Les propriétés mécaniques, électriques et dimensionnelles sont influencées en fonction de l'absorption d'humidité. Le ZELLAMID 202 (PA6) est approuvé pour le contact alimentaire. Toutes ces caractéristiques importantes s'ajoutent aux rapports coût/performance impressionnant.

Ce matériau utilisé dans l'industrie du papier et de la pâte à papier, offshore et marine, textile, constructions mécaniques générales, industrie alimentaire, manipulation de matières, électronique, construction, exploitations minières, aérospatial et bien d'autres.

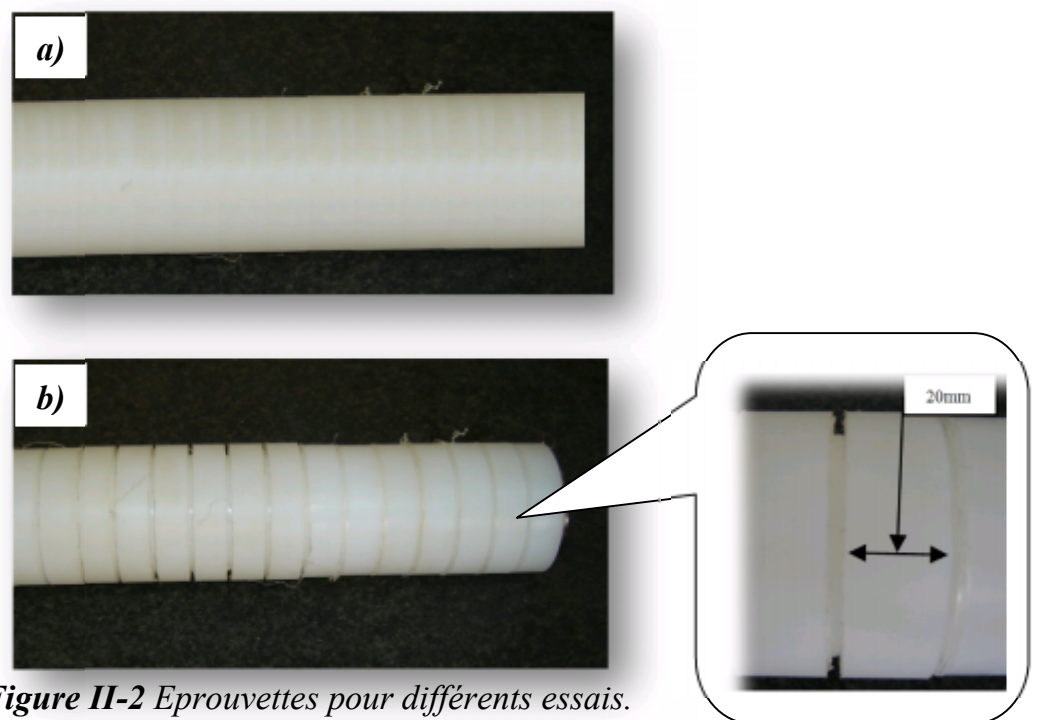


Figure II-2 *Éprouvettes pour différents essais.*

a) *Éprouvette utilisée pour les essais de longue durée ; b)* *Éprouvette utilisée pour les essais de courte durée.*

Pour les essais de longue durée (évolution de la rugosité en fonction du temps), on a utilisé des éprouvettes de diamètre $\Phi = 90 \text{ mm}$ et de longueur $L = 400 \text{ mm}$ (**figure II-2a**), et pour les essais de courte durée (efforts de coupe et rugosité de la surface en

fonction des paramètres du régime de coupe V_c , f et a_p), on a utilisé des éprouvettes qui ont les mêmes dimensions avec des paliers de 20 mm de longueur (*figure II-2b*).

II-2.2.1 propriétés techniques du ZELLAMID 202(PA6)

Le *tableau II-1* expose les propriétés techniques de ce matériau.

| Propriété | | Unité | Méthode de test | Condition de l'échantillon | ZELLAMID® 202 (PA6) |
|---|-------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|---------------------|
| PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES | | | | | |
| Résistance à la traction au point de rupture | | MPa | ISO 527 | sec | 80 |
| | | MPa | ISO 527 | humide | 50 |
| Élongation au point de rupture | | % | ISO 527 | sec | 50 - 100 |
| | | % | ISO 527 | humide | 200 |
| Module d'élasticité en tension | | MPa | ISO 527 | sec | 3000 |
| | | MPa | ISO 527 | humide | 1500 |
| Résistance de résilience Charpy | + 23°C | kJ/m ² | ISO 179/1eJ | sec | sans cassure |
| | - 40°C | kJ/m ² | ISO 179/1eJ | sec | sans cassure |
| Résistance de résilience Charpy (entaille) | | kJ/m ² | ISO 179/1eA | sec | 70 |
| | | kJ/m ² | | humide | |
| Dureté Shore, échelle D | | | ISO 868 | sec | 75 |
| Durée limite de rendement $\sigma_{1/1000}$ | 23°C/50% RH | MPa | ISO 899 | humide | 5,5 |
| | 100°C | MPa | ISO 899 | sec | 2,5 |
| Module apparent $E_{C/1000, 20}$ | 23°C/50% RH | MPa | ISO 899 | humide | 230 |
| PROPRIÉTÉS THERMIQUES | | | | | |
| Température de distorsion | Méthode A | °C | ISO 75 | sec | 55 – 75 |
| | Méthode B | °C | ISO 75 | sec | > 160 |
| Point de fusion | Méthode A | °C | ISO 3146 | | 220 |
| Température maximum de fonctionnement pour quelques heures | | °C | | | ≤ 180 |
| TEP 5 000 heures (50% de résistance à la traction) ¹⁾ | | °C | IEC 216 | | 90 |
| TEP 20 000 heures (50% de résistance à la traction) ¹⁾ | | °C | IEC 216 | | 75 |
| Coefficient thermique d'expansion linéaire | | 1/(K.10 ⁻⁵) | DIN 53752 | sec | 7 – 10 |
| Conductivité thermique | Méthode A | W/(K.m) | | sec | 0,23 |
| Chaleur spécifique | | J/(g.K) | IEC 1006 | sec | 1,7 |

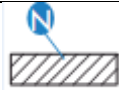
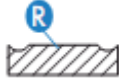
Tableau II-1 propriétés techniques [30]

II-2.3 Plaquettes de coupe

Les plaquettes sont amovibles de forme carrée *figure II-3*, Toutes les informations qui concernent les plaquettes de coupe sont regroupées dans le *tableau II-2*.

| Matériaux de coupe | Désignation | codes | Géométrie |
|--------------------|----------------|----------|---------------|
| carbure | SPUN 120408 | SPUNT150 | SPUN 12-04-08 |
| carbure | SPMR 120308 | SPMR0190 | SPMR 12-03-08 |

a) désignation des plaquettes de coupe.

| Désignation | Forme de la plaquette | Angle de dépouille | Mode de fixation | Longueur de l'arête de coupe | Epaisseur de la plaquette | Rayon du bec $r\epsilon$ |
|------------------|-----------------------|--------------------|--|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| SPUN 12-04-08 | carré | 11° |  | 12mm | 3,18 mm | 0.8mm |
| SPMR 12-03-08 | carré | 11° |  | 12mm | 4,76mm | 0.8mm |

b) description dimensionnelle des plaquettes.

Tableau II-2 Informations relatives aux plaquettes de coupe.



Figure II-3 Photos des plaquettes de coupe utilisées.

II-2.4 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil dont la désignation est indiquée au *tableau II-3*.

| Désignation | Marque | χ | α | γ | λ | χ_r |
|---------------|------------------|--------|----------|----------|-----------|----------|
| CSBNR25x25M12 | TIZIT SIMPLEX | 75° | 6° | -6° | -6° | 15° |

Tableau II-3 Caractéristiques de porte plaquette utilisé.

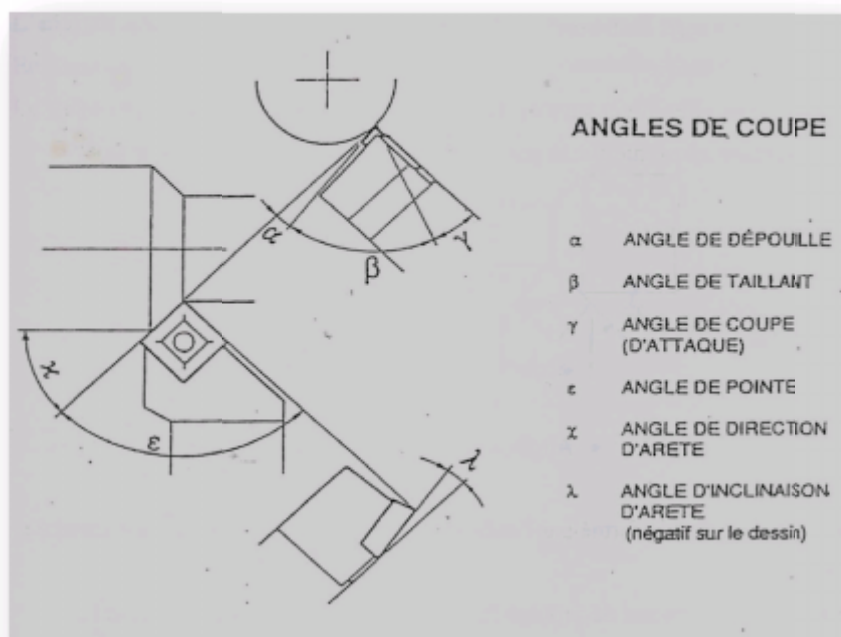


Figure II-4 différentes angles de coupe.



Figure II-5 Porte outil utilisé.

II-2.5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (**KISTLER 9257 B**) *Figure II-7*, qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite: la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de

fixation **figure II-6**. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz **figure II-7**.

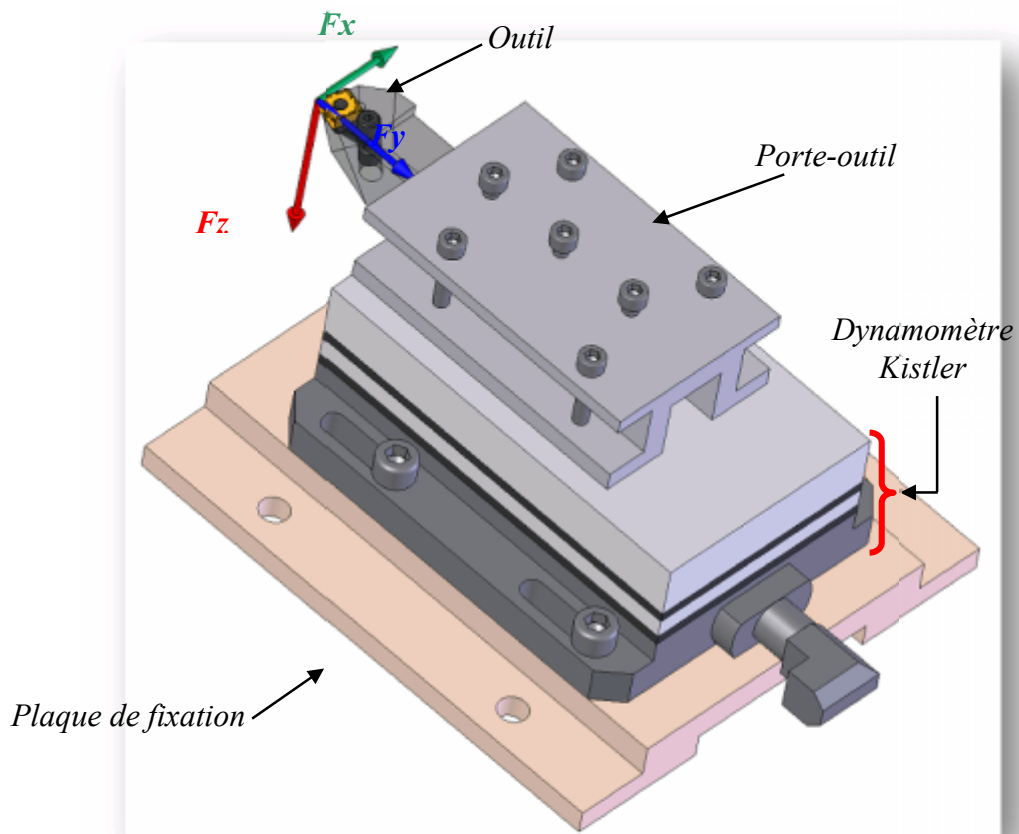


Figure II-6 Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

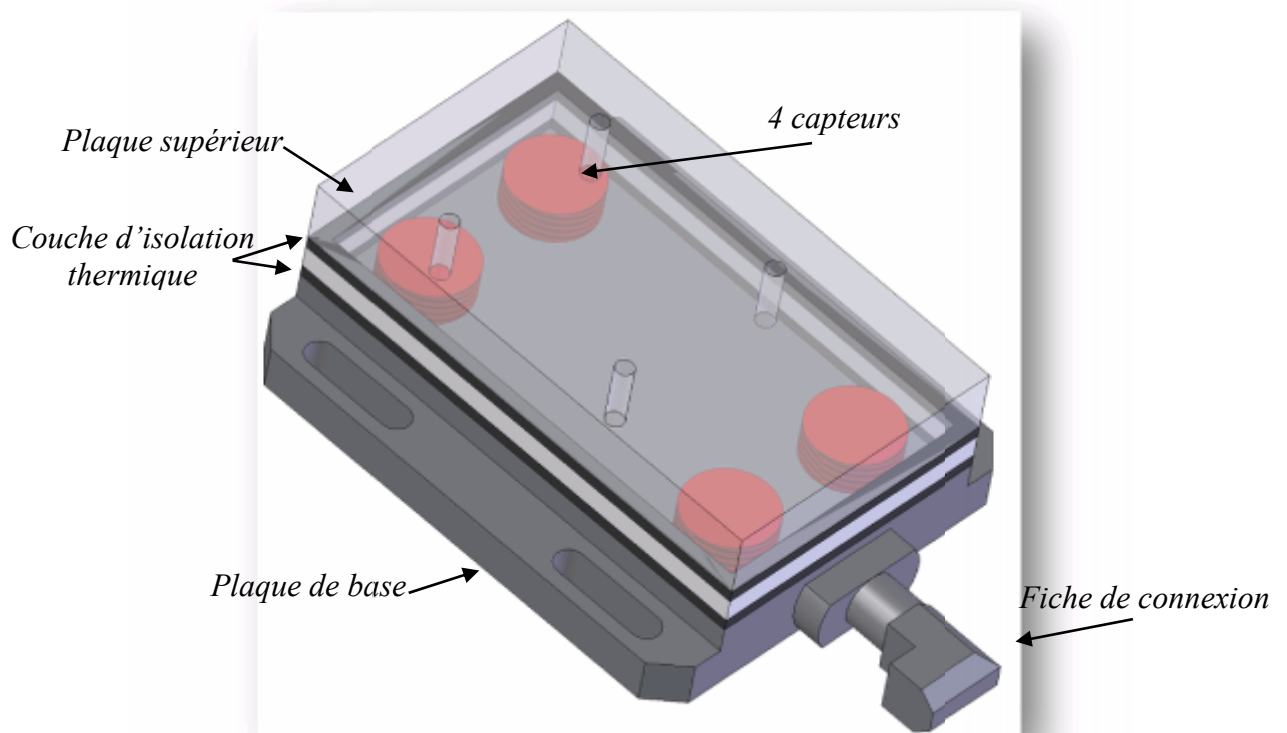


Figure II-7 Capteur d'effort de coupe KISTLER.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes. La *figure II-8* présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes des efforts de coupe (Force axiale: F_x , Force radiale: F_y et Force tangentielle: F_z).

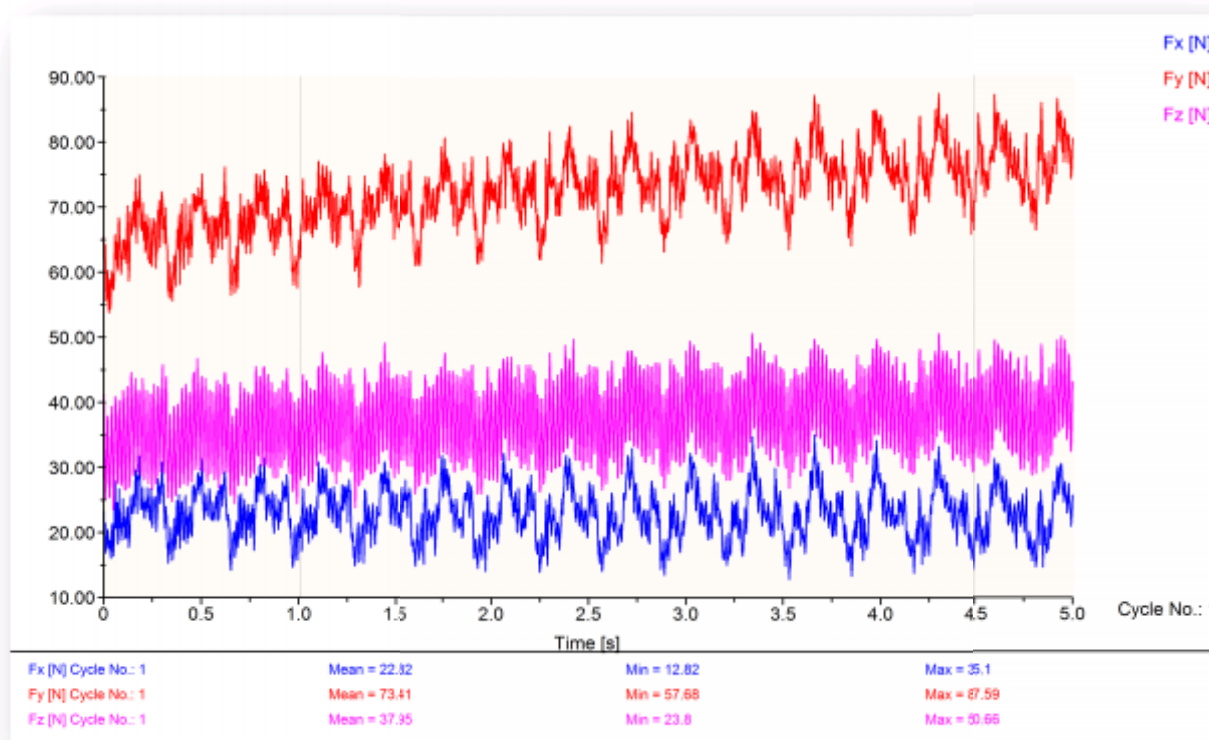


Figure II-8 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

II-2.5.1 Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à 3 composantes (9257 B): Le porte outil type 9403 vissable est employé pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26 *figure II-6*.

- ✓ Grande rigidité, fréquence propre très élevée ;
- ✓ Large gamme de mesure ;
- ✓ Bonne linéarité, sans hystérésis ;
- ✓ Faible interaction (<1%) ;

- ✓ Utilisation simple (prêt à l'emploi) ;
- ✓ Construction compacte ;
- ✓ Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- ✓ Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- ✓ Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- ✓ Ordinateur personnel (PC) ;
- ✓ Traceur.

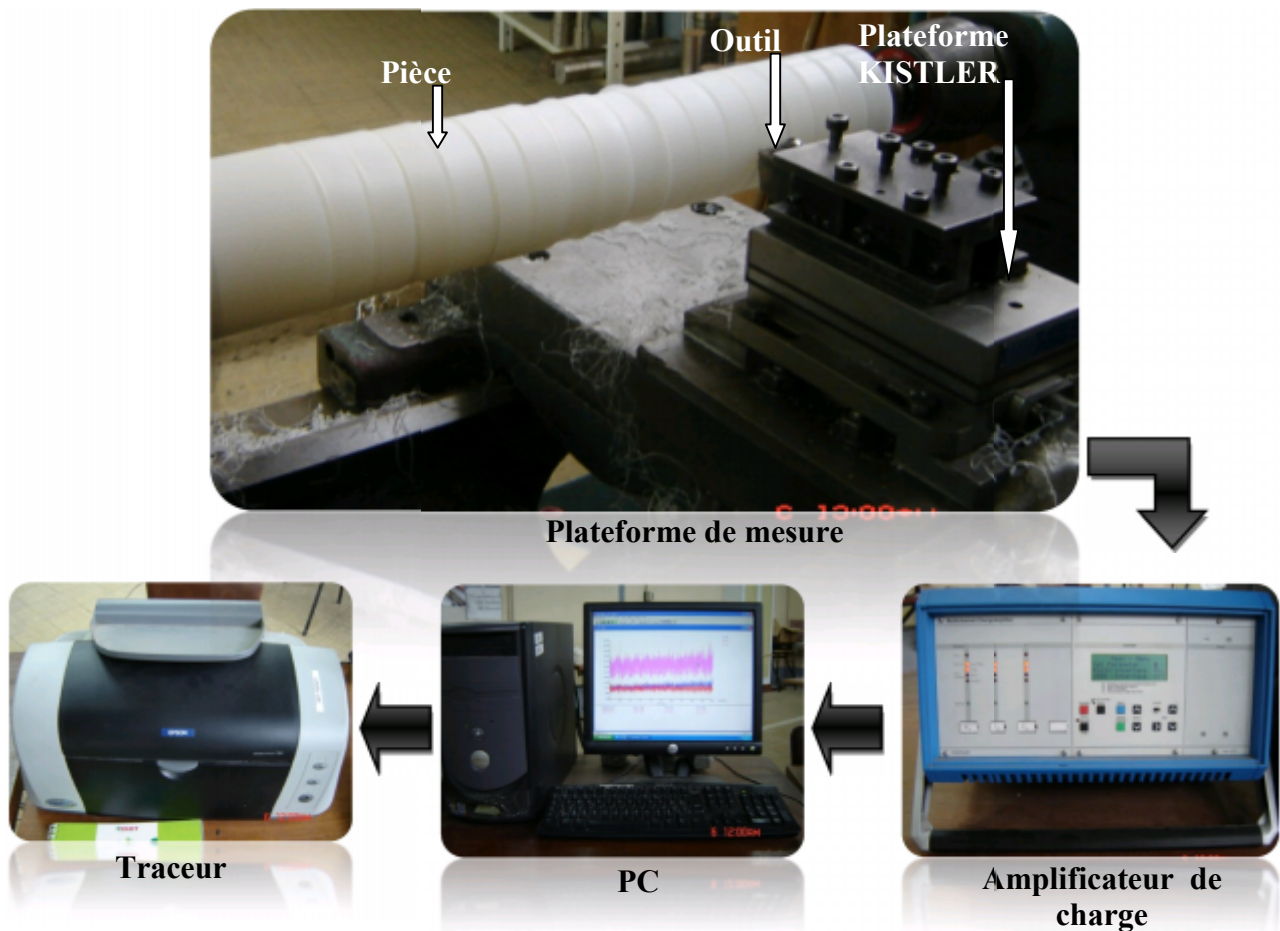


Figure II-9 Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II-2.6 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t , R_z), nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo) *figure II-10*.

Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.

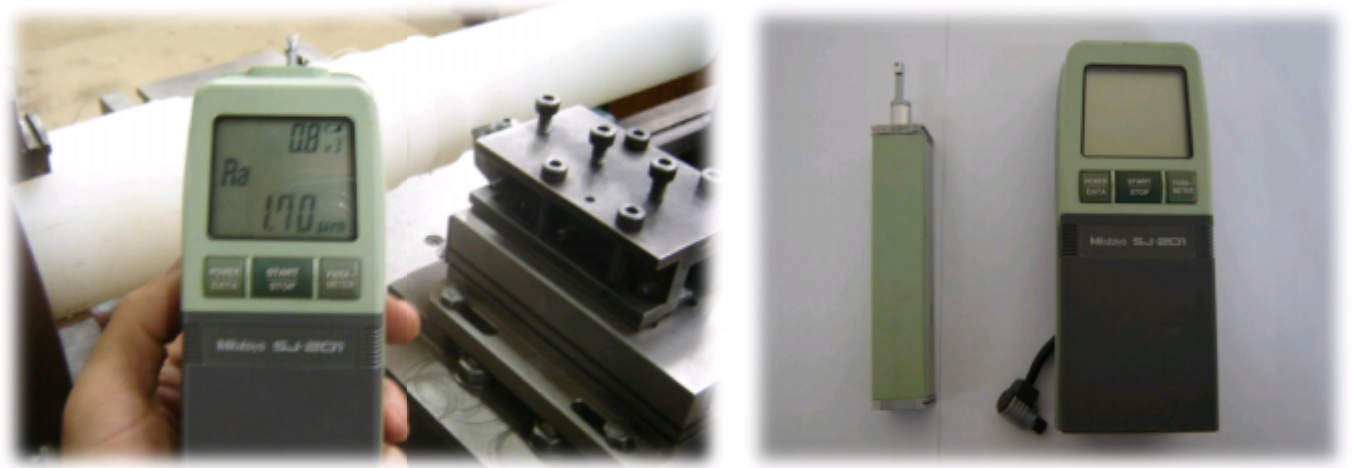


Figure II-10 Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.

II-2.7 STANDARD GAGE - VISUAL 250 pour la mesure de l'usure en dépouille VB

VISUAL 250 est la réponse à une demande croissante de l'industrie pour des systèmes capables de mesurer des formes ou des matières hors d'atteinte des moyens tactiles. La nouvelle VISUAL 250 manuelle, compacte mais sans compromis quant à ses performances métrologiques, est à même de satisfaire la demande du marché dans le domaine de la mesure 2D. Sa conception mécanique est d'une grande robustesse, ce qui permet une utilisation de la machine aussi bien en atelier que dans le laboratoire de mesure. Equipée de VISUAL 250 se révèle un moyen multitâche et multiutilisateur parfait pour la mesure sans contact, *figure II-11*.

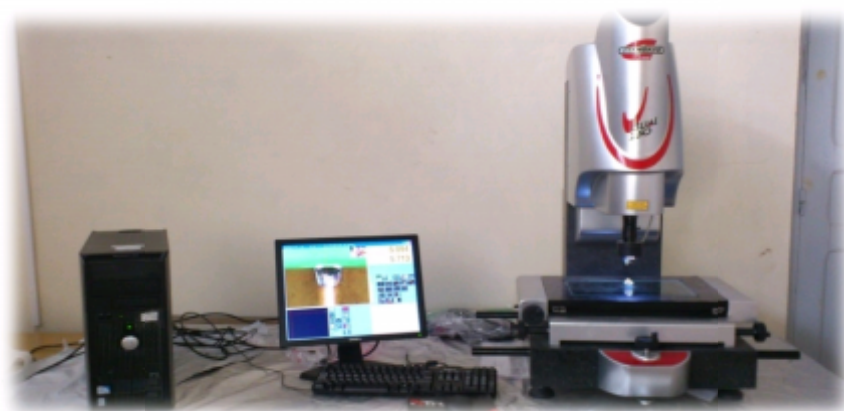


Figure II-11 VISUAL 250 pour la mesure de l'usure.

II-2.8 Autres équipements

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

II-3 Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p), le temps d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). Les conditions de coupe utilisées pour nos essais sont indiquées dans les *tableaux II-4 et II-5*. Tous les essais ont été réalisés sans lubrification en ce qui concerne la première partie puis avec lubrification en huile soluble dans la deuxième partie.

| Les paramètres constants | Valeurs | Les paramètres variables | Valeurs |
|--------------------------|-------------|--------------------------|---|
| V_c (m/min) | 110 | f (mm/tr) | 0,08 ; 0,12 ; 0,16 ; 0,20 ; 0,24 |
| a_p (mm) | 0,2 | | |
| V_c (m/min) | 110 | a_p (mm) | 0,20 ; 0,40; 0,60; 0,80; 1 |
| f (mm/tr) | 0,08 | | |
| a_p (mm) | 0,2 | V_c (m/min) | 50, 70, 110, 156, 220 |
| f (mm/tr) | 0,08 | | |

Tableau II-4 Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité (essais courte durée).

| Les paramètres constants | Valeurs | Les paramètres variables | Valeurs |
|--------------------------|-------------|--------------------------|-----------------------|
| V_c (m/min) | 110 | T(temps d'usinage) | 2; 4; 6; 8; 10 |
| a_p (mm) | 1 | | |
| f (mm/tr) | 0,12 | | |

Tableau II-5 Conditions de coupe pour les essais de la rugosité en fonction du temps (essais longue durée).

II-4 Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c, f, a_p), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil ($\alpha, \gamma, \lambda, \chi, \epsilon_r$), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité, ... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

II-4.1 Méthode de planification des expériences

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

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

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c, f, a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

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

Où:

- ✓ N : nombre d'essais;
- ✓ q : nombre de niveaux de variations des facteurs de base;
- ✓ k : nombre de facteurs de base.

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

Nous avons alors: $N=3^3=27$.

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

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

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

Tableau II-6 Matrice de planification pour un plan 3³.

II-5 Conclusion

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

Chapitre III
Étude de l'Usinabilité
du polyamide PA6

III-1 Introduction

Ce chapitre porte sur l'évolution des différents phénomènes de coupe étudiée tels que les efforts et les pressions de coupe, la rugosité de surface pour les différents paramètres de coupe à l'entrée telle que V_c , f , a_p et l'arrosage. Les résultats expérimentaux obtenus à partir des mesures effectuées par les équipements exposés au chapitre II seront présentés et nous proposons une analyse complète pour comprendre le comportement du couple outils-matière en tournage.

III-2 Essais réalisés

Quatre types d'essais ont été réalisés, pour cela on a réalisé deux types d'usinage à sec et avec lubrification et pour chaque types nous avons choisie deux nuances de coupe différentes, SPUN 120408 sans brise coupeau et SPMR120308 avec brise-copeau, ces essais nous permettant de caractériser l'usinabilité de polymère choisi (polyamide PA6).

Le déroulement des essais sont comme suites:

- Essais de courtes durées, effectués sur des paliers de 20mm de longueur et de 90 mm de diamètre. Usinage à sec (sans lubrification), répété pour les deux nuances.
- Essais de courtes durées, effectués sur des paliers de 20mm de longueur et de 90 mm de diamètre. Usinage lubrifié par les huiles solubles.
- Essais de rugosité en fonction de temps en utilisant une barre de polyamides PA6 de diamètre 90 mm et de longueur de 400 mm.

L'ensemble des résultats indiqués dans ce chapitre sont comme suit:

- ✓ Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) sur les efforts de coupe.
- ✓ Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) sur les pressions de coupe.
- ✓ Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) sur la rugosité des surfaces.
- ✓ Résultats de l'évolution de la rugosité en fonction du temps.

III-3 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe

La *figure III-1* représente un exemple d'acquisition des efforts de coupe par la plateforme Kistler. Ces résultats correspondent aux profils des trois composantes des efforts enregistrés (effort axial, effort radial et effort tangentiel).

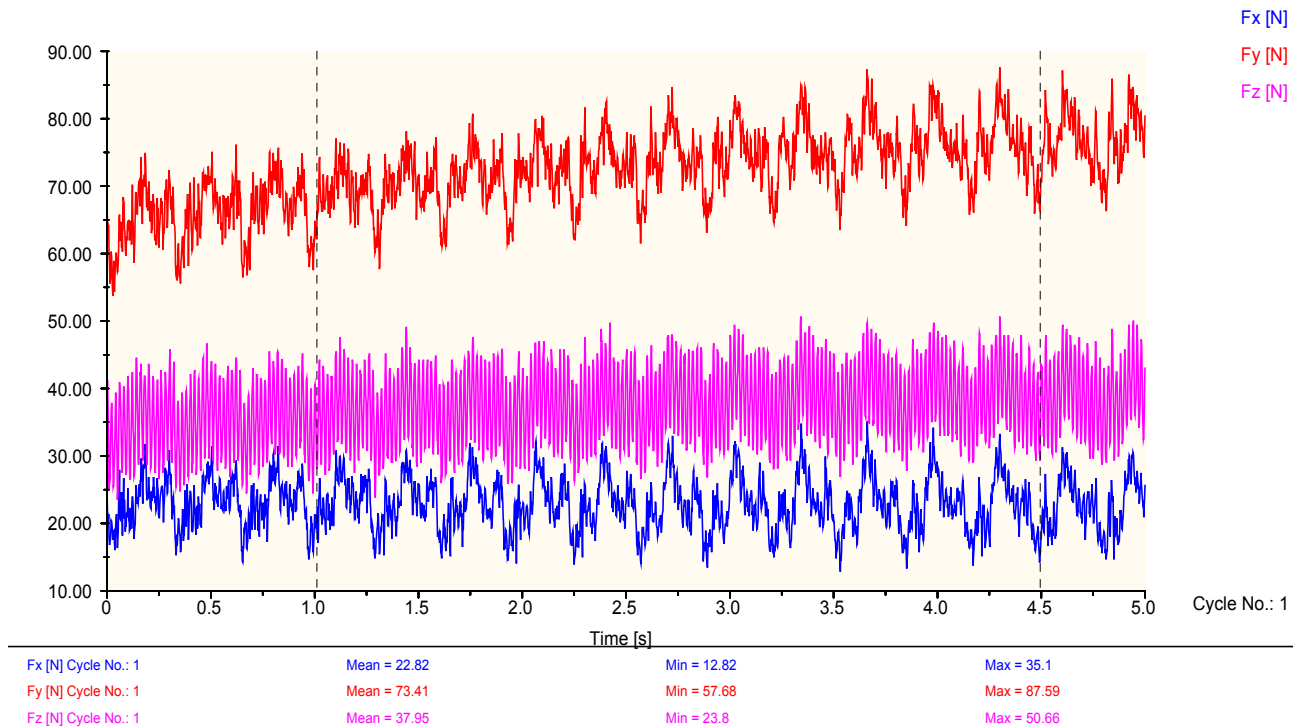


Figure III-1 Exemple d'acquisition des efforts de coupe.

III-3.1 Influence de la vitesse de coupe

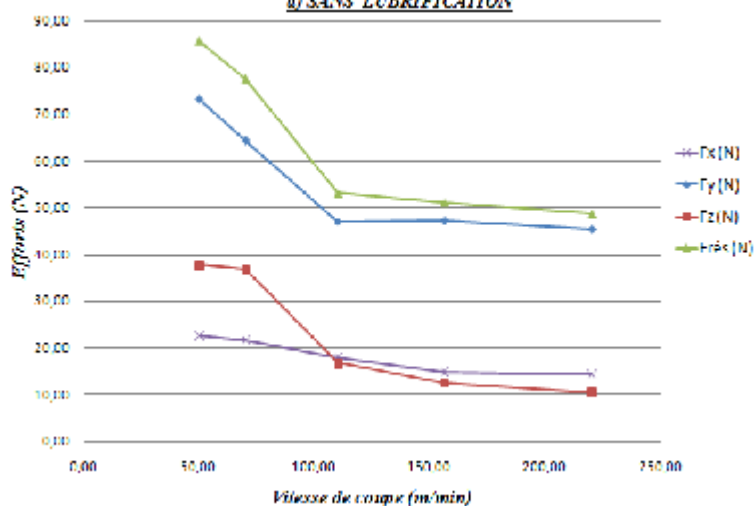
La *figure III-2 (a, b, c et d)* montre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les deux essais de coupe testés. On remarque une diminution des efforts de coupe, de cela est dû à l'augmentation de la température dans la zone de coupe qui rend le matériau plus malléable et s'écoule facilement sur la surface d'attaque.

Pour la nuance SPUN 120408, l'usinage à sec génère une quantité de chaleur importante due à la forme de plaquette incompatible pour l'usinage de ce type de matériau. Si on compare les deux essais, à sec et avec lubrification, on remarque que l'usinage avec lubrification génère une diminution remarquable des efforts de coupe.

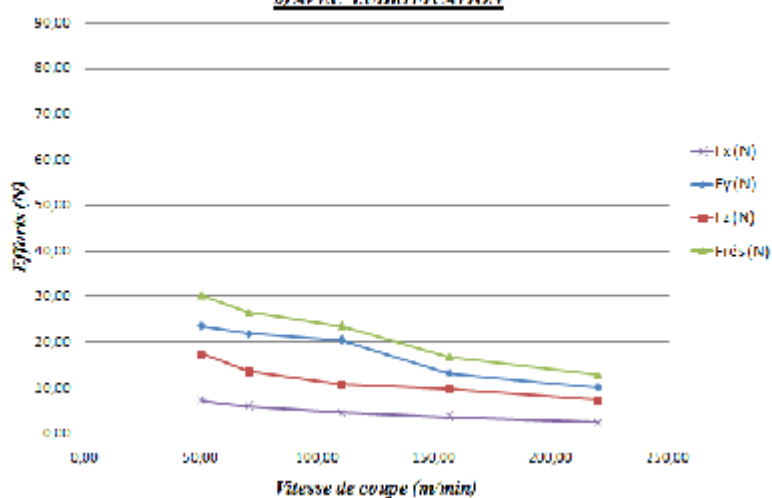
Pour la nuance SPMR120308 avec brise-copeau, les essais avec ou sans lubrification donnent des valeurs des efforts très voisins avec une légère différence avec la présence de lubrification.

1) Nuance SPUN 120408

a) SANS LUBRIFICATION

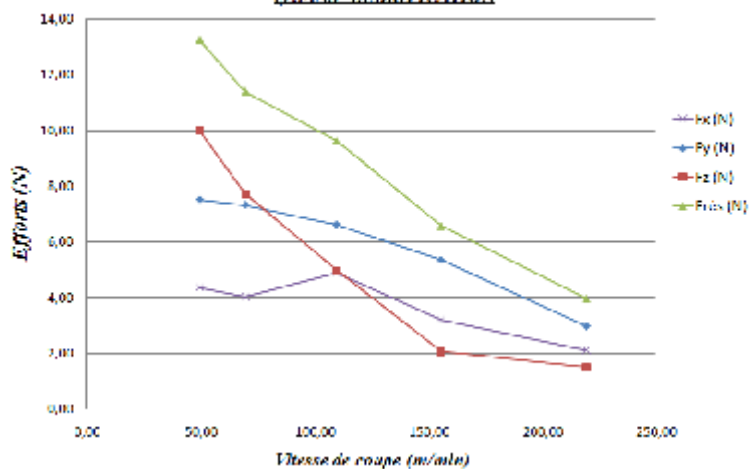


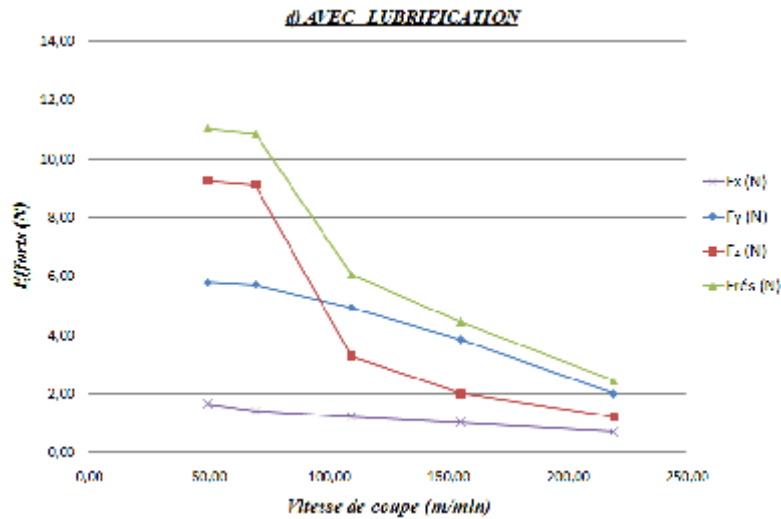
b) AVEC LUBRIFICATION



2) Nuance SPMR 120308

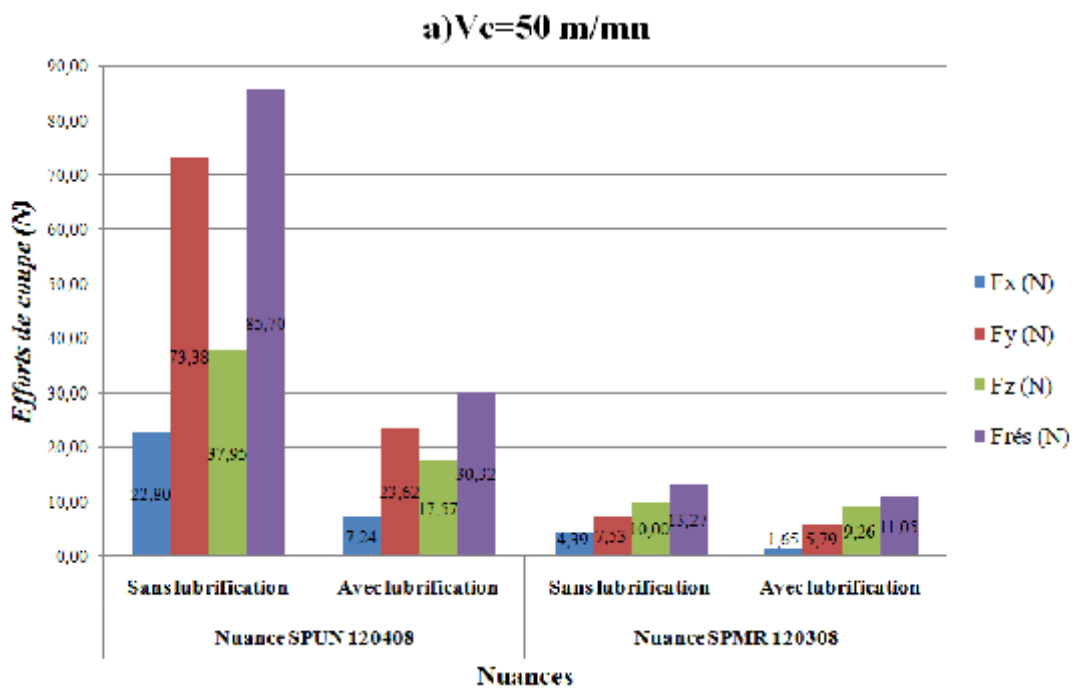
c) SANS LUBRIFICATION





La figure III-2 Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse pour $f=0,08\text{mm/tr}$; $ap=0,2\text{mm}$.

Les histogrammes de la figure III-3 (a et b) comparent l'évolution des résultats des efforts de coupe F_x , F_y , F_z et $F_{rés}$ lors de l'usinage de polyamide PA6 avec les deux plaquettes à sec et avec lubrification.



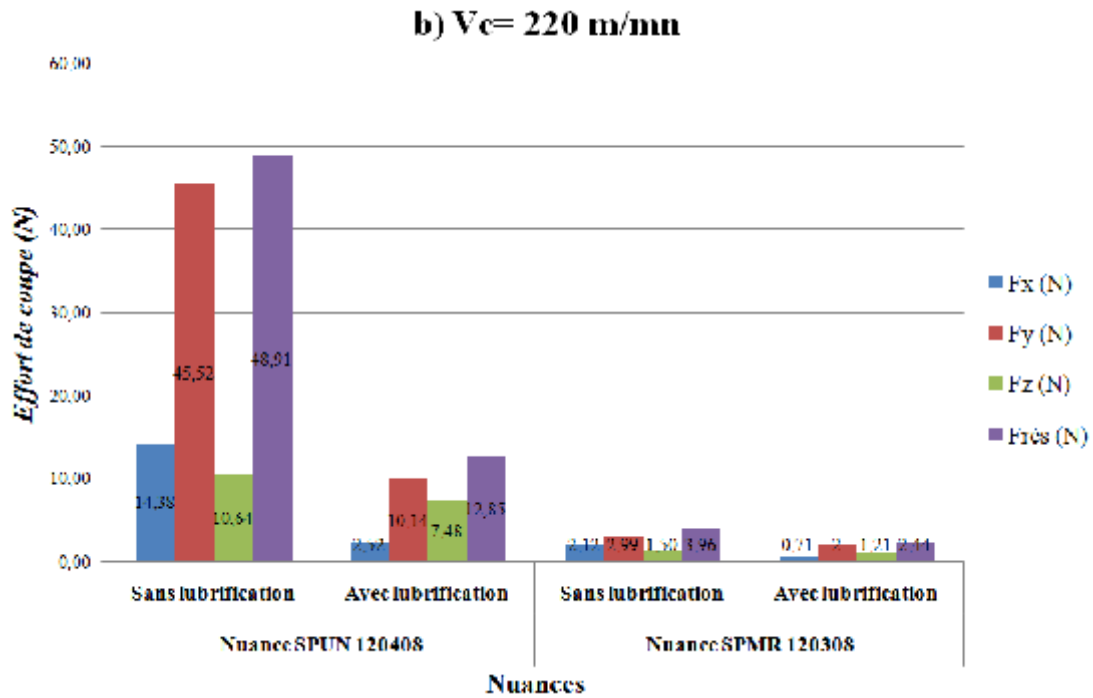


Figure III-3 Comparaison entre les efforts enregistrés pour les deux expériences pour $f=0,08 \text{ mm/tr}$; $a_p=0,2 \text{ mm}$.

En analysant les résultats de la **Figure III-3(a et b)**, on constate que les efforts de coupe diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Une élévation de la vitesse de coupe de 50 à 220m/min, pour la nuance SPUN 120408 entraîne un taux de diminution pour l'effort résultant (Frés) de 42,92% pour l'usinage à sec et de 57,61 % dans le cas d'une lubrification et de 70,15% pour la nuance SPMR 120308 à sec de 77,91 % par la présence de lubrification. En ce qui concerne le brise-copeau ce dernier reste toujours un facteur influent sur les efforts de coupe comme le montre la **Figure III-3 (a et b)**.

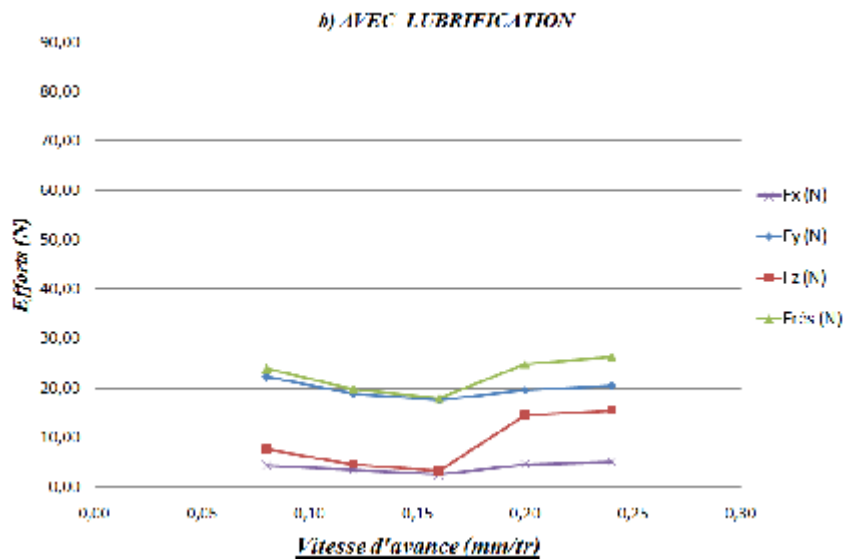
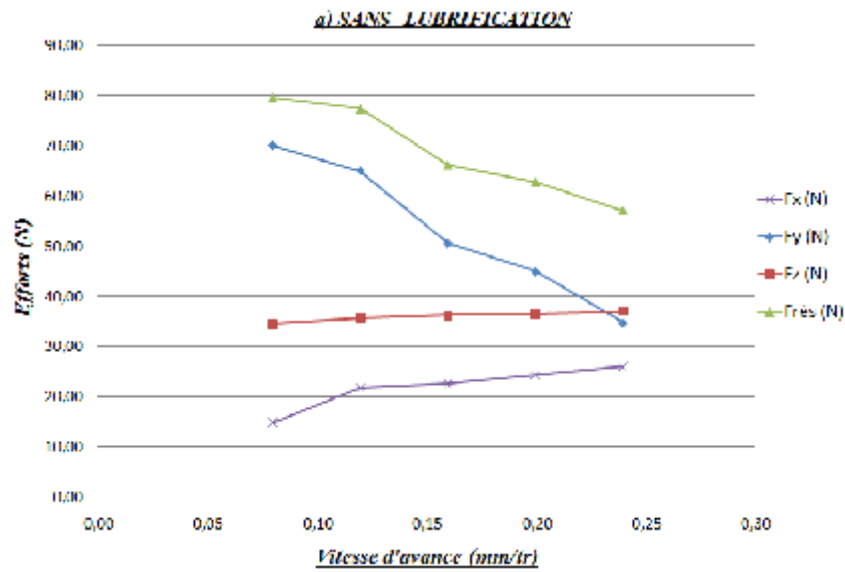
III-3.2 Influence de l'avance

La **figure III-4 (a, b, c et d)** illustre l'influence de l'avance sur les trois composantes de l'effort de coupe et l'effort résultant, Avec l'augmentation de l'avance, la section du copeau cisailé accroît et par conséquent l'effort demandé pour l'enlèvement de la matière augmente. Ceci est constaté lorsqu'on a réalisé tous les essais.

Dans le cas de la nuance SPUN 120408 ou on a remarqué que les forces radiales porte les valeurs les plus importantes pendant l'usinage à sec. Cela peut être expliqué par l'effet de la dilatation thermique comme le montre la **figure III-4 (a)**. En analysant

l'allure de l'effort de coupe résultant à la *figure III-4 (b, c et d)*, on constate que ce dernier augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Une élévation de la vitesse d'avance de 0,08 mm/tr à 0,24 mm/tr, conduit à une augmentation de l'effort résultant de 8,93% pour la nuance SPUN 120408 avec la lubrification, de 59.29 % pour SPMR 120308 à sec et de 60,53 % pour l'usinage avec lubrification pour la même nuance. Donc la lubrification joue un rôle primordiale pour diminuer les efforts avec des avances importantes pour la nuance SPUN 120408 par contre avec SPMR 120308 l'effet de la lubrification est négligeable.

1) Nuance SPUN 120408



2) Nuance SPMR 120308

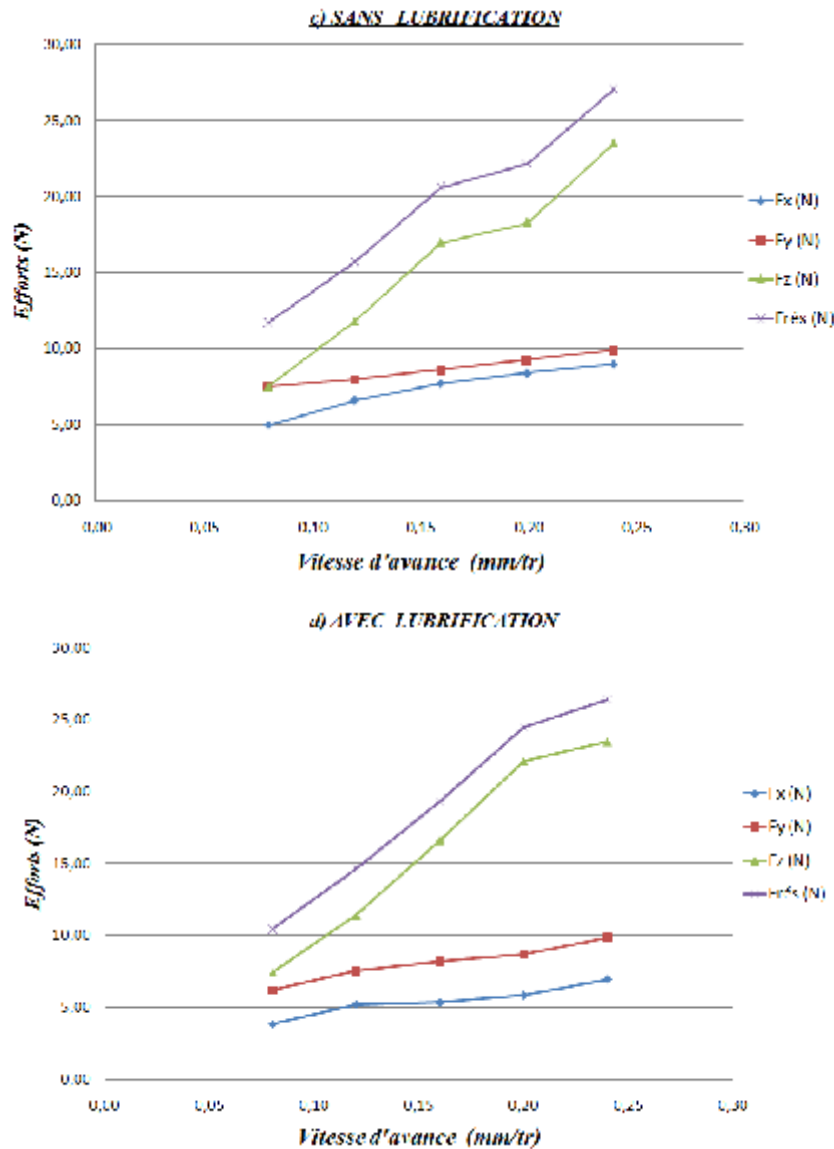


Figure III-4 Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance; $V_c=110m/min$, $a_p=0,2mm$.

De la **figure III-5**, on peut dire qu'une augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24mm/tr on a enregistré une élévation des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) comme suit (16,50; 8,23; 51,19) % pour la nuance SPUN 120408 lors de l'usinage lubrifié, et une augmentation (44,71; 24,43; 68,01) % pour la nuance SPMR 120308 à sec et (44,38; 36,91; 68,41) % pour un usinage avec lubrification pour la même nuance. L'analyse des résultats montre aussi que l'effort tangentiel (F_z) est le plus affecté par l'avance, suivi par l'effort axial (F_x) et en dernier lieu par l'effort radial (F_y).

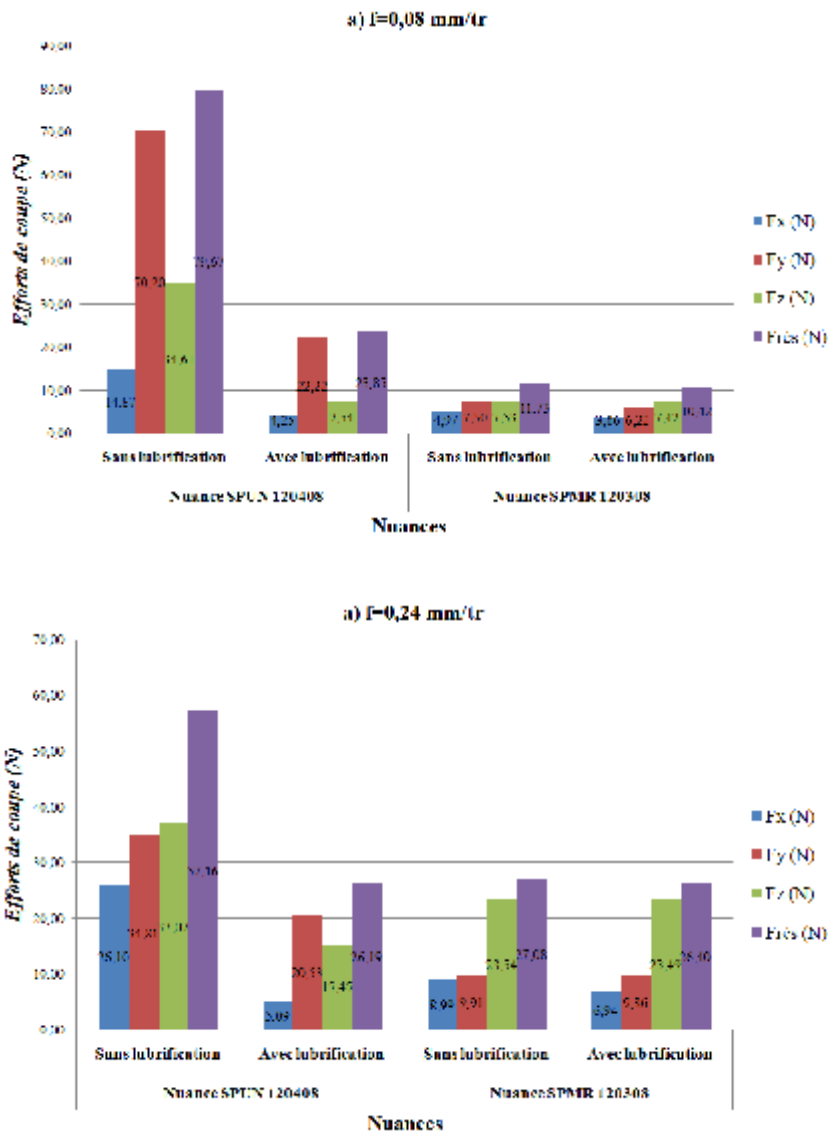


Figure III-5 Comparaison entre les deux régime de coupe;
 $V_c=110\text{m/min}, a_p=0,2 \text{ mm}$.

III-3.3 Influence de la profondeur de passe

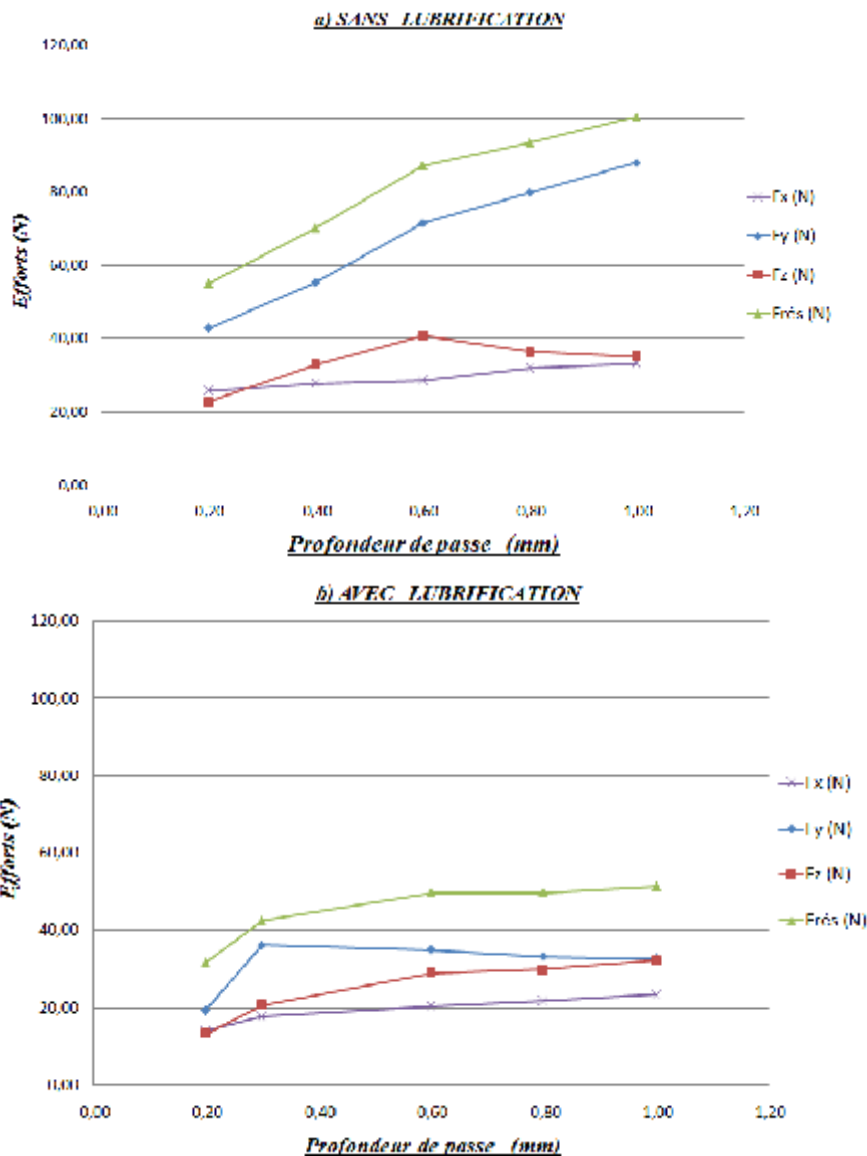
Les résultats présentés dans la *figure III-6 (a, b, c et d)*, montre la variation des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour les deux nuances de coupe testées. Avec l'augmentation de cette dernière, l'épaisseur du copeau devient très importante ce qui conduit à une augmentation du volume de métal à déformer et cela nécessite des efforts de coupe importants pour l'enlèvement du copeau.

Les résultats montrent aussi que pour des petites valeurs de la profondeur de passe inférieure à un rayon de bec (0,4 mm), l'effort axial Fx est prépondérant par rapport à l'effort tangentiel Fz. Au-delà de la valeur de $a_p= 0,4\text{mm}$, l'effort tangentiel dépasse l'effort axial. Cela peut être expliqué par le travail de l'outil en tournage par son rayon du

bec aux petites profondeurs de passe. Avec l'augmentation de a_p , la coupe se fait en dehors de la limite du rayon du bec de l'outil et la pièce présente une résistance à la pénétration de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et en particulier axial. Car la longueur de l'arête tranchante en contact avec la pièce augmente, autrement dit l'outil ne travaille plus avec son rayon seulement. En remarque que la valeur de la force radiale est importante par rapport à aux forces axiales et tangentielles cela est exprimé par l'appui de la pièce sur l'outil de coupe sous l'effet des dilatations thermiques qui devient importantes lorsqu'on augmente la profondeur de passe, ce problème a été corrigé par la présence de la lubrification.

Dans la **Figure III-6 (c et d)** on constate que les valeurs des efforts sont pratiquement les mêmes avec une petite différence due à la présence de la lubrification.

1) Nuance SPUN 120408



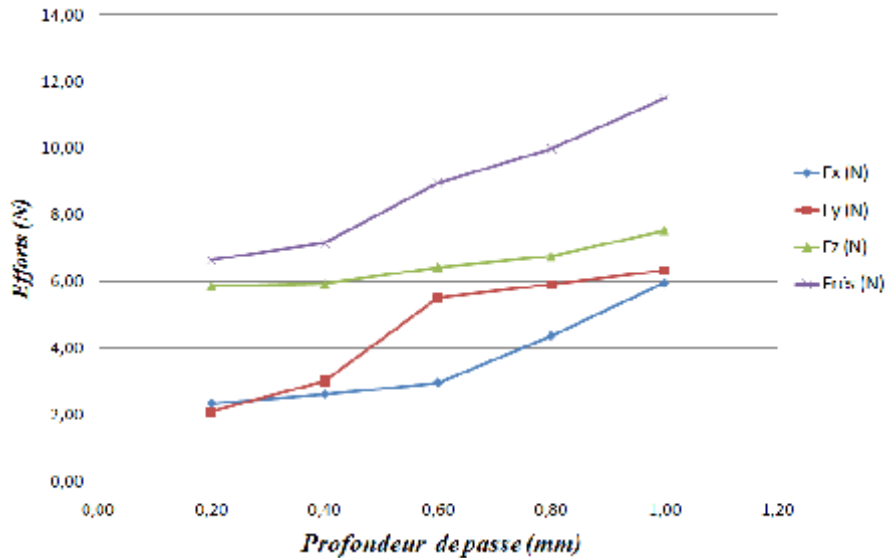
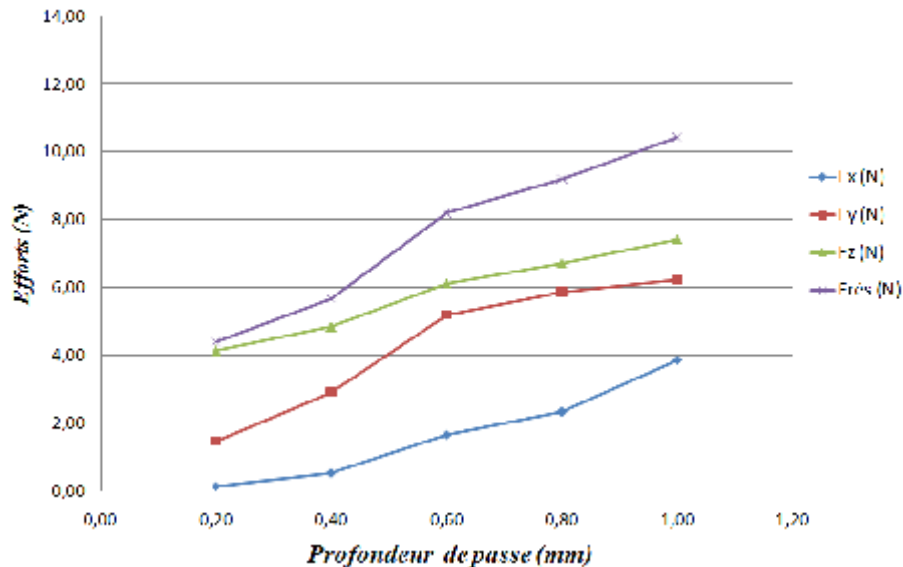
2) Nuance SPMR 120308**c) SANS LUBRIFICATION****d) AVEC LUBRIFICATION**

Figure III-6 Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe;

$$V_c = 110 \text{ m/min}, f = 0,08 \text{ mm/tr.}$$

L'analyse de la **figure III-7**, montre qu'une augmentation de la profondeur de passe de (0,2 à 1) mm, on a enregistré un taux d'élévation pour les trois composantes (F_x , F_y , F_z) successivement de (22,37; 51,19; 35,09) % pour la nuance SPUN à sec, (40,38; 40,42; 58,44) % avec lubrification pour la même nuance, (60,63; 66,82; 22,31) % pour la nuance SPMR à sec, (96,37; 76,52; 44,33) % pour la nuance SPMR avec lubrification.

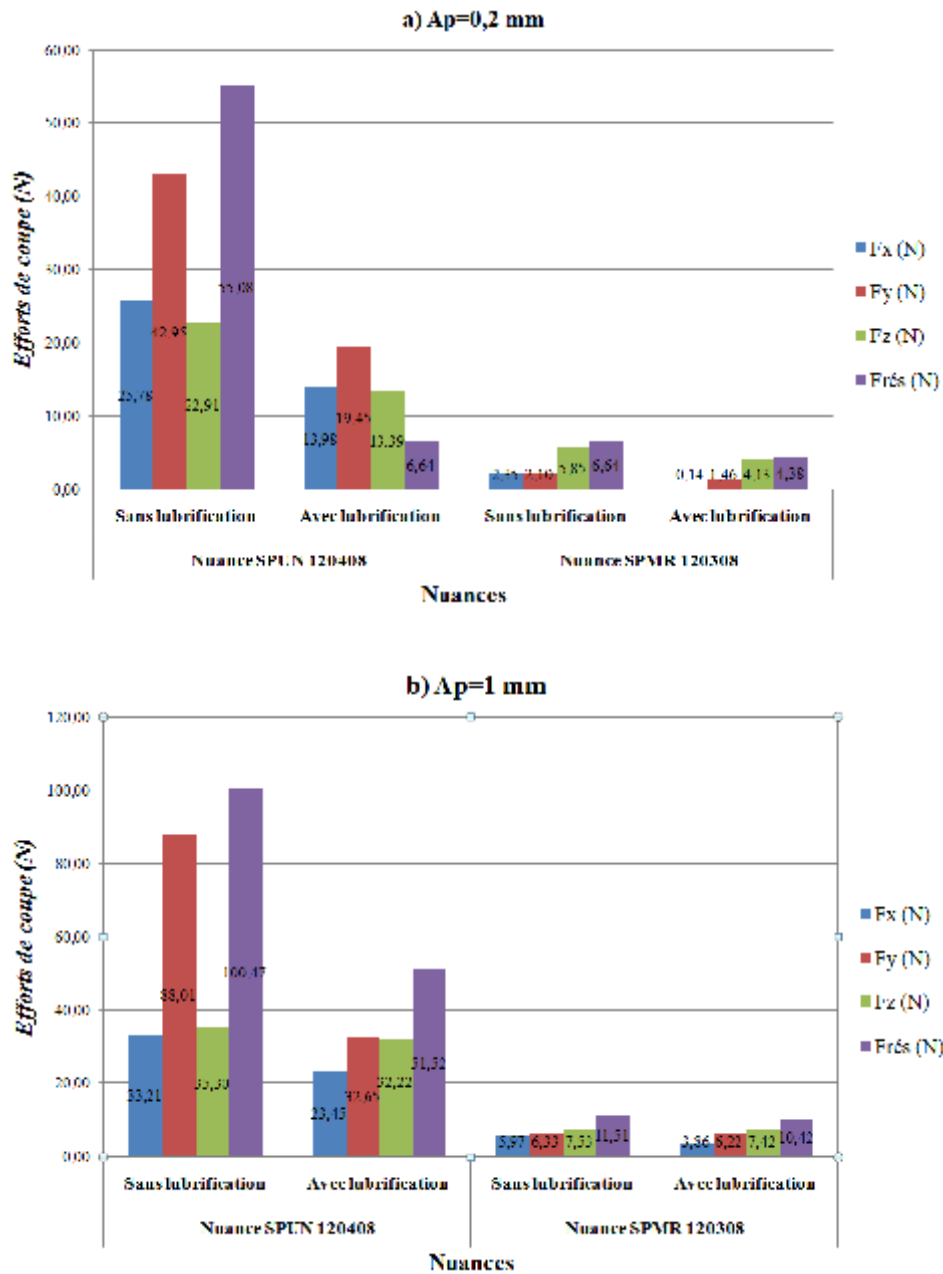


Figure III-7 Comparaison entre les deux nuances de matériau de coupe;

$$V_c=110m/min, f=0,08mm/tr.$$

III-4 Evolution des pressions de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe

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

$$K_c = F_c / (f \times a_p) \tag{III-1}$$

K_c : Pression de coupe [MPa].

$F_c=F_z$: Effort tangentiel [N].

f : Avance [mm/tr].

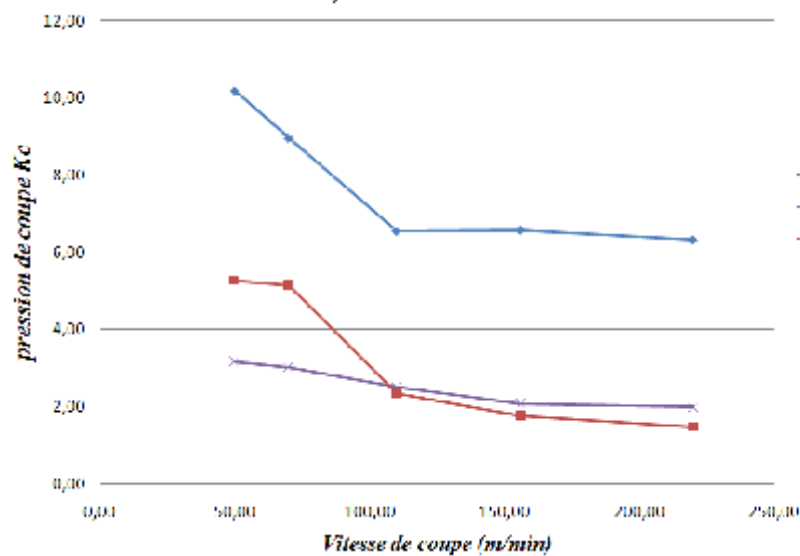
ap : Profondeur de passe [mm].

III-4.1 Influence de la vitesse de coupe

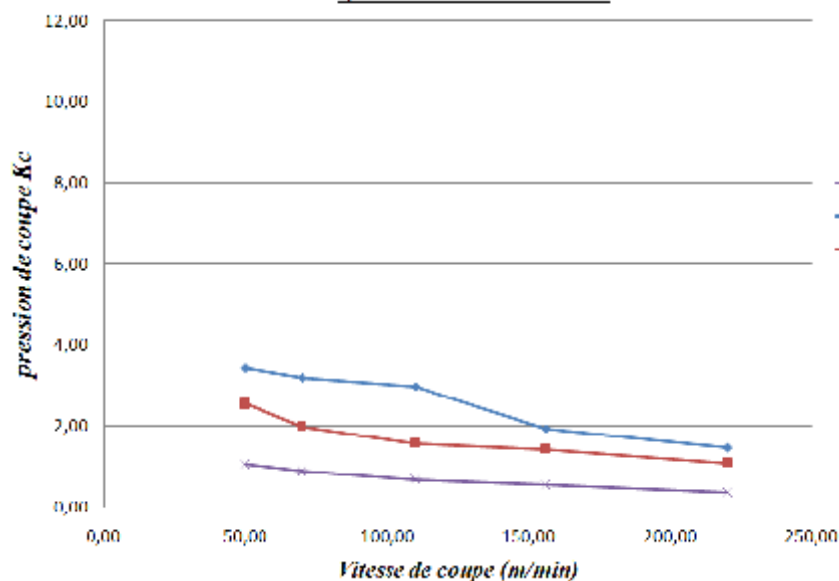
La *Figure III-8* Présente l'influence de la vitesse de coupe sur les efforts spécifiques. On peut remarquer sur cette figure que la pression de coupe diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Cette réduction peut s'expliquer par les hautes températures générées pendant la coupe et qui entraînent un ramollissement de la matière à l'interface pièce-outil-copeau et par conséquent une diminution des efforts et des pressions de coupe.

Nuance SPUN 120408

a) SANS LUBRIFICATION



b) AVEC LUBRIFICATION



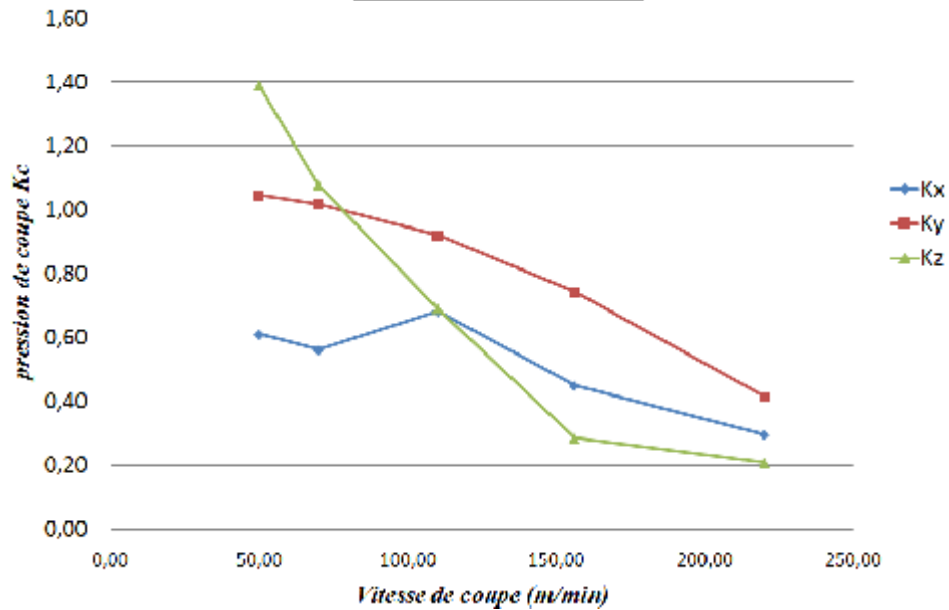
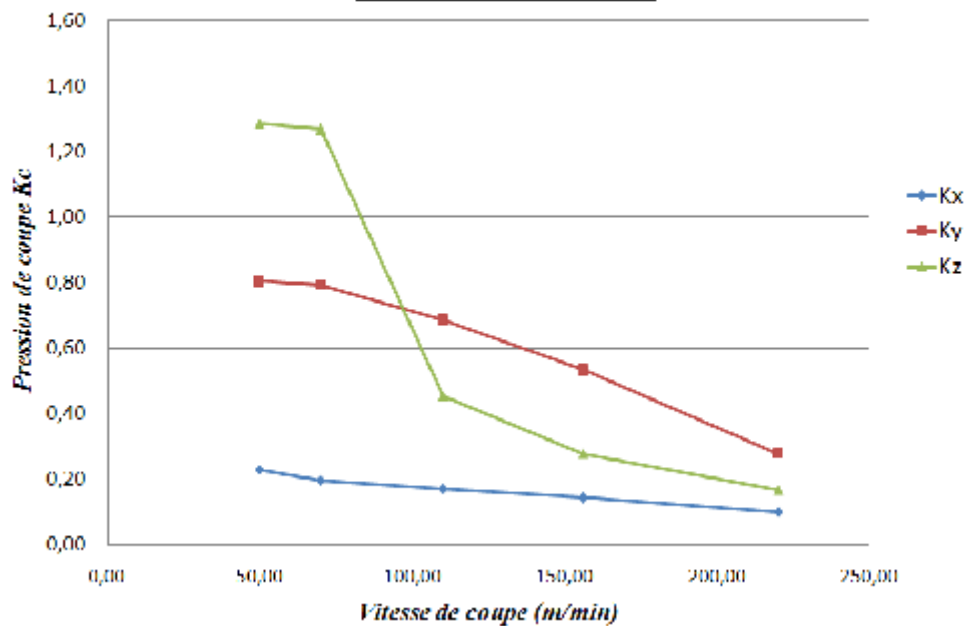
Nuance SPMR 120308c) SANS LUBRIFICATIONd) AVEC LUBRIFICATION

Figure III-8 Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse pour $f=0,08\text{mm/tr}$; $a_p=0,2\text{mm}$.

III-4.2 Influence de l'avance

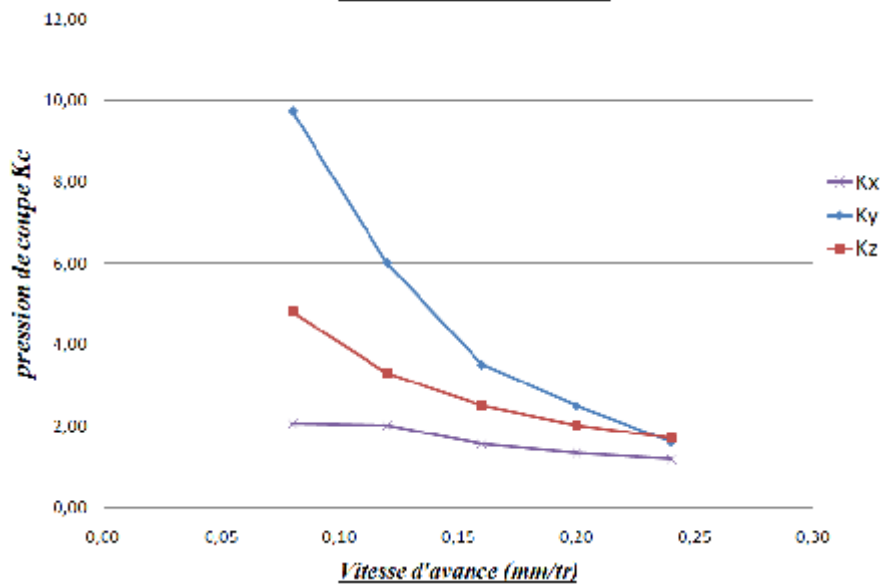
La **figure III-9** présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance. On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance, les pressions de coupe diminuent. Pour une faible avance, on enregistre des pressions extrêmement élevées. Pour une avance de $0,08\text{mm/tr}$, on a enregistré des valeurs maximales des pressions de coupe de (2,06; 9,75 et 4,80) N/mm^2 respectivement pour (Kx, Ky et Kz). Pour une avance de $0,24\text{ mm/tr}$, les

pressions chutent successivement de (41,49; 83,47; 64,29) % lors de l'usinage à sec avec la nuance SPUN, pour l'usinage lubrifié de la même nuance on a enregistré des valeurs maximales des pressions de coupe de (0,64; 3,34 et 1,13) N/mm² respectivement pour (Kx, Ky et Kz). Pour une avance de 0,24 mm/tr, les pressions chutent successivement de (60,07; 69,20; 31,69) %. Dans le cas de la nuance SPMR l'usinage a sec et l'usinage lubrifié donnent des résultats voisins concernant la pression de coupe.

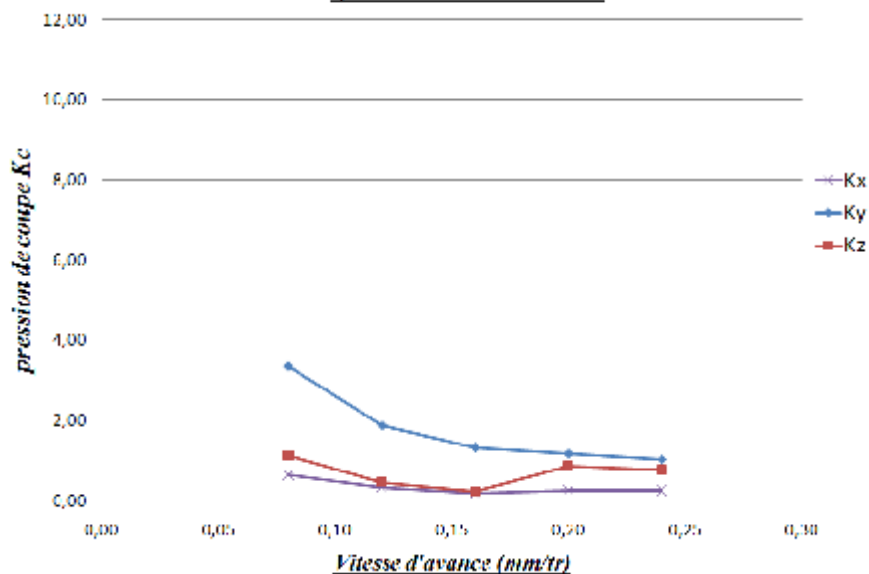
Ici, un compromis reste à faire entre la diminution des pressions de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance.

Nuance SPUN 120408

a) SANS LUBRIFICATION



b) AVEC LUBRIFICATION



Nuance SPMR 120308

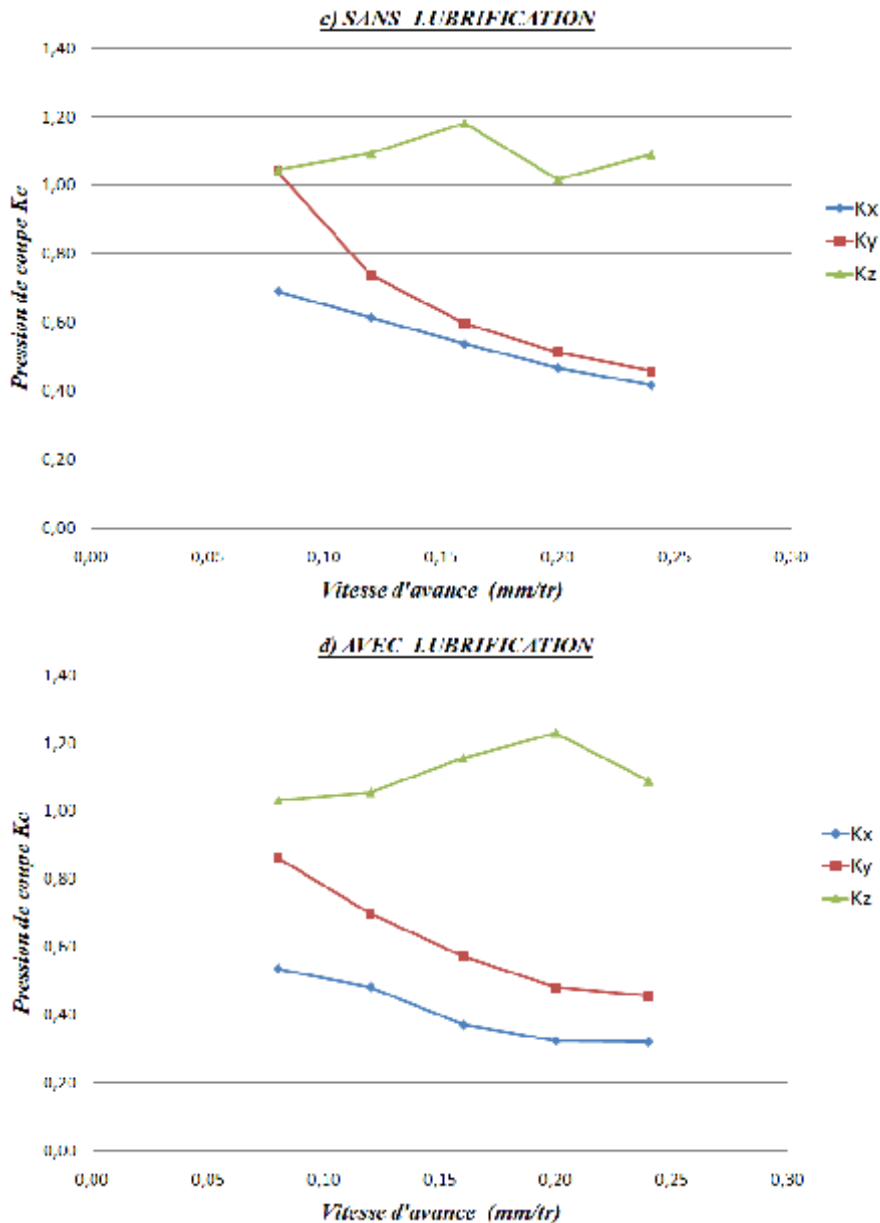


Figure III-9 Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance pour $V_c=110m/min, a_p=0,2mm$.

III-4.3 Influence de profondeur de passe:

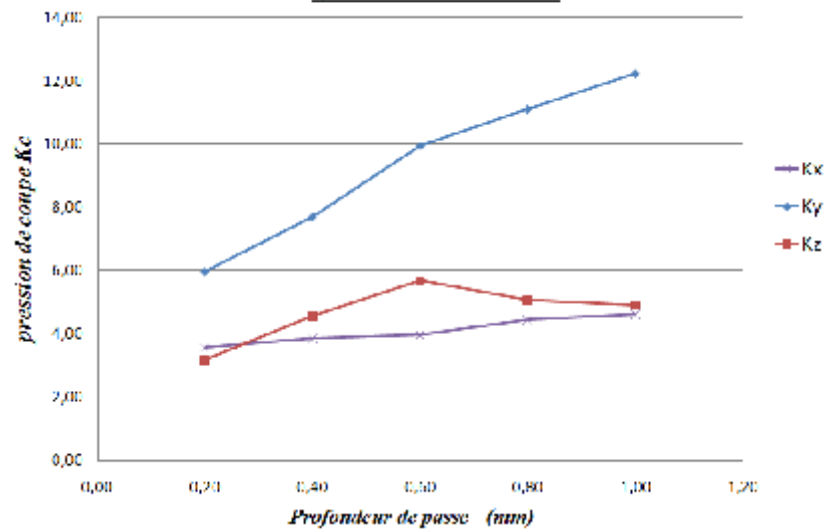
La **figure III-10** présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe, on remarque que l'augmentation de la profondeur de passe conduit à une augmentation des pressions de coupe c'est pour le cas de nuance SPUN (sans brise coupeau). Pour une augmentation de profondeur de passe de (0,2 à 1 mm), on enregistre une augmentation des pressions de coupe (Kx, Ky et Kz) successivement de (40,38; 40,42 et 58,44) % lors l'usinage à sec, pour l'usinage lubrifié on a enregistré une

élévation avec l'augmentation de la profondeur de passe jusqu'à une valeur supérieure au rayon du bec de l'outil ($a_p=0,4\text{mm}$). Au delà de cette valeur on enregistre une stabilisation avec une légère augmentation lorsque la profondeur de passe s'accroît de 0,4 à 1,0 mm.

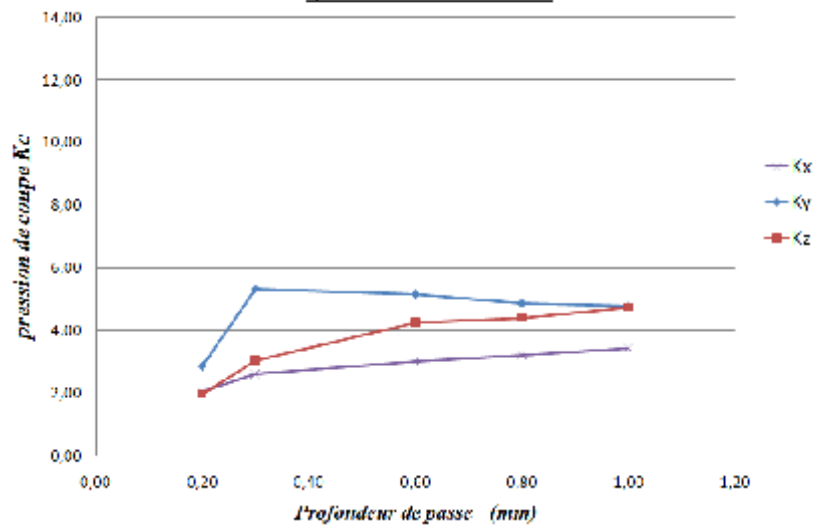
Concernant l'usinage à sec en utilisant la nuance SPMR, on enregistre une augmentation des pressions de coupe (K_x , K_y et K_z) successivement de (43,03; 51,42 et 12,90) % et de (92,85; 62,26 et 28,75) % pour l'usinage lubrifié.

Nuance SPUN 120408

a) SANS LUBRIFICATION



b) AVEC LUBRIFICATION



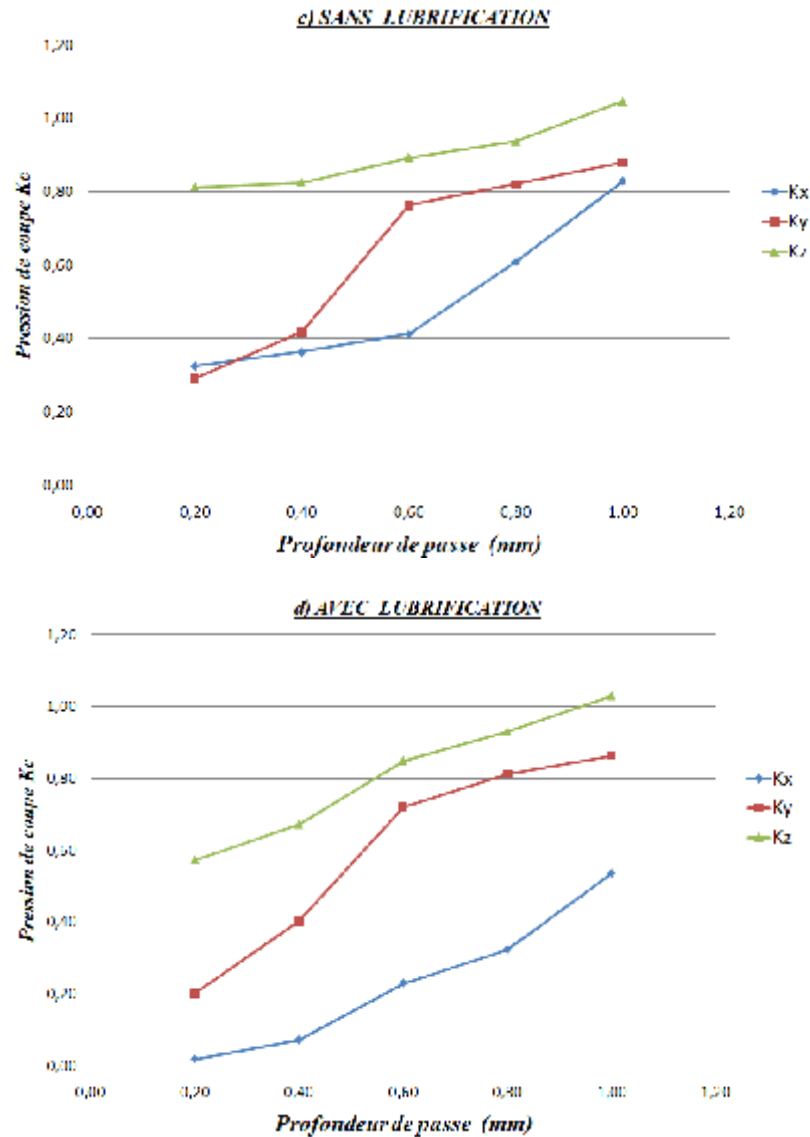
Nuance SPMR 120308

Figure III-10 Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=110\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$.

III-5 Evolution de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe

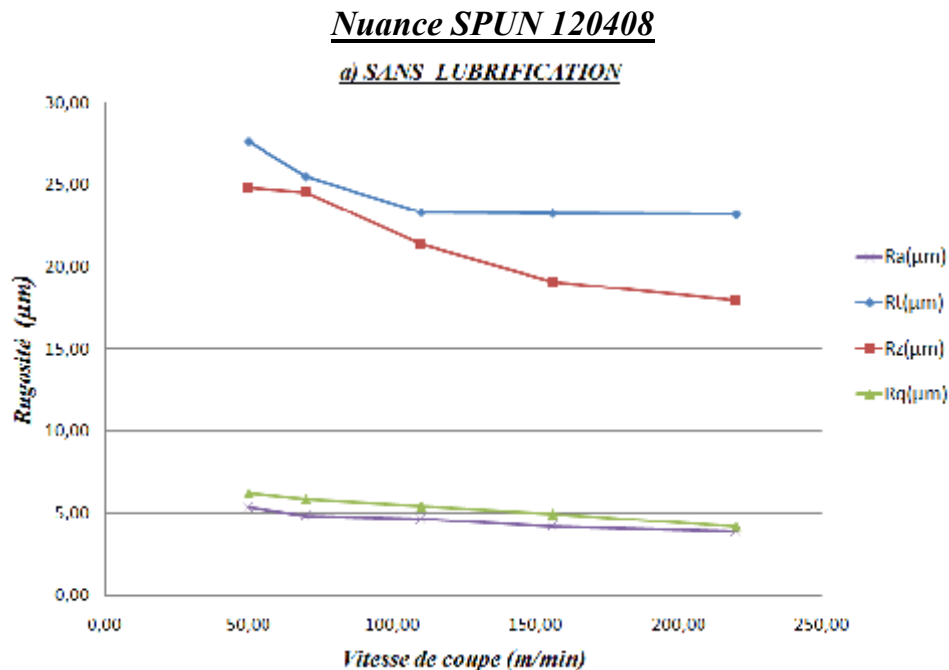
La caractérisation de la qualité de surface usinée a été limitée aux critères de rugosité totale (R_t), l'écart moyenne de la rugosité arithmétique (R_a) et la moyenne des hauteurs des irrégularités (R_z) et enfin l'écart moyen quadratique du profil évalué (sur une longueur de base) R_q .

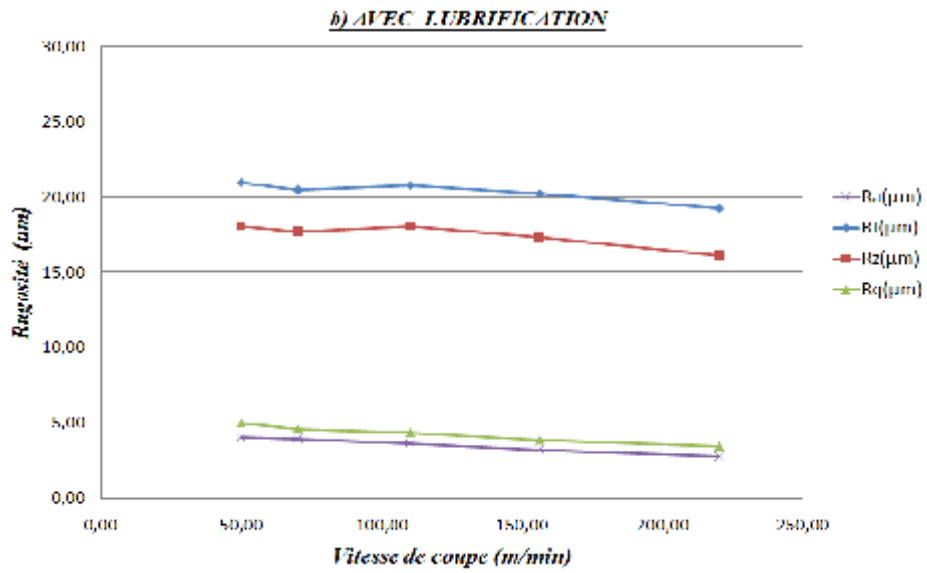
III-5.1 Influence de la vitesse de coupe

La *figure III-11 (a, b, c et d)* illustre l'influence de la vitesse de coupe sur les différents critères de la rugosité lors de l'usinage du polyamide PA6 avec les plaquettes de coupe SPUN 120408 & SPMR120408, chaqu'une avec deux régimes de coupe différents sans et avec lubrification. On remarque que pour l'usinage à sec avec la plaquette SPUN, la qualité de surface usinée reste presque stable le long de la plage des vitesses de coupe utilisées avec une légère diminution des valeurs de la rugosité. Dans l'usinage avec lubrification, on a enregistré une légère diminution de la rugosité.

Pour le SPMR, on a distingué deux zones, une entre 50 et 70 m/min où les critères de rugosité (R_a , R_t , R_z , R_q) chutent brusquement de (2,03 à 1,74; 16,29 à 13,13; 16,36 à 13,04 et 2,99 à 2,25) μm , pour l'usinage à sec et (2,37 à 1,98; 18,32 à 13,04; 16,36 à 11,04 et 2,99 à 2,25) pour l'usinage avec lubrification, au-delà de la vitesse 70 m/min les valeurs de la rugosité se stabilise avec une légère diminution.

La *figure III-11* montre que la lubrification est importante pour les vitesses les plus élevés et que l'usinage lubrifier avec la plaquette SPMR donne des meilleurs états de surface. Les critères de la rugosité à la vitesse 220m/min sont de l'ordre de (1,03 μm pour R_a ; 9,01 μm pour R_z ; 6,29 μm pour R_t et 1,67 μm pour R_q).





Nuance SPMR 120308

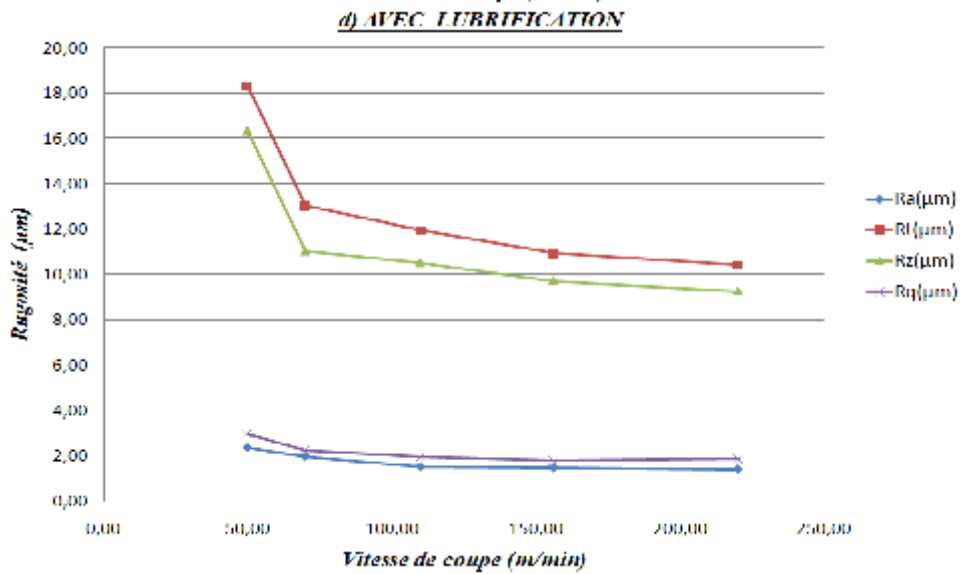
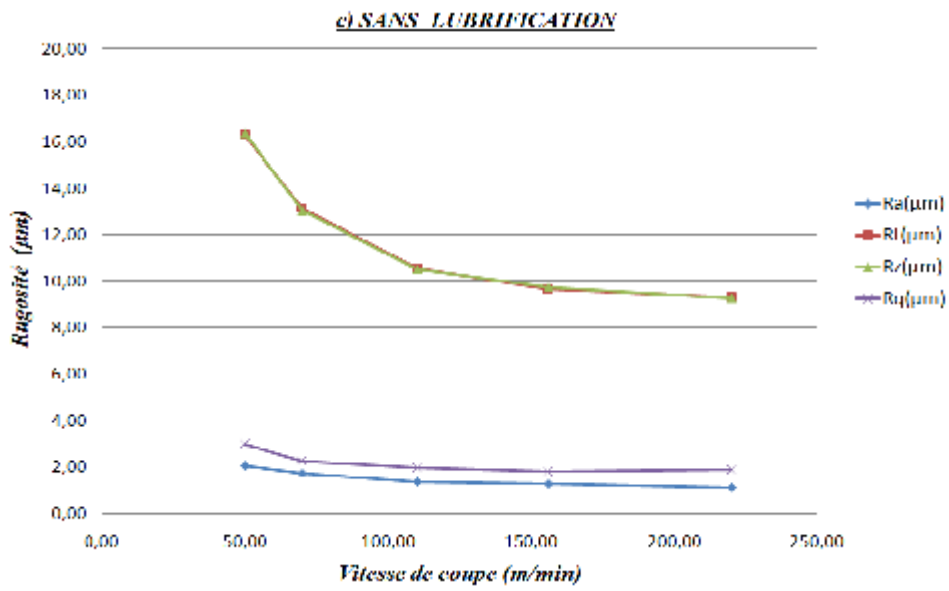


Figure III-11 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour

$V_c=110\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$.

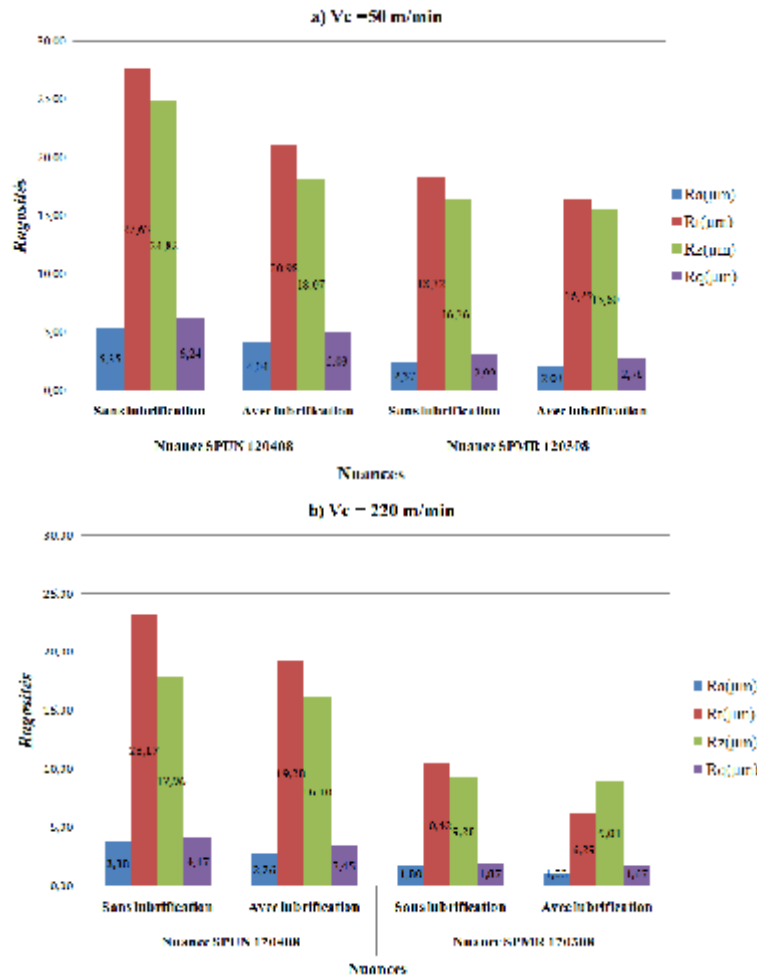


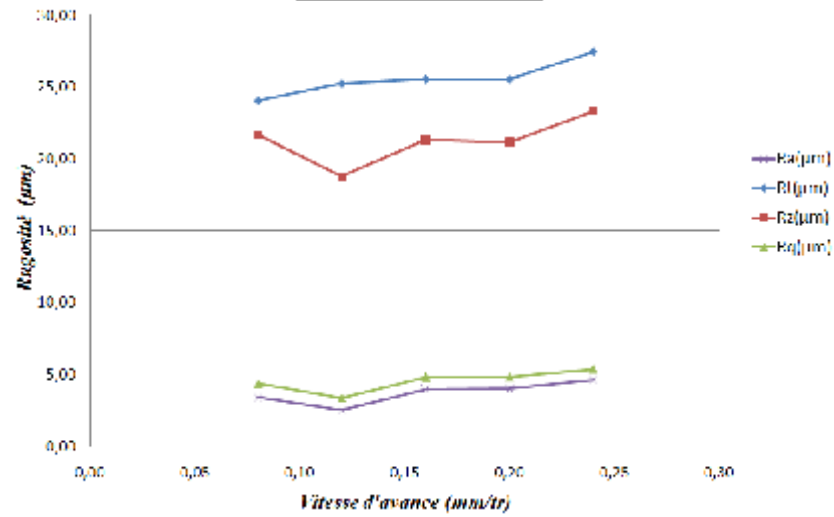
Figure III-12 Comparaison entre les deux nuances de matériau de coupe; $a_p=0,2 \text{ m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$.

III-5.2 Influence de l'avance

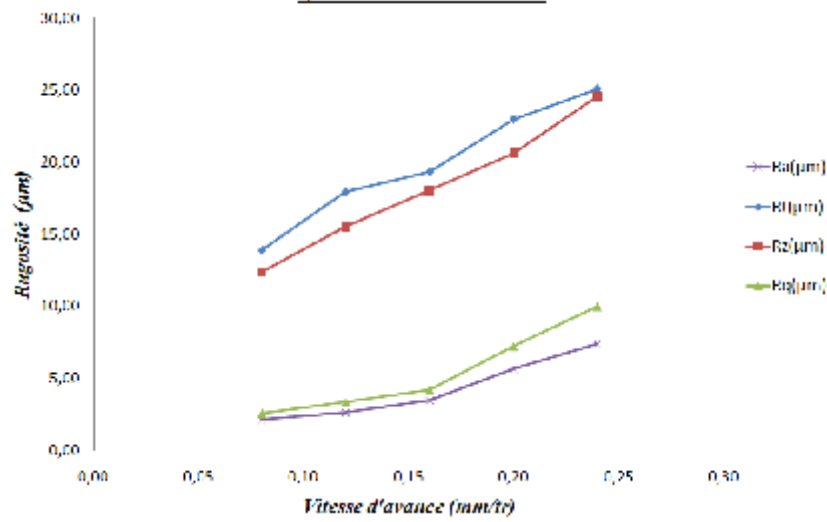
Les figures III-13 et III-14 montrent que l'avance a une influence très significative, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons sont d'autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée. En pratique, les conséquences de l'influence de l'avance sur la rugosité sont comme suit: l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,24mm/tr; conduit à une augmentation des critères de rugosité (Ra, Rt, Rz et Rq) successivement de (26,55; 12,35; 7,11 et 18,73) % pour la plaquette SPUN à sec, (70,98; 44,66; 44,66 et 74,1) % avec lubrification, (63,29; 39,40; 40,35 et 57,78) % pour la nuance SPMR sans lubrification, (62,66; 46,45; 40,50 et 57,12) %, dans le cas de présence du lubrification on remarque que le critère Ra est le plus affecté par l'avance.

Nuance SPUN 120408

a) SANS LUBRIFICATION

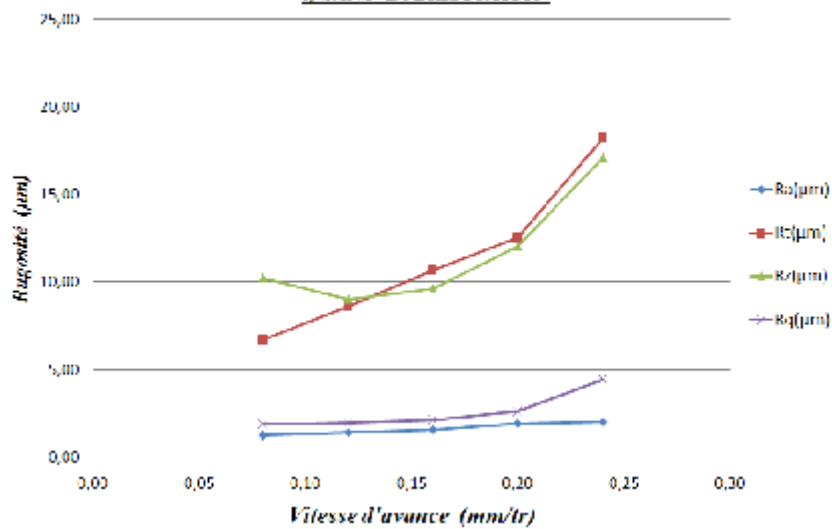


b) AVEC LUBRIFICATION



Nuance SPMR 120308

c) SANS LUBRIFICATION



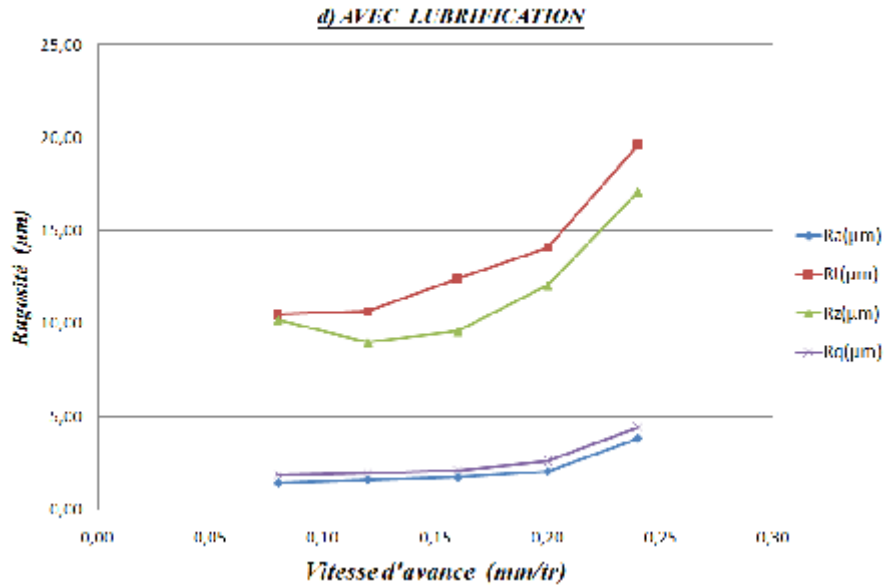


Figure III-13 Evolution de la rugosité en fonction de l'avance par tour pour $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0,5\text{mm}$.

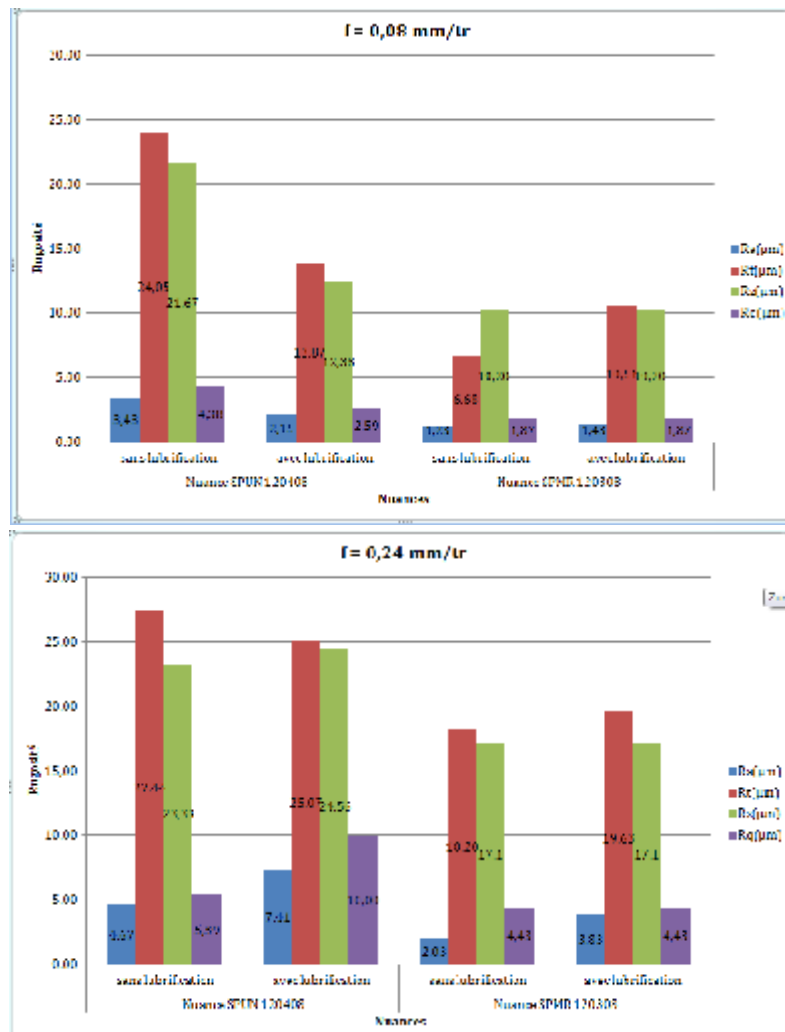


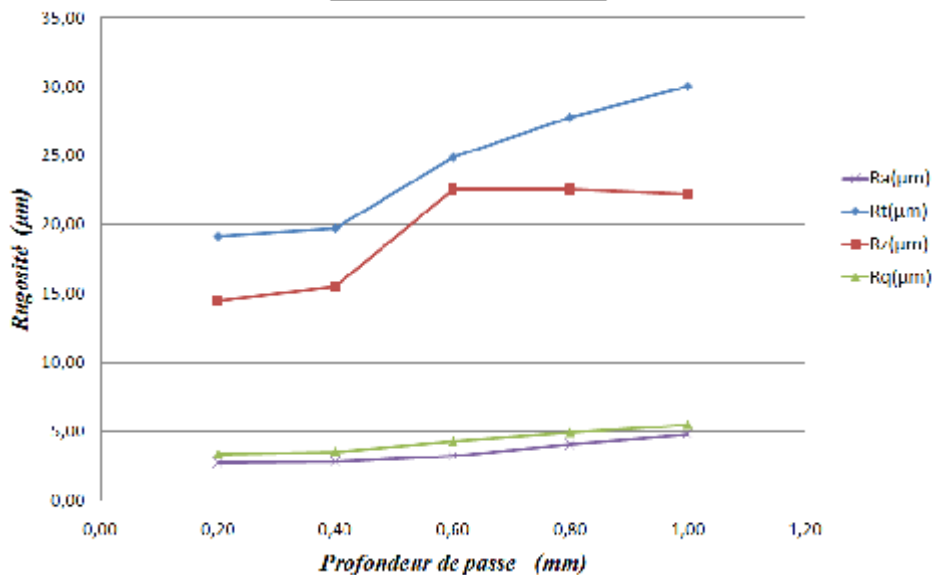
Figure III-14 Comparaison entre les deux nuances de matériau de coupe pour $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$.

III-5.3 Influence de la profondeur de passe

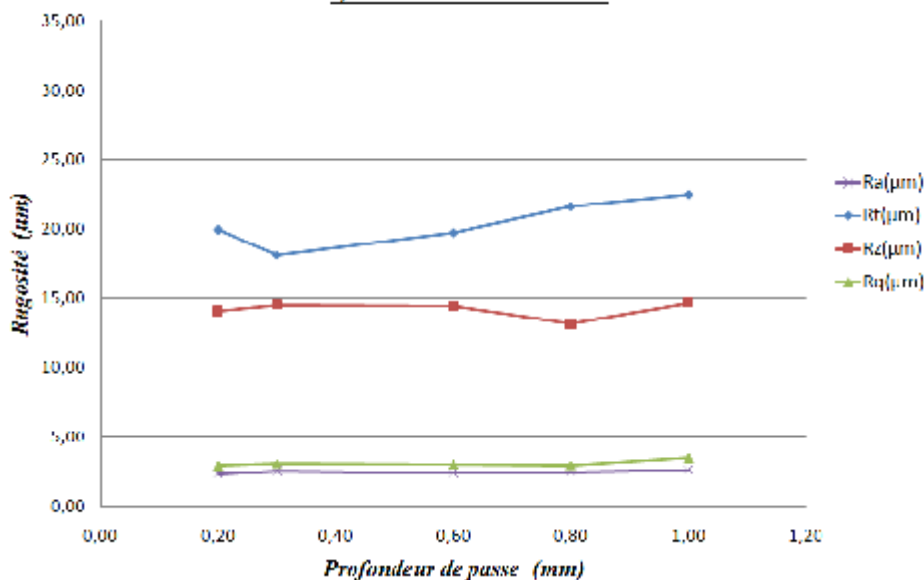
L'évolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe *figure III-15(a, b, c et d)*, montre que ce paramètre est moins important que l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce. Ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe. L'influence de l'augmentation de profondeur de passe sur la rugosité sont comme suit: l'augmentation de profondeur de (0,2 à 1 mm), conduit à une augmentation des critères de rugosité (Ra, Rt, Rz et Rq) successivement de (60,05; 45,07; 35,57; 47,48) % pour la plaquette SPUN à sec, (7,58; 10,51; 2,72; 12,78) % avec lubrification, par contre pour la plaquette SPMR l'augmentation de profondeur de (0,2 à 1 mm), conduit à une diminution des critères de rugosité (Ra, Rt, Rz et Rq) successivement de (8,45; 10,93; 6,22; 7,07) % lors l'usinage à sec et de (7,87; 12,14; 6,10; 7,01) % lors l'usinage lubrifié.

Nuance SPUN 120408

a) SANS LUBRIFICATION



b) AVEC LUBRIFICATION



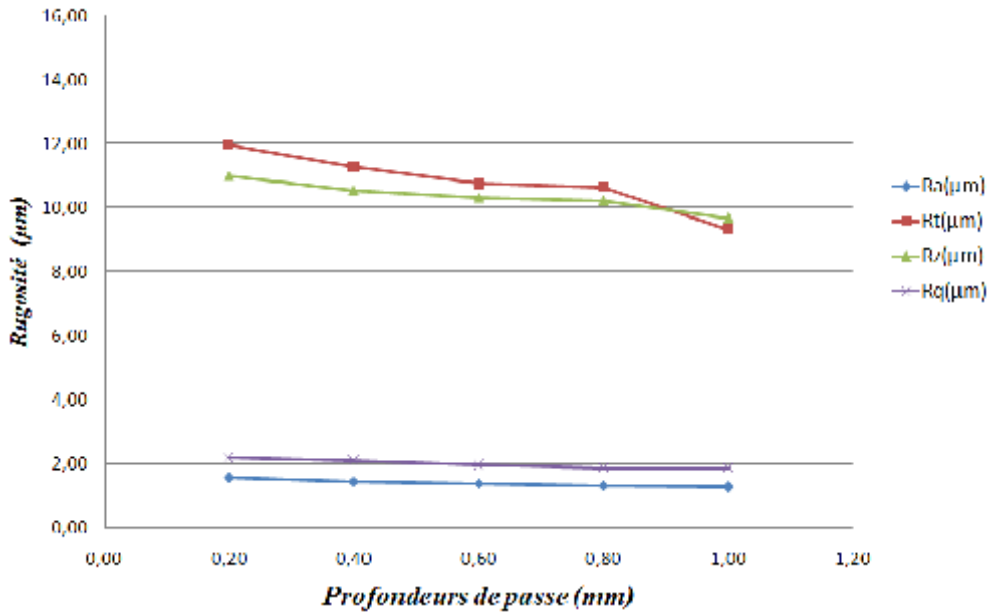
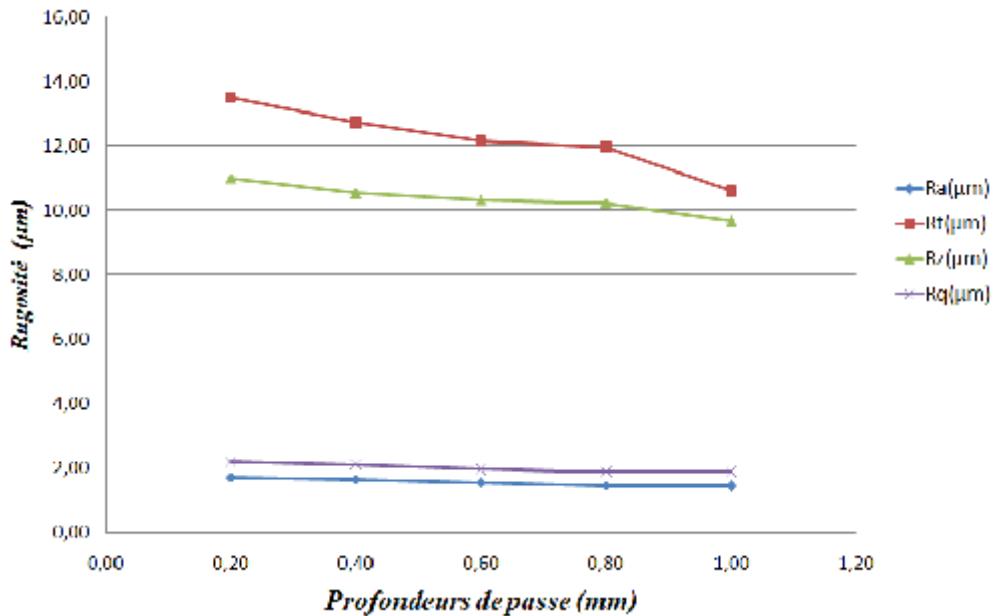
Nuance SPMR 120308c) SANS LUBRIFICATIONd) AVEC LUBRIFICATION

Figure III-15 Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=110\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$.

III- 6 Evolution de la rugosité en fonction du temps

La **figure III-16 (a, b, c et d)** montre l'évolution de la rugosité en fonction du temps de coupe.

L'analyse des résultats de l'usinage a sec avec la plaquette SPUN **figure III-16(a)**, montre que pour une plage de 2 à 10 minutes, les différents critères de rugosité augmente

de 3,88 à 5,38 μm pour Ra, de 23,17 à 27,63 μm pour Rt, de 17,96 à 24,82 μm pour Rz et de 4,17 à 6,24 pour Rq.

Pour l'usinage lubrifié avec la nuance SPUN *figure III-16 (b)*, on peut diviser l'allure de la courbe en deux parties principales, une légère augmentation de la rugosité pour un temps d'usinage inférieure à 8 minutes, au-delà de cette valeur la rugosité s'améliore brusquement jusque les valeurs (4,04; 14,98; 12,07; 3,03) μm enregistré pour le temps d'usinage égale 10 min.

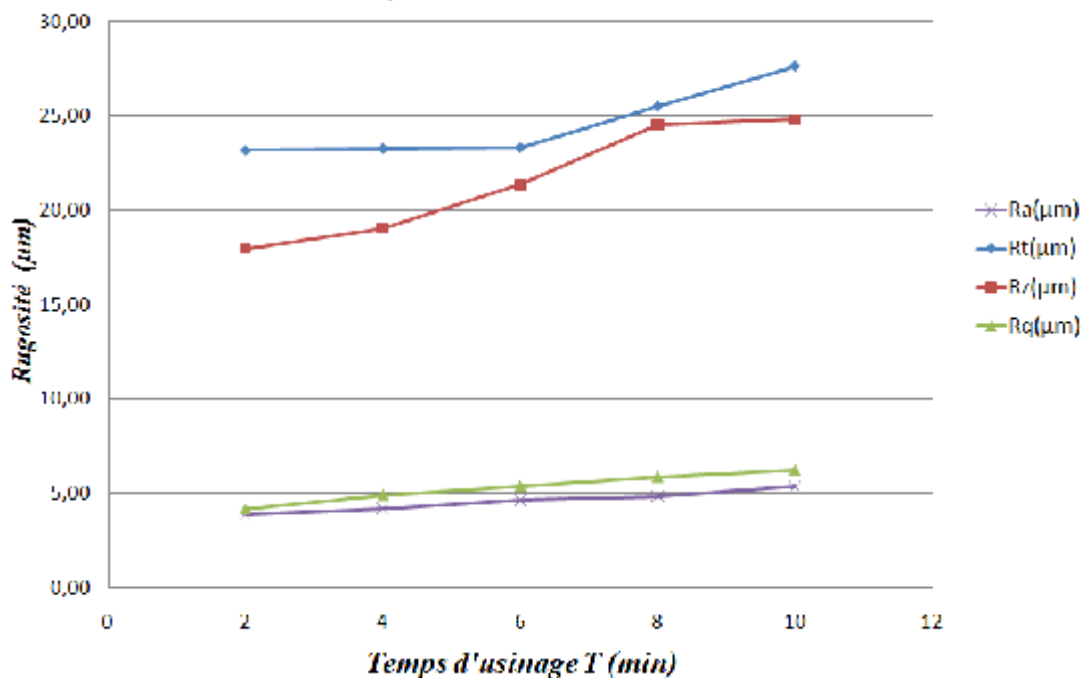
Pour l'usinage à sec avec la plaquette SPMR *figure III-16 (c)*, on a enregistré une augmentation de (1,13 à 2,03; 9,29 à 16,29; 9,28 à 16,36 et 1,87 à 2,99) μm pour (Ra; Rt; Rz et Rq) successivement.

Dans le cas de la nuance SPMR avec lubrification on remarque une légère augmentation des valeurs des rugosités avec l'augmentation du temps.

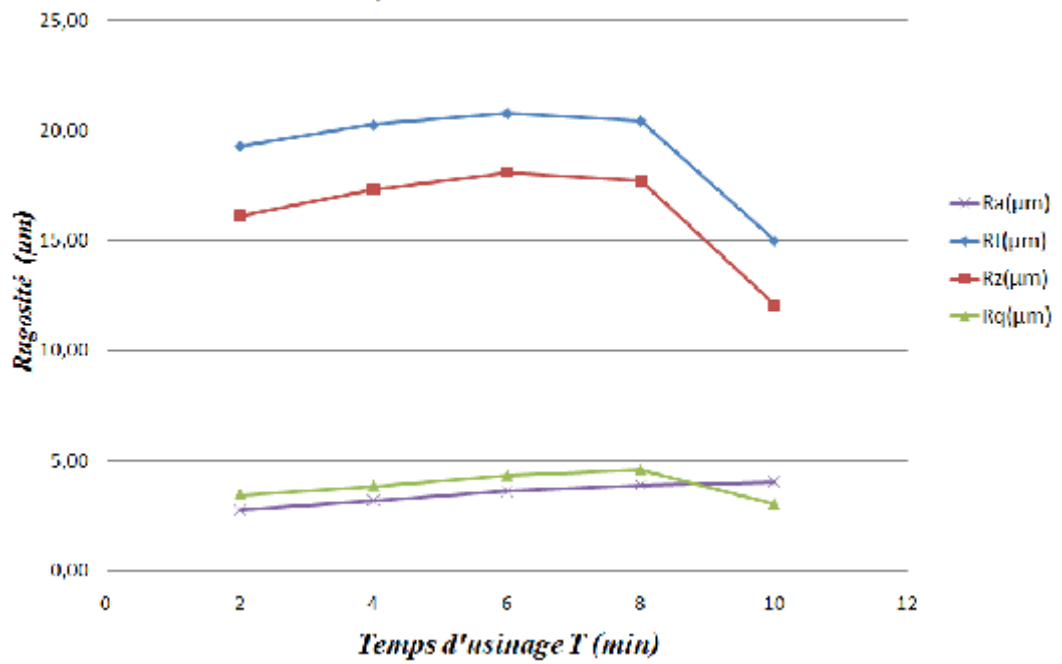
On a constaté que la valeur de la rugosité est très affectée par le temps d'usinage surtout dans le cas d'usinage à sec, la lubrification stabilise la valeur de la rugosité avec un faible taux de diminution.

Nuance SPUN 120408

a) SANS LUBRIFICATION

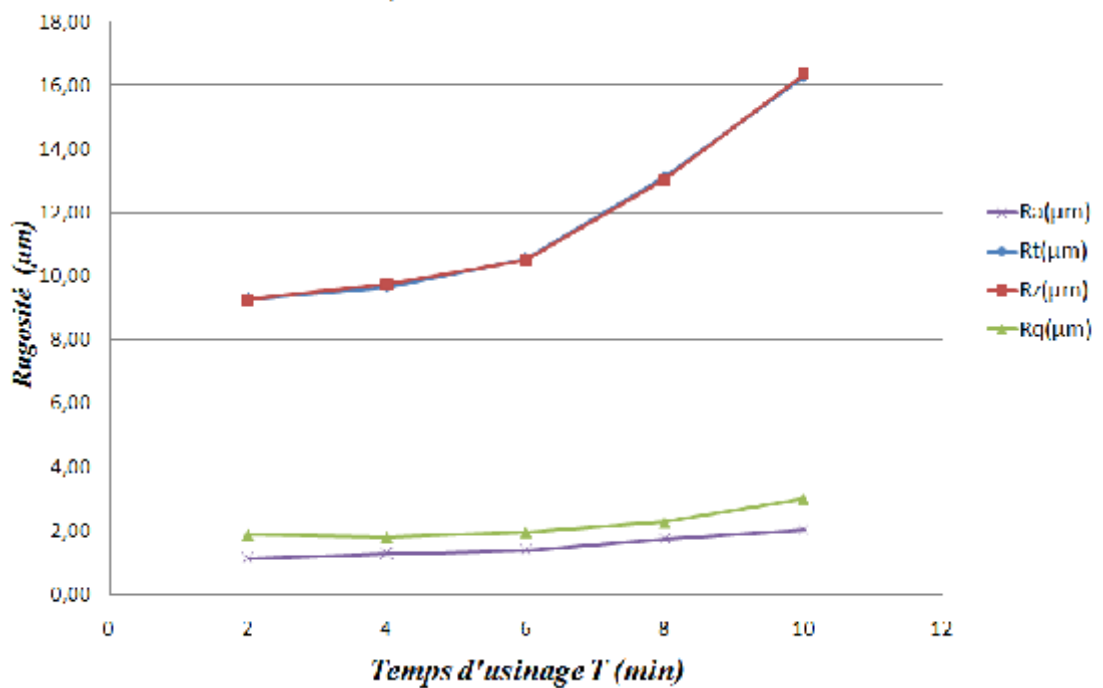


b) AVEC LUBRIFICATION



Nuance SPMR 120308

c) SANS LUBRIFICATION



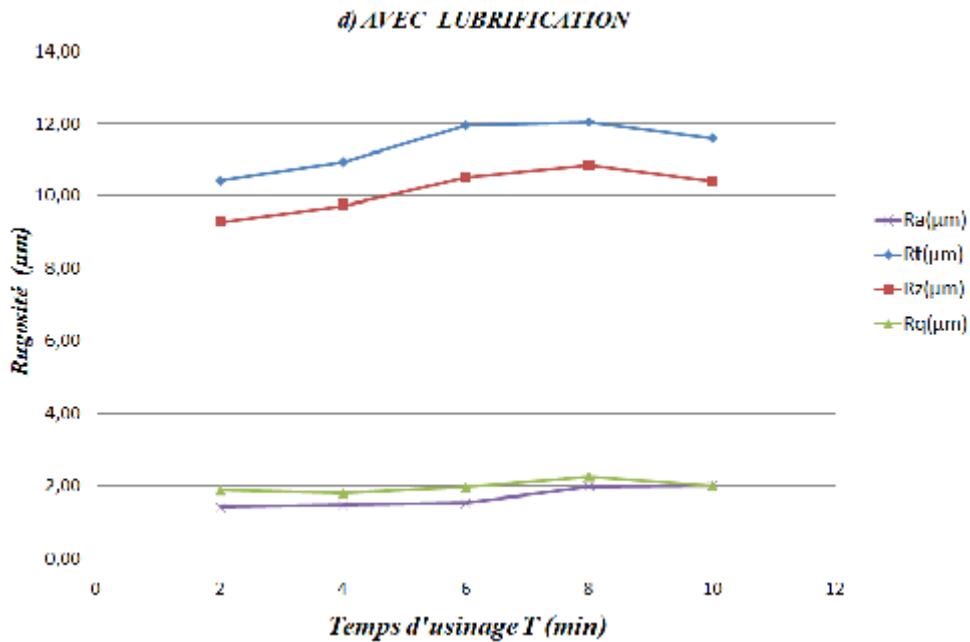


Figure III-16 l'évolution de la rugosité en fonction du temps de coupe pour $V_c=110\text{m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$ et $a_p=1\text{ mm}$.

III- 7 Morphologie du copeau

III-7.1 Introduction

Le respect des trois critères Coût, Qualité, et Délai impose l'utilisation de moyens de production plus performants et plus flexibles. La formation du copeau en usinage des polymères est un phénomène micro-géométrique influant sur plusieurs grandeurs macro-géométriques à surveiller sur une machine outil. Sa maîtrise contribue à:

1. fiabiliser le processus d'usinage.
2. garantir la qualité géométrique des surfaces usinées (état de surface et précision dimensionnelle).
3. assurer la productivité.
4. renforcer la sécurité des opérateurs et de la cellule d'usinage.

III-7.2 Impact des conditions de coupe sur la morphologie du copeau

La **figure IV-17** exposé les photos de morphologie du copeau obtenu lors l'usinage avec le polyamide PA6 pour deux vitesse de coupe (50 et 220)m/min, et pour des conditions de travail (à sec et lubrifié) avec la nuance de coupe SPMR.

La **figure IV-18** montre la morphologie du coupeau lors de l'usinage du polyamide PA6 avec deux nuances de coupe (avec et sans brise coupeau) et pour deux conditions de travail (à sec et lubrifié)

La **figure IV-19**, illustre quelques phénomènes observés lors du l'usinage du polyamide PA6.

Le premier phénomène concerne l'enroulement du coupeau sur la pièce, ce qui rend l'usinage très difficile et dégrade l'état de surface.

Le deuxième phénomène observé est la morphologie du coupeau à température de coupe élevée.

On remarque que le coupeau modifie sa forme catégoriquement (cordon) et cela a un effet sur la qualité de surface et le processus de coupe.

L'analyse des résultats montre aussi que la présence de la lubrification est importante car elle permet la diminution de la température du coupeau et par conséquent elle influe sur sa forme.

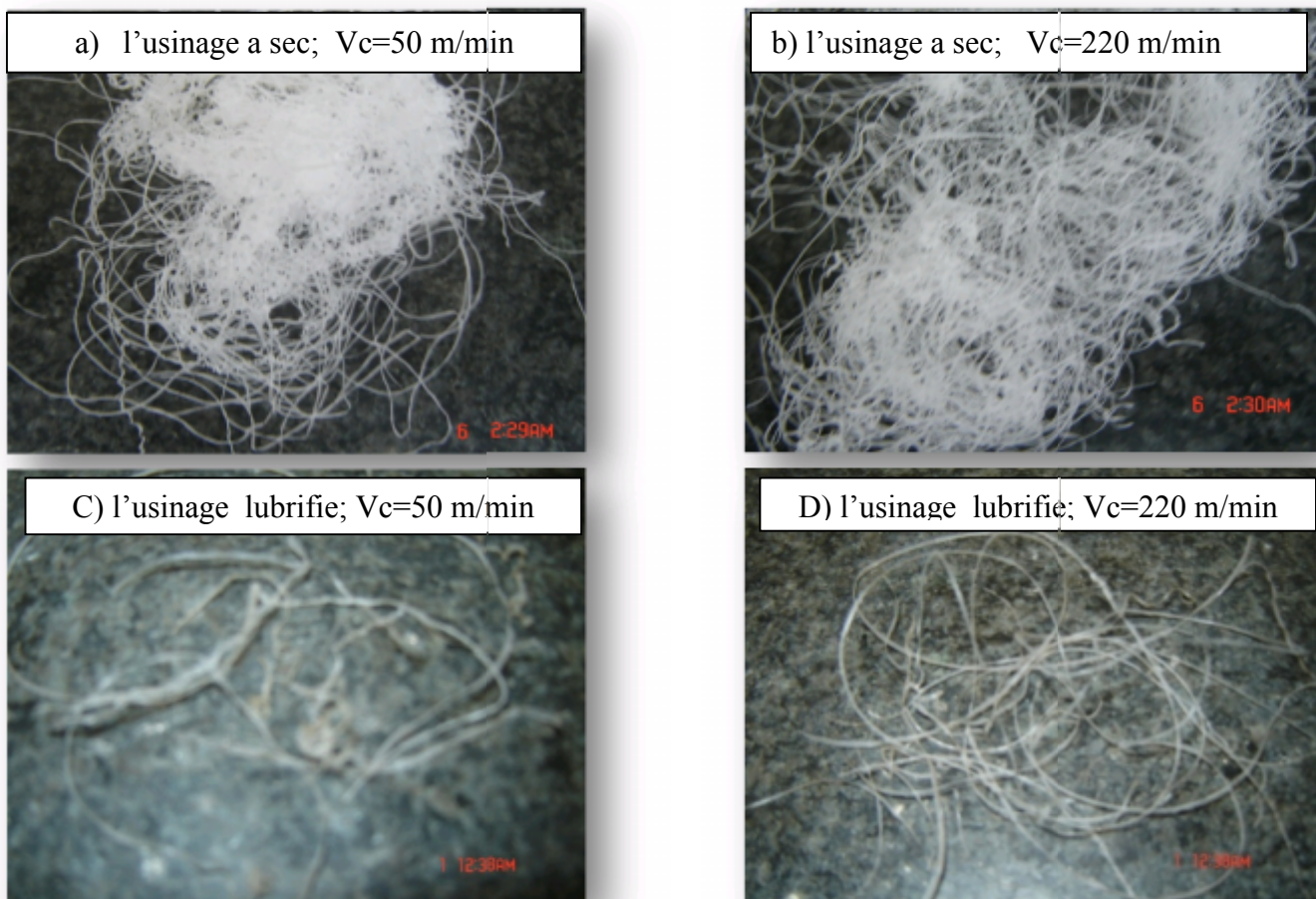


Figure III-17 Evolution de la vitesse sur la formation de coupeau,
(Nuance SPMR120408, $f=0,08$ mm/tr et $A_p=0,2$ mm).

III- 7.3 l'effet de la présence de brise coupeau sur la formation de coupeau

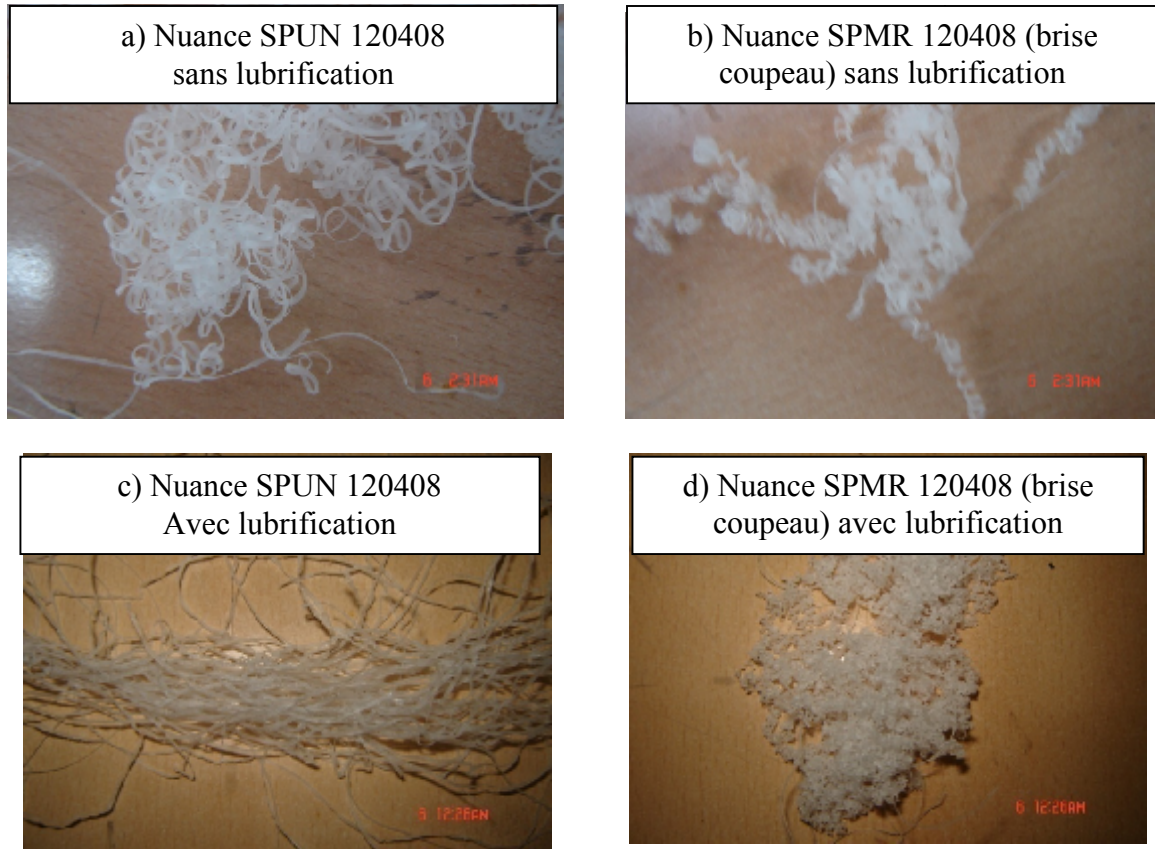


Figure III-18 l'effet de la brise coupeau sur la formation de coupeau

$V_c=110$ m/min; $f=0,08$ $A_p=0,5$ mm.

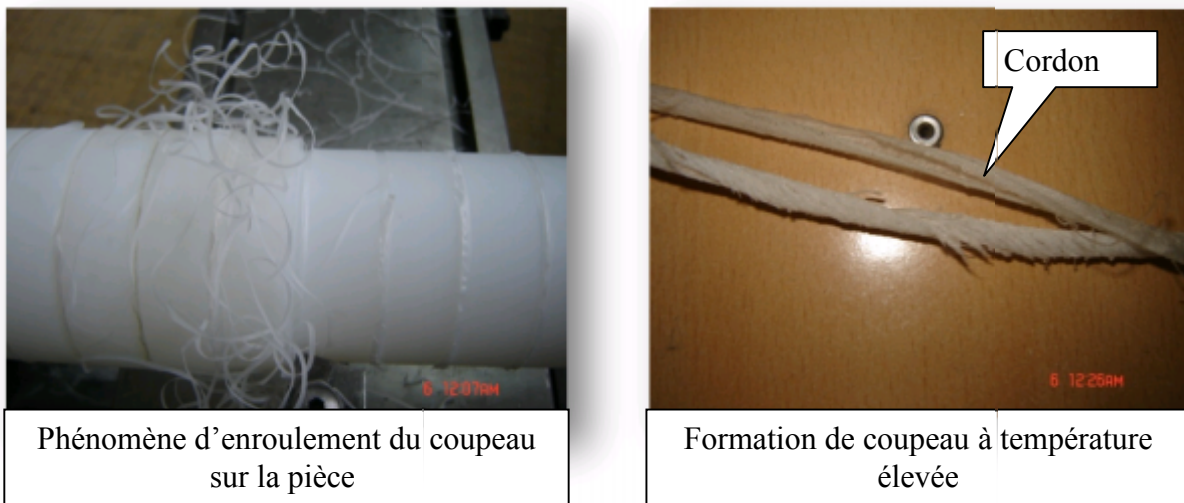


Figure III-19 Phénomènes rencontrés lors de l'usinage de polyamide PA6.

III-8 Conclusion

En se basant sur les résultats obtenus dans ce chapitre nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- L'analyse des courbes de l'évolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe montre que les valeurs des efforts obtenues par les deux régimes sont presque du même ordre et la différence qui existe est due à présence de la lubrification et au brise-copeau.
- Les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe montrent que la nuance SPMR donne un bon état de surface dans les deux cas d'usinage avec ou sans lubrification. Pour la nuance SPUN la lubrification influe positivement sur la conductivité thermique du polyamide par l'absorption de la chaleur accumulée à l'interface outil-pièce-coupeau.
- Les pièces en polyamide doivent être stockées dans un endroit sec. l'absorption d'eau élevée de ce dernier change ces caractéristiques mécaniques et métallurgiques.
- Les conditions de coupe (V_c , f , a_p) et les conditions de travail (a sec et lubrifié) influe sur la morphologie du copeau obtenu.

Chapitre IV
Modélisation de la rugosité
et des efforts de coupe

IV-1 Introduction

Dans l'industrie moderne, le produit fini impose plusieurs critères résumés dans le terme (intégrité des surfaces) et d'autres critères concernent l'outil de coupe utilisé, représentés par la productivité maximale, l'usure minimale et les efforts de coupe faibles. Ce chapitre est consacré à présenter les résultats de la détermination des modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (V_c , f , ap et l' arrosage) et les paramètres technologiques étudiés (effort de coupe, rugosité de surface). Ils permettent aussi d'optimiser le processus de coupe. Pour faire une analyse de la variance (ANOVA) et pour déduire les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (RMS), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «**MINITAB16**». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés.

Ce chapitre est divisé en deux parties:

La première partie est consacrée à la modélisation des différents phénomènes étudiés lors de l'usinage à sec du polyamide PA6 par un outil de nuance SPMR120308 pour un plan de 27 essais de Taguchi.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation des différents phénomènes étudiés lors de l'usinage lubrifié du polyamide PA6 par un outil de nuance SPMR120308 pour un plan de 27 essais de Taguchi.

IV-2 Modélisation des efforts de coupe et de la rugosité lors l'usinage à sec

Le *tableau IV-1* présente les résultats expérimentaux correspondants aux efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) et la rugosité de surface (R_a et R_t). Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan $N = 3^3$), lors de tournage de polyamide PA6 par un outil de nuance SPMR120308. L'analyse des résultats de ce tableau montre que les valeurs minimales correspondent aux efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) ont été trouvées suivant les conditions des essais N°19, N°10 et N°1 respectivement de (150 m/min; 0,08 mm/tr et 1

mm), (100 m/min; 0,08 mm/tr et 1 mm) et (50 m/min; 0,08 mm/tr et 1 mm). Les valeurs minimales de la rugosité de surface (R_a , R_t) sont observées lors de l'essai N°27 (150 m/min; 0,16 mm/tr et 2 mm). Les valeurs maximales des efforts (F_x , F_y et F_z) ont été observées à l'essai N° 9 c.-à-d. (50 m/min; 0,16 mm/tr et 2 mm). Les maximums de valeur pour la rugosité de surface (R_a et R_t) ont été observées a l'essai N°16 c.-à-d. (100 m/min; 0,16 mm/tr et 1mm).

| N° | Vc(m/mn) | f(mm/tr) | Ap(mm) | Fx(N) | Fy(N) | Fz(N) | Ra(μ m) | Rt(μ m) |
|----|----------|----------|--------|-------|-------|-------|--------------|--------------|
| 1 | 50 | 0,08 | 1 | 3,94 | 5,18 | 5,31 | 1,27 | 11,52 |
| 2 | 50 | 0,08 | 1,5 | 4,96 | 7,72 | 14,64 | 1,74 | 12,99 |
| 3 | 50 | 0,08 | 2 | 11,18 | 11,58 | 24,1 | 1,92 | 13,77 |
| 4 | 50 | 0,12 | 1 | 5,37 | 6,76 | 13,99 | 1,68 | 10,44 |
| 5 | 50 | 0,12 | 1,5 | 5,65 | 8,61 | 14,54 | 2,2 | 12,66 |
| 6 | 50 | 0,12 | 2 | 11,58 | 11,58 | 25,33 | 2,21 | 12,46 |
| 7 | 50 | 0,16 | 1 | 9,3 | 10,44 | 13,61 | 2,23 | 14,66 |
| 8 | 50 | 0,16 | 1,5 | 11,04 | 12,27 | 34,87 | 2,01 | 14,21 |
| 9 | 50 | 0,16 | 2 | 15,6 | 14,17 | 45,78 | 1,6 | 10,64 |
| 10 | 100 | 0,08 | 1 | 3,46 | 5 | 10,9 | 1,7 | 12,78 |
| 11 | 100 | 0,08 | 1,5 | 6,93 | 6,33 | 16,53 | 1,54 | 11,47 |
| 12 | 100 | 0,08 | 2 | 8,9 | 6,96 | 17,88 | 1,3 | 10,62 |
| 13 | 100 | 0,12 | 1 | 4,62 | 5,08 | 12,62 | 2,89 | 23,64 |
| 14 | 100 | 0,12 | 1,5 | 8,73 | 10,9 | 26,19 | 1,56 | 11,3 |
| 15 | 100 | 0,12 | 2 | 10,9 | 8,89 | 31,99 | 1,45 | 11,22 |
| 16 | 100 | 0,16 | 1 | 6,97 | 9,07 | 14,32 | 3,43 | 51,31 |
| 17 | 100 | 0,16 | 1,5 | 10,38 | 11,41 | 20,9 | 2,03 | 15,83 |
| 18 | 100 | 0,16 | 2 | 11,75 | 12,66 | 35,05 | 1,57 | 10,74 |
| 19 | 150 | 0,08 | 1 | 3,26 | 5,27 | 9,07 | 1,45 | 10,72 |
| 20 | 150 | 0,08 | 1,5 | 5,87 | 8,82 | 16,37 | 1,2 | 9,32 |
| 21 | 150 | 0,08 | 2 | 7,67 | 8,59 | 24,78 | 1,11 | 9,27 |
| 22 | 150 | 0,12 | 1 | 3,74 | 6,17 | 17,76 | 1,49 | 13,32 |
| 23 | 150 | 0,12 | 1,5 | 6,81 | 8,04 | 23,84 | 1,31 | 9,88 |
| 24 | 150 | 0,12 | 2 | 11,04 | 8,7 | 27,62 | 1,12 | 9,69 |
| 25 | 150 | 0,16 | 1 | 4,13 | 7,55 | 20,86 | 1,48 | 11,73 |
| 26 | 150 | 0,16 | 1,5 | 11,74 | 10,06 | 27,81 | 1,37 | 11 |
| 27 | 150 | 0,16 | 2 | 13,33 | 11,62 | 28,76 | 1,2 | 8,68 |

Tableau IV-1 Résultats de la rugosité et des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe lors de l'usinage sans lubrification.

IV-2.1 Analyse des efforts de coupe

IV-2.1.1 Modélisation de l'effort axial F_x

Les résultats présentés dans le *tableau IV-2 (ANOVA)* sont analysés par le logiciel *MINITAB V.16*. En appliquant l'analyse de la variance, nous considérons un intervalle de confiance de 95% ($\alpha=0,05$), on constate que tous les paramètres avec les interactions entre eux ont un impact significatif sur l'effort axial, sauf les termes $V_c \times f$ & $f \times A_p$, puisque leur valeurs de la probabilité P sont supérieures à 0,05. On a remarqué que la profondeur de passe est le facteur le plus influant car sa contribution est de 59,26%, suivie par la vitesse d'avance avec une contribution de 27,38 %

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|---------------------------|----|---------|--------|-------|--------------|------------------|
| V_c (m/mn) | 2 | 6,775 | 3,387 | 3,42 | 0,084 | 2,21 |
| f (mm/tr) | 2 | 83,908 | 41,954 | 42,37 | <0,001 | 27,38 |
| A_p (mm) | 2 | 181,632 | 90,816 | 91,72 | <0,001 | 59,26 |
| V_c (m/mn)* f (mm/tr) | 4 | 6,628 | 1,657 | 1,67 | 0,248 | 2,16 |
| V_c (m/mn)* A_p (mm) | 4 | 15,46 | 3,865 | 3,9 | 0,048 | 5,04 |
| f (mm/tr)* A_p (mm) | 4 | 4,173 | 1,043 | 1,05 | 0,438 | 1,36 |
| Erreur | 8 | 7,921 | 0,99 | | | 2,58 |
| Total | 26 | 306,498 | | | | 100,00 |

Tableau IV-2 Résultats de l'analyse de la variance pour F_x .

A/ Analyse de régression

1/ Modèle généralisé

L'analyse de régression de F_x en fonction de V_c , f et a_p donne l'équation du modèle complet (IV-1) avec un coefficient de corrélation ($R^2=88,34\%$).

$$\begin{aligned}
 F_x(N) = & -5,29806 - 0,000755556 V_c(\text{m/mn}) + 47,3542 f(\text{mm/tr}) \\
 & + 4,36944 A_p(\text{mm}) - 0,144167 V_c(\text{m/mn}) * f(\text{mm/tr}) \\
 & + 0,00386667 V_c(\text{m/mn}) * A_p(\text{mm}) + 13,2917 f(\text{mm/tr}) * A_p(\text{mm}) \quad (\text{IV-1})
 \end{aligned}$$

2/ Modèle réduit

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, le modèle réduit de l'effort axial F_x en fonction de V_c , f et a_p donne l'équation (IV-2), avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 87,73 \%$).

$$F_x(N) = -5,96056 - 0,0180556 V_c(m/mn) + 52,875 f(mm/tr) + 5,96444 A_p(mm) + 0,00386667 V_c(m/mn)*A_p(mm) \quad (IV-2)$$

B/ Graphique des effets principaux pour F_x

La *figure IV-1* illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort axial. On remarque que l'augmentation de la vitesse de coupe minimise F_x . L'effort axial s'élève légèrement avec l'augmentation de l'avance. L'effet de profondeur de passe est plus prépondérant car sa pente est plus grande.

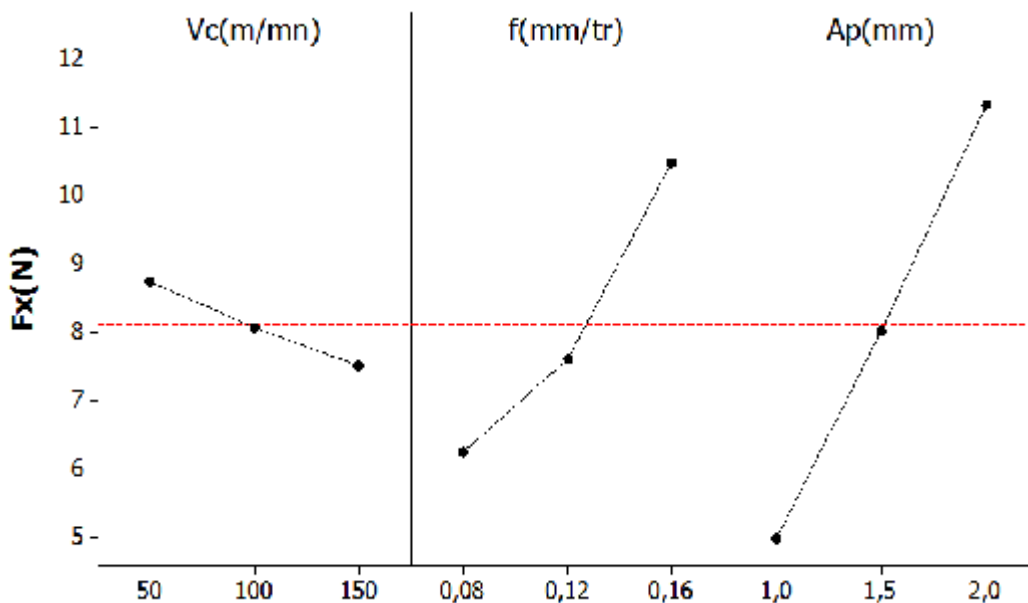


Figure IV-1 Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur F_x .

C/ Diagramme des interactions pour F_x

La *figure IV-2* montre le diagramme d'interaction pour la composante F_x en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et la profondeur de passe.

L'analyse des résultats montre une interaction entre la vitesse de coupe et l'avance et aussi une interaction entre la vitesse de coupe et la profondeur de passe.

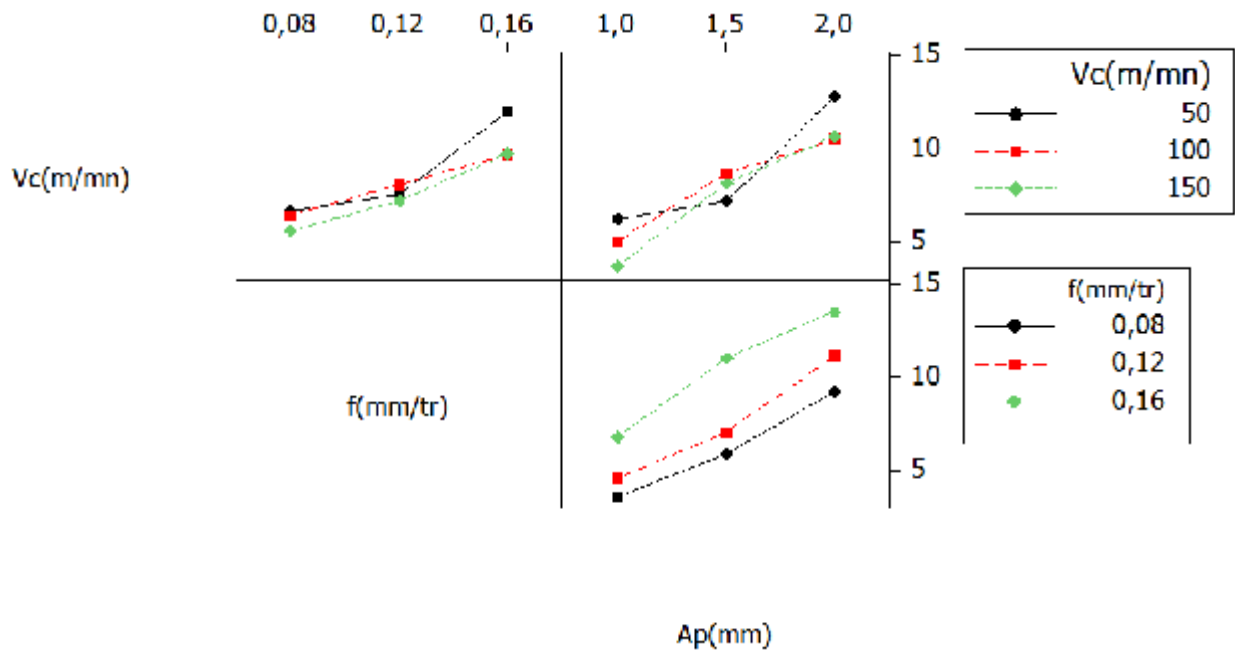


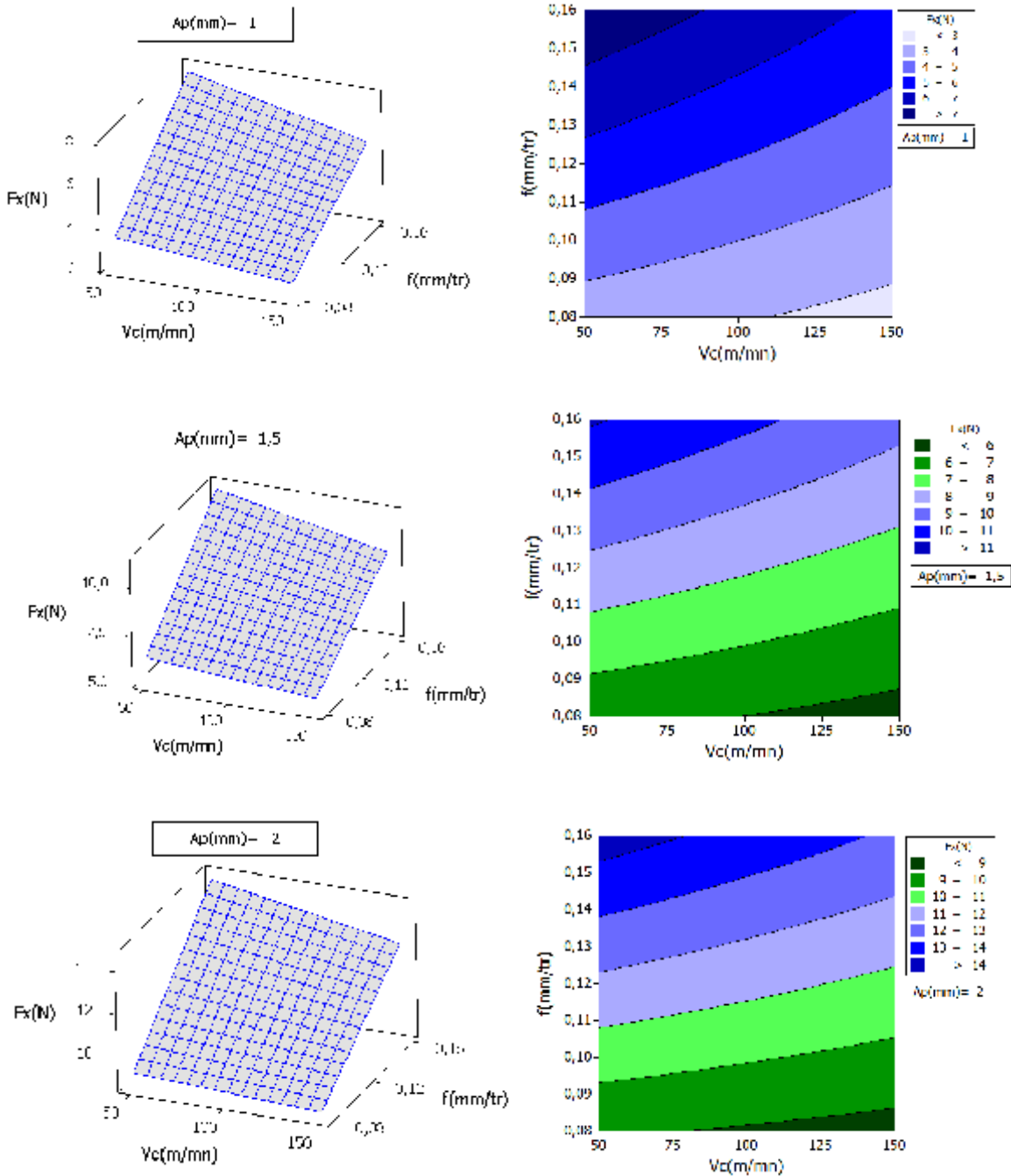
Figure IV-2 Diagramme d'interaction pour F_x .

D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour F_x

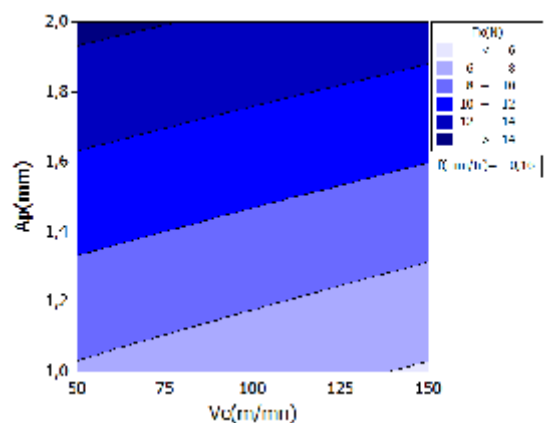
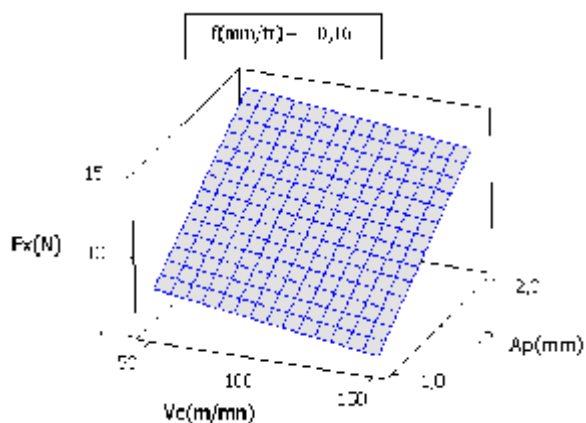
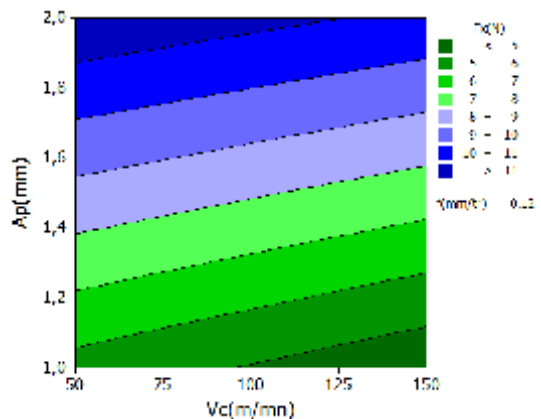
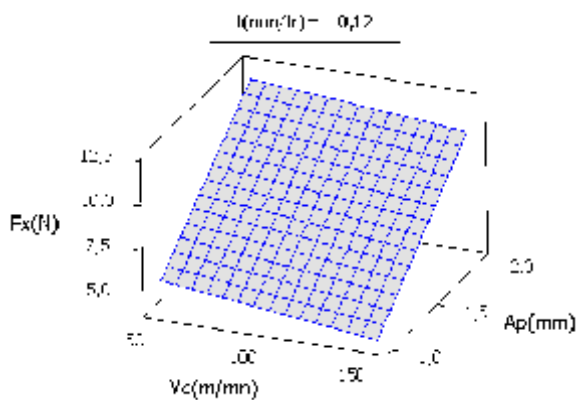
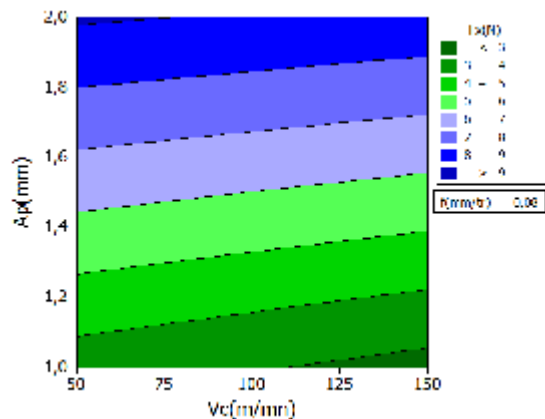
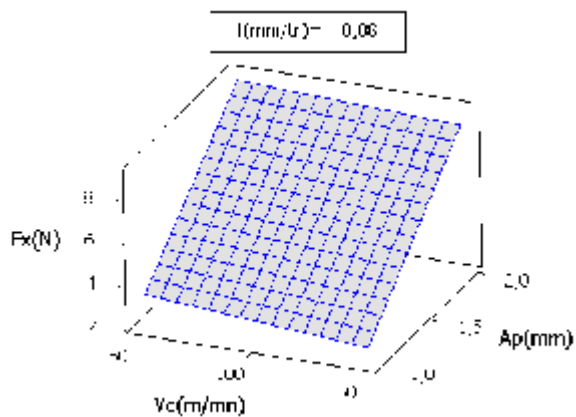
La surface de réponse de la composante de l'effort de coupe F_x en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la *figure IV-3*. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur l'effort F_x .

La présentation en 3D (*figure IV-3*) montre que la pente de la profondeur de passe est supérieure par rapport aux autres facteurs, ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort axial, suivi par l'avance et en dernier lieu par la vitesse de coupe qui a un effet contraire par rapport aux autres facteurs.

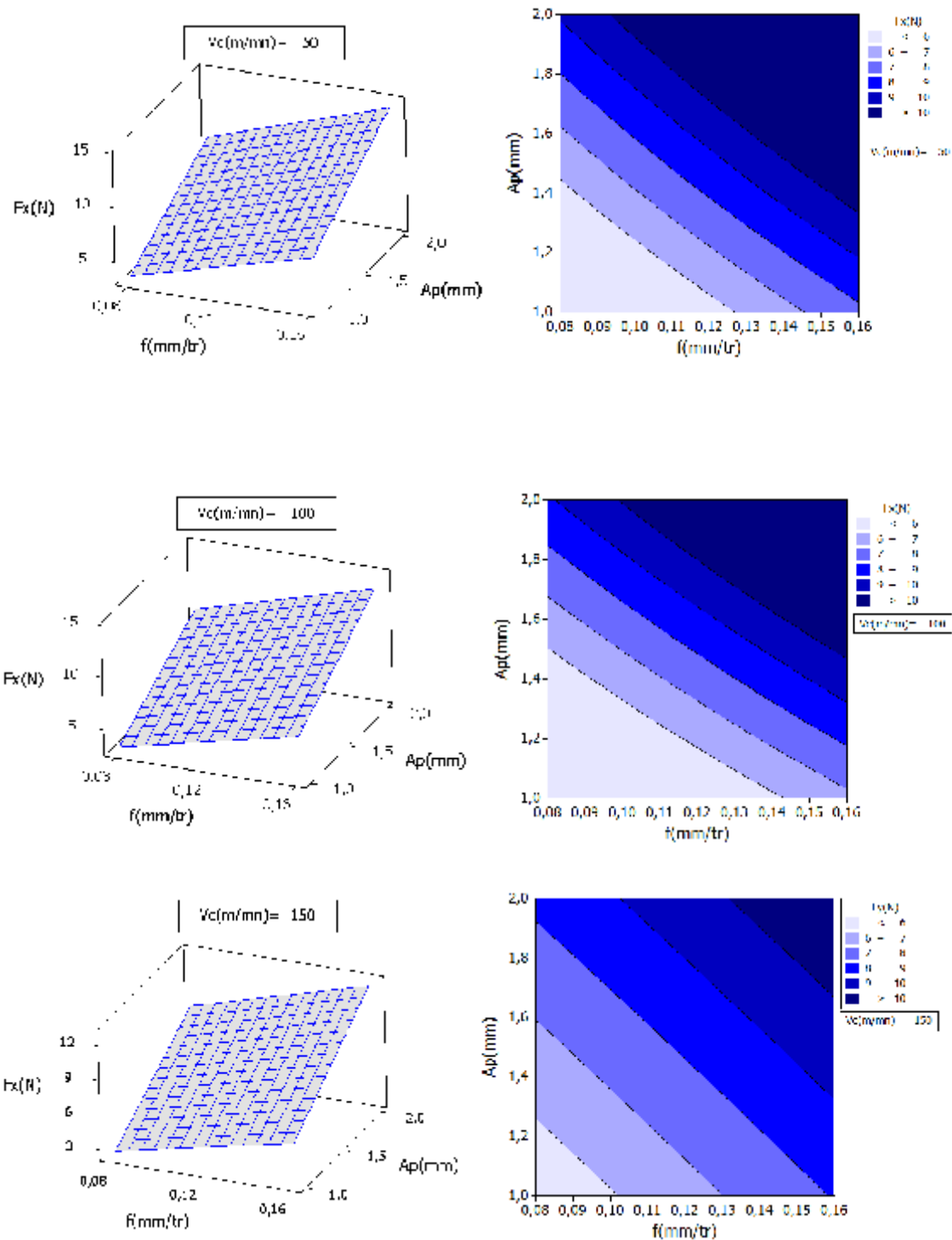
Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (F_x), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



a) F_x en fonction de (V_c, f) pour $A_p(mm) = 1; 1,5; 2$.



b) F_x en fonction de (V_c, a_p) pour $f(mm/tr) = 0,08; 0,12; 0,16$.



c) F_x en fonction de (f, a_p) pour $V_c(m/min) = 50; 100; 150$.

Figure IV-3 La surface de réponse de l'effort (F_x) en fonction de V_c, f, a_p et les graphes de contour.

IV-2.1.2 Modélisation de l'effort radial F_y

Le *tableau IV-3* présente l'analyse de la variance pour la composante F_y . On remarque que seuls les termes principaux ont un impact significatif. Par contre les différentes interactions n'ont pas un effet significatif sur l'effort radial, puisque la valeur de la probabilité P est supérieure à 0,05. La profondeur de passe est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 39,58%. Ainsi que l'avance a une influence importante et elle présente un pourcentage de contribution de 39,30%.

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|-------------------|----|---------|--------|-------|--------------|------------------|
| Vc(m/mn) | 2 | 12,163 | 6,082 | 5,65 | 0,03 | 7,05 |
| f(mm/tr) | 2 | 67,77 | 33,885 | 31,47 | <0,001 | 39,30 |
| Ap(mm) | 2 | 68,248 | 34,124 | 31,69 | <0,001 | 39,58 |
| Vc(m/mn)*f(mm/tr) | 4 | 7,072 | 1,768 | 1,64 | 0,255 | 4,10 |
| Vc(m/mn)*Ap(mm) | 4 | 7,457 | 1,864 | 1,73 | 0,236 | 4,32 |
| f(mm/tr)*Ap(mm) | 4 | 1,124 | 0,281 | 0,26 | 0,895 | 0,65 |
| Erreur | 8 | 8,615 | 1,077 | | | 5,00 |
| Total | 26 | 172,449 | | | | 100,00 |

Tableau IV-3 Résultats de l'analyse de variance pour F_y .

A/ Analyse de régression

1/ Modèle généralisé

L'analyse de régression de F_y en fonction de V_c , f et ap donne l'équation du modèle complet (IV-3) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 83,29\%$).

$$\begin{aligned}
 F_y(N) = & -6,62917 + 0,0394111 V_c(m/mn) + 73,1319 f(mm/tr) \\
 & + 5,625 Ap(mm) - 0,24375 V_c(m/mn)*f(mm/tr) \\
 & - 0,0167667 V_c(m/mn)*Ap(mm) - 1,20833 f(mm/tr)*Ap(mm) \quad (IV-3)
 \end{aligned}$$

2/ Modèle réduit

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, le modèle réduit de l'effort radial F_y donne l'équation (IV-4), avec un coefficient de corrélation ($R^2=80,41\%$).

$$F_y(N) = -0,971667 - 0,0149889 V_c(m/mn) + 46,9444 f(mm/tr) + 3,80333 A_p(mm) \quad (IV-4)$$

B/ Graphique des effets principaux pour F_y

Le diagramme des effets moyens présentés à la *figure IV-4*, montre que l'effort radial est inversement proportionnel avec la vitesse de coupe car la pente de vitesse est négative. L'effort F_y est plus affecté par l'augmentation de la profondeur de passe, et celui de l'avance.

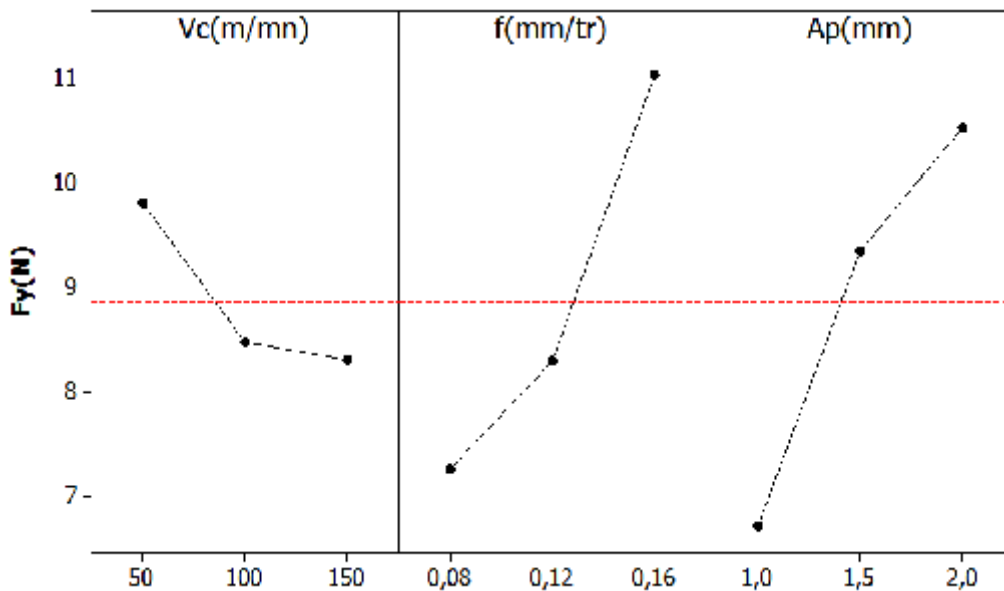


Figure IV-4 Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur F_y .

C/ Diagramme des interactions pour F_y

La *figure IV-5* montre le diagramme d'interaction pour F_y en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

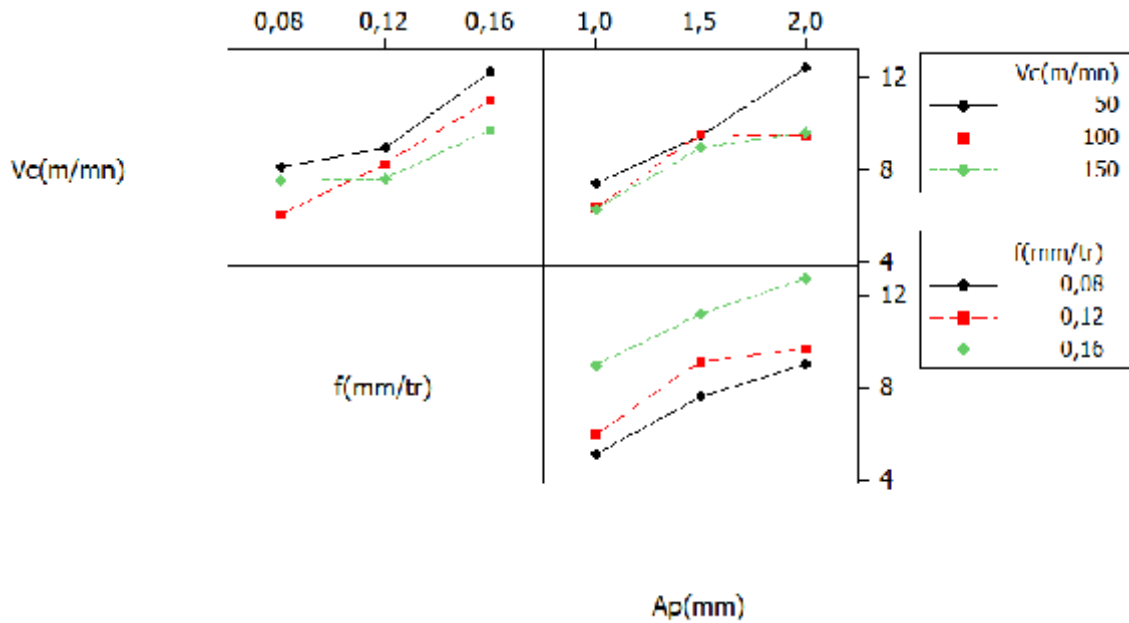


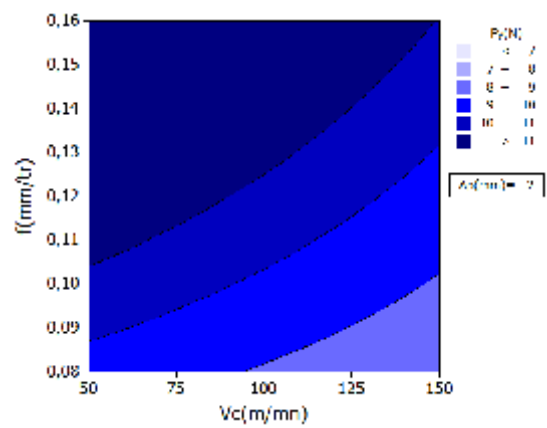
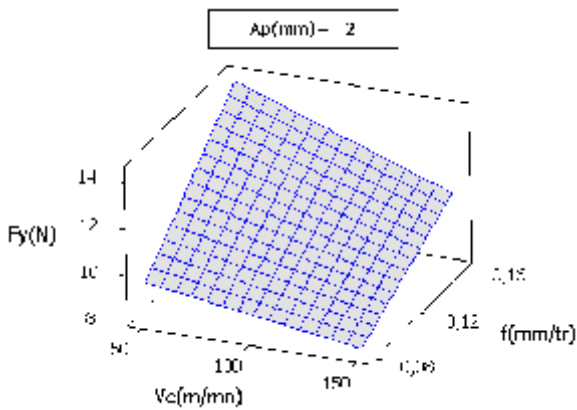
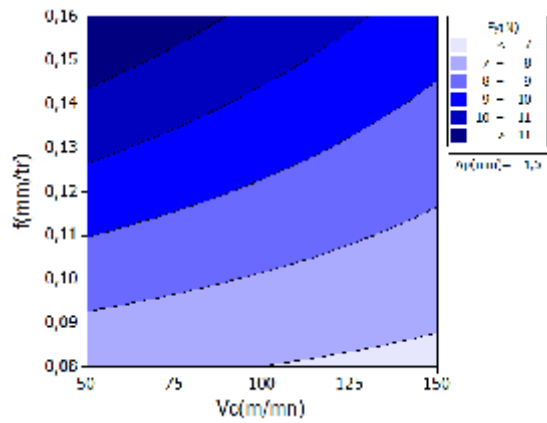
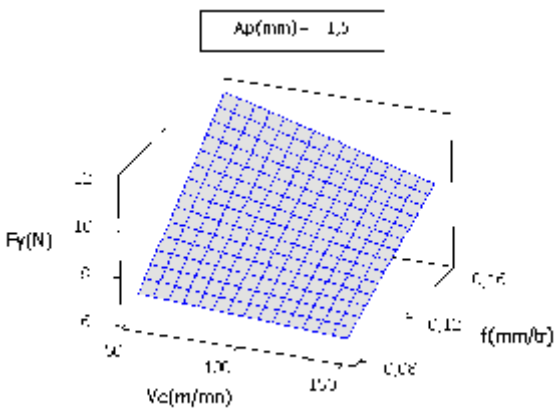
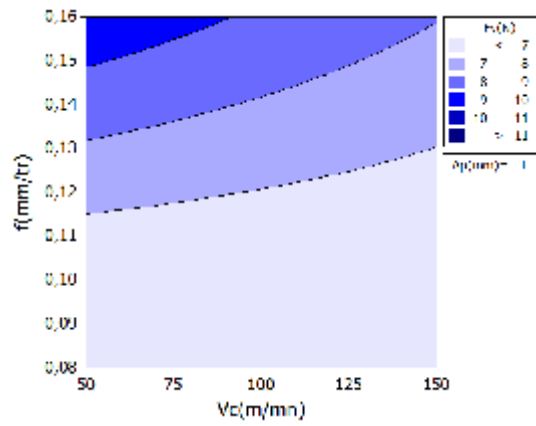
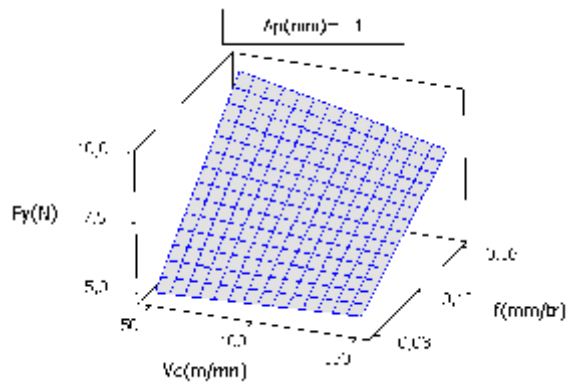
Figure IV-5 Diagramme d'interaction pour F_y .

La **figure IV-5** présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $V_c \cdot a_p$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 4,32% suivant le **tableau IV-3**.

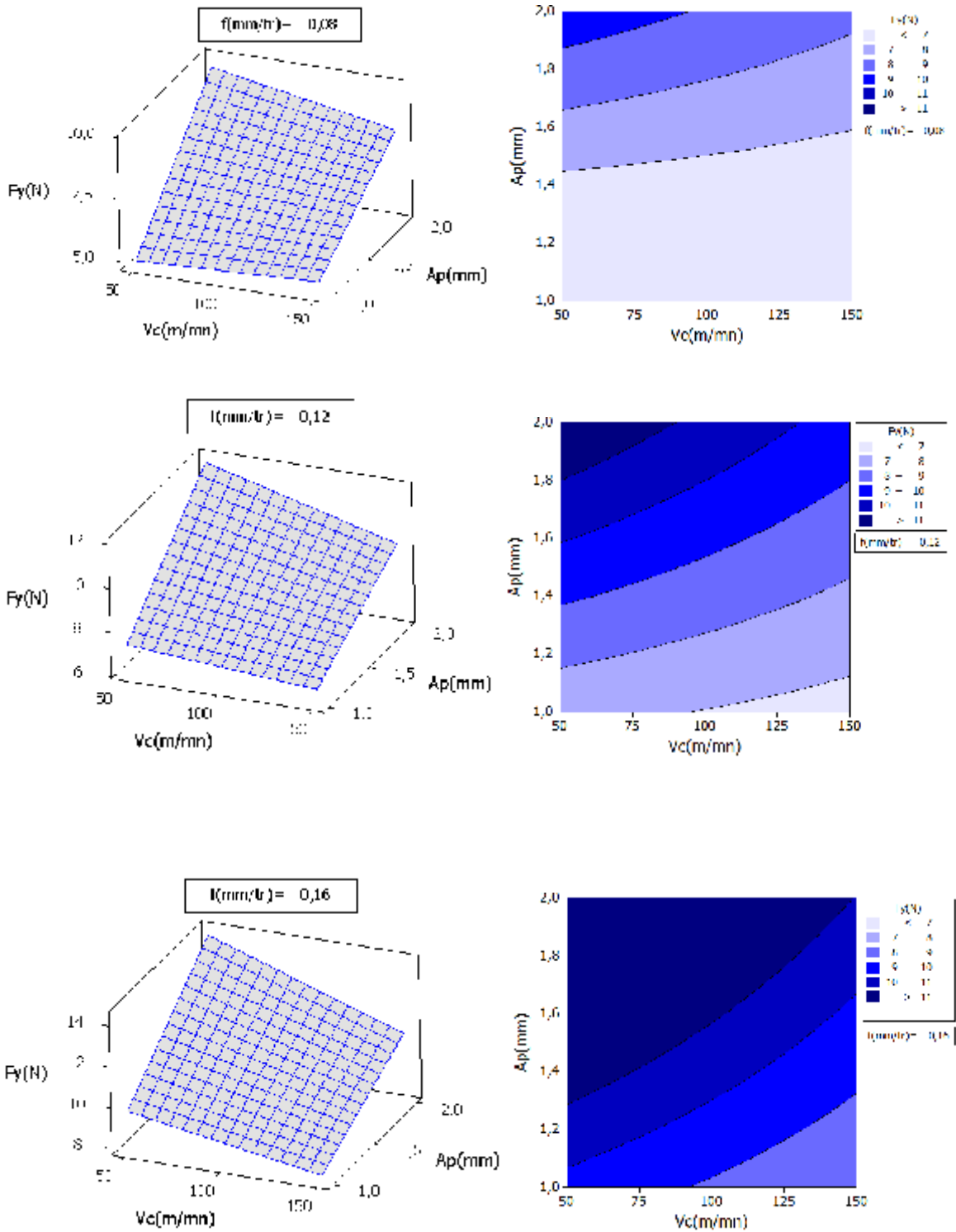
D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour F_y

La surface de réponse présentée sur la **figure IV-6**, montre que l'effort F_y est plus affecté par l'augmentation de la profondeur de passe et la vitesse d'avance.

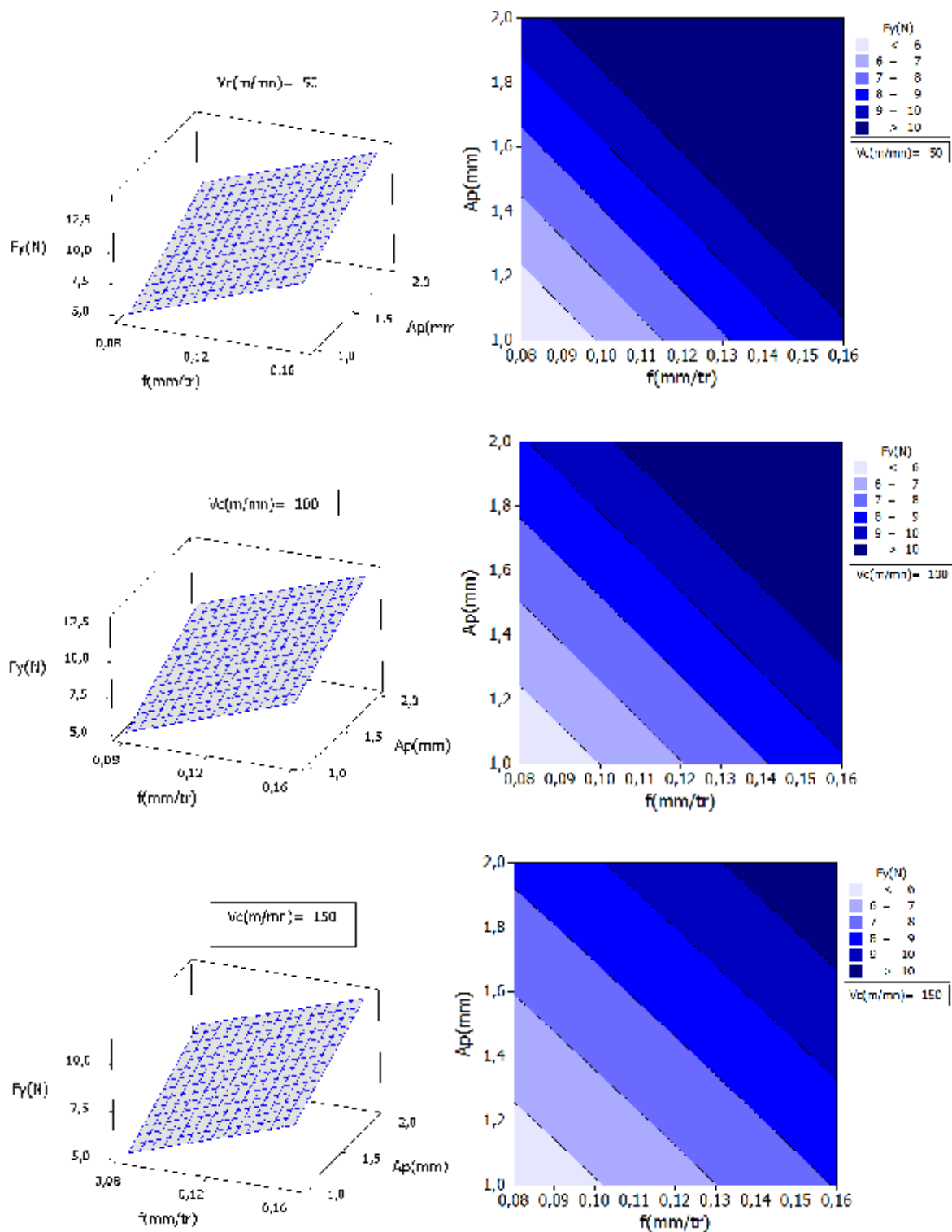
La **figure IV-6** montre aussi le domaine d'influence de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur l'effort de coupe F_y . On remarque sur cette figure que la zone bleue foncée indique les valeurs les plus fortes de l'effort radial F_y . Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (F_y), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



a) F_y en fonction de (V_c, f) pour $A_p(mm) = 1; 1,5; 2$.



b) F_y en fonction de (V_c, a_p) pour $f(\text{mm/tr}) = 0,08; 0,12; 0,16$.



c) F_y en fonction de (f, a_p) pour $V_c(m/min) = 50; 100; 150$.

Figure IV-6 La surface de réponse de l'effort (F_y) en fonction de V_c, f, a_p et les graphes de contour.

IV-2.1.3 Modélisation de l'effort tangentiel Fz

Les résultats obtenus au **tableau IV-4**, montre l'analyse ANOVA de l'effort Fz, L'analyse montre que la vitesse a une influence négligeable puisque le pourcentage de contribution de Vc est de 0,28 %. La profondeur de passe est le paramètre le plus prépondérant (Cont = 51,57%) suivie par l'avance (Cont = 26,47%).

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|-------------------|----|---------|--------|-------|--------------|------------------|
| Vc(m/mn) | 2 | 6,14 | 3,07 | 0,12 | 0,886 | 0,28 |
| f(mm/tr) | 2 | 583,03 | 291,52 | 11,63 | 0,004 | 26,47 |
| Ap(mm) | 2 | 1136,19 | 568,09 | 22,65 | 0,001 | 51,57 |
| Vc(m/mn)*f(mm/tr) | 4 | 160,44 | 40,11 | 1,6 | 0,265 | 7,28 |
| Vc(m/mn)*Ap(mm) | 4 | 70,81 | 17,7 | 0,71 | 0,61 | 3,21 |
| f(mm/tr)*Ap(mm) | 4 | 45,8 | 11,45 | 0,46 | 0,766 | 2,08 |
| Erreur | 8 | 200,61 | 25,08 | | | 9,11 |
| Total | 26 | 2203,02 | | | | 100,00 |

Tableau IV-4 Résultats de l'analyse de variance pour Fz.

A/ Analyse de régression

1/ Modèle généralisé

L'analyse de régression de Fz en fonction de Vc, f et ap donne l'équation du modèle complet (IV-5) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 84,51\%$).

$$\begin{aligned}
 Fz(N) = & -31,507 + 0,264372 Vc(m/mn) + 117,278 f(mm/tr) \\
 & + 15,8222 Ap(mm) - 0,958333 Vc(m/mn)*f(mm/tr) \\
 & - 0,0961 Vc(m/mn)*Ap(mm) + 80,5 f(mm/tr)*Ap(mm)
 \end{aligned}
 \tag{IV-5}$$

2/ Modèle réduit

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, le modèle réduit de l'effort tangentiel Fz, donne l'équation (IV-6) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 80,95\%$).

$$F_z(N) = -20,082 + 0,00522222 V_c(m/mn) + 142,194 f(mm/tr) + 15,8722 A_p(mm) \quad (IV-6)$$

B/ Graphique des effets principaux pour Fz

La *figure IV-7* illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort tangentiel. On remarque que l'augmentation de la vitesse de coupe F_z reste stable avec une légère variation. Par contre l'effort tangentiel s'élève avec l'augmentation de l'avance. La profondeur de passe est plus prépondérante car sa pente est plus grande (contribution est de **51,57%**).

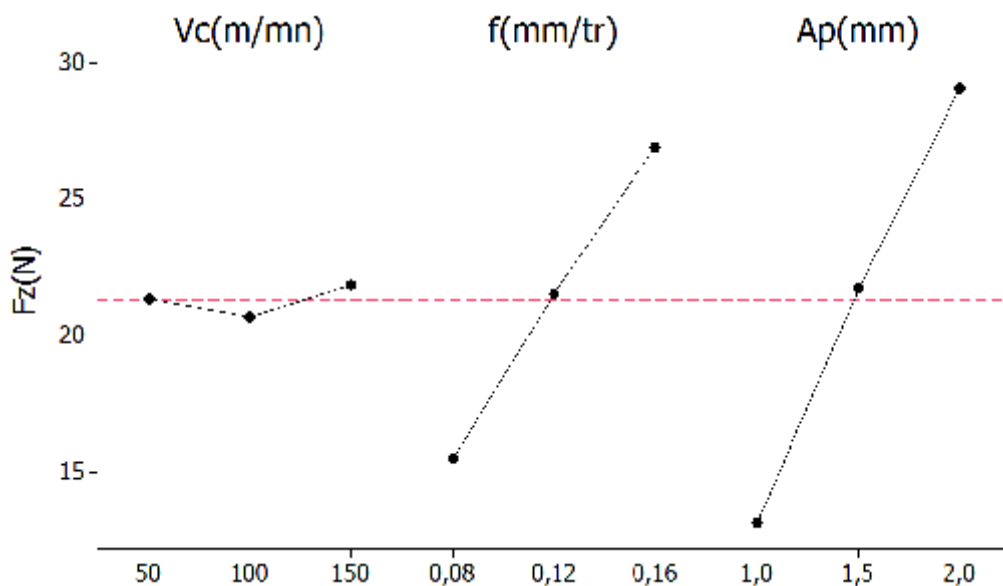


Figure IV-7 Graphe des effets principaux de V_c , f et a_p sur F_z .

C/ Diagramme des interactions pour Fz

La *figure IV-8* montre le diagramme d'interaction pour F_z en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance la profondeur de passe.

Il permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $V_c * f$ est plus importante

que les deux autres interactions avec une contribution de 7,28% suivant le *tableau IV-4*.

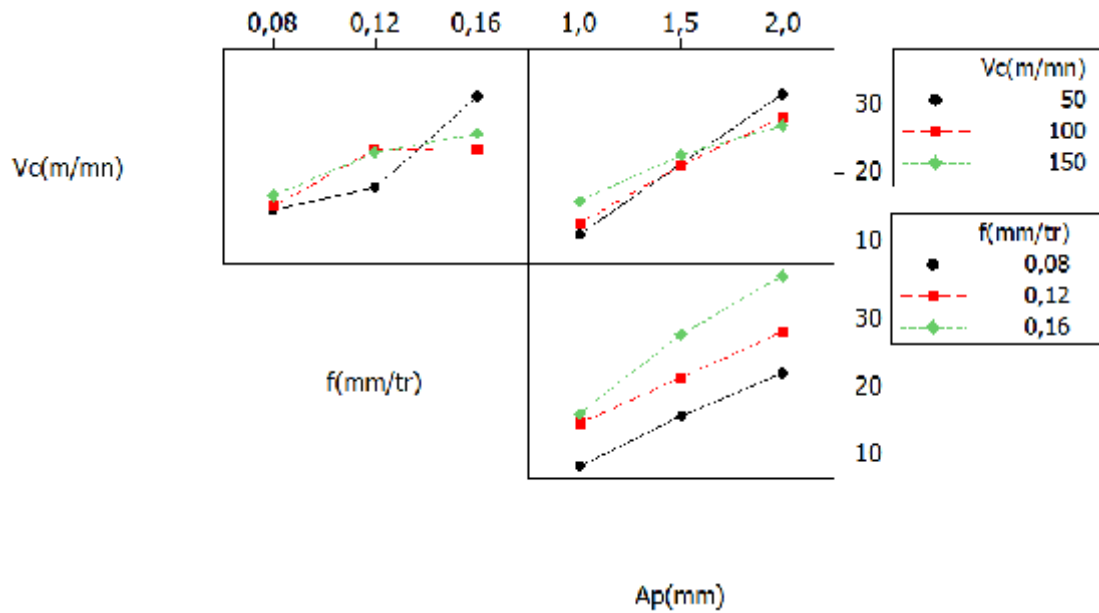
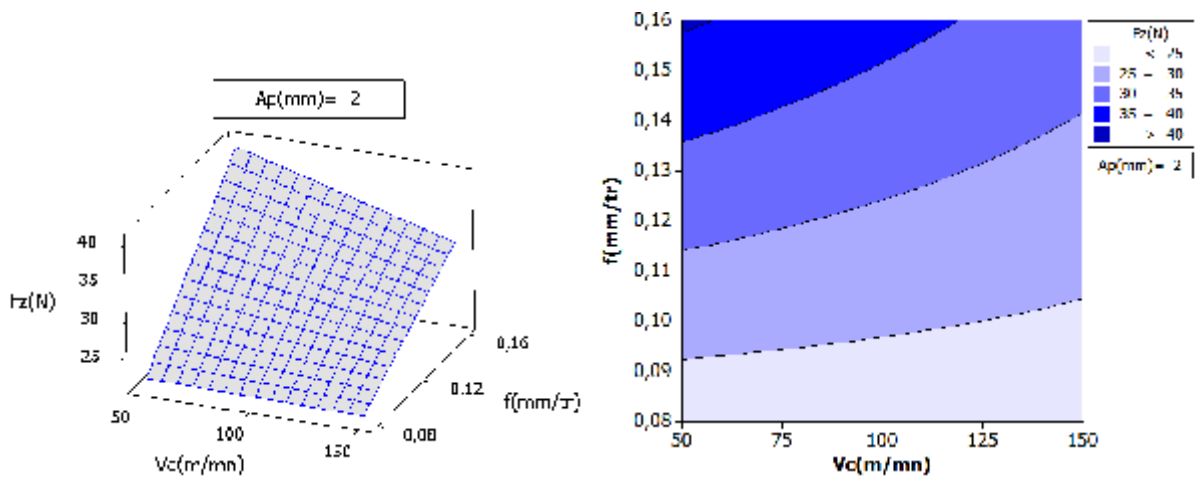
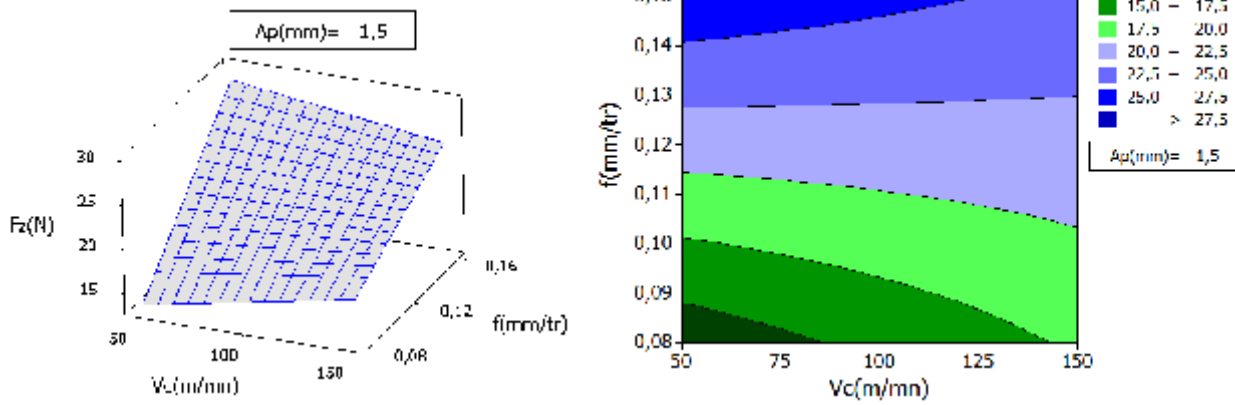
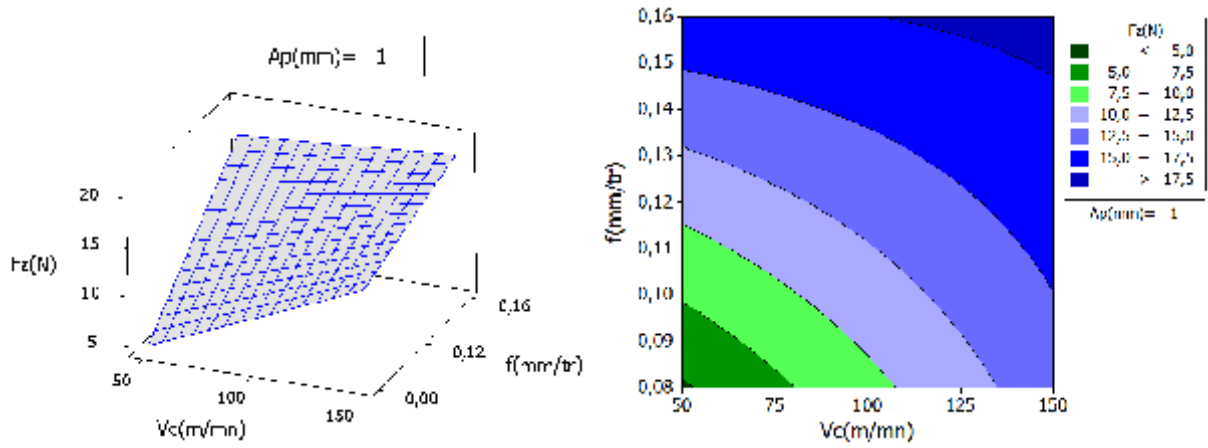


Figure IV-8 Diagramme d'interaction pour F_z .

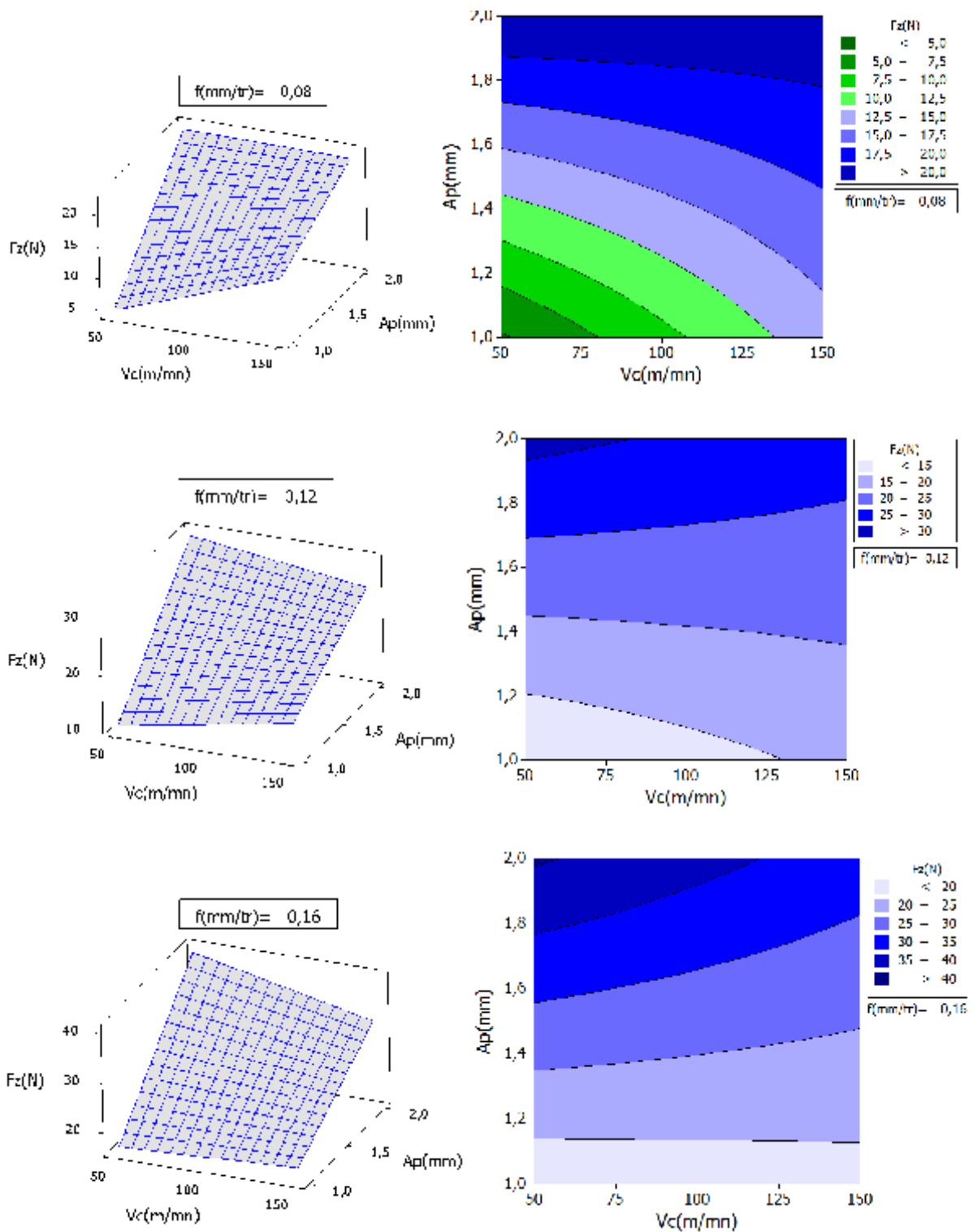
D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour F_z

La *figure IV-9* illustre l'évolution de l'effort tangentiel en fonction de (V_c , f et a_p). L'analyse des courbes 3D montre que la profondeur de passe et la vitesse d'avance ont une interaction importante sur F_y .

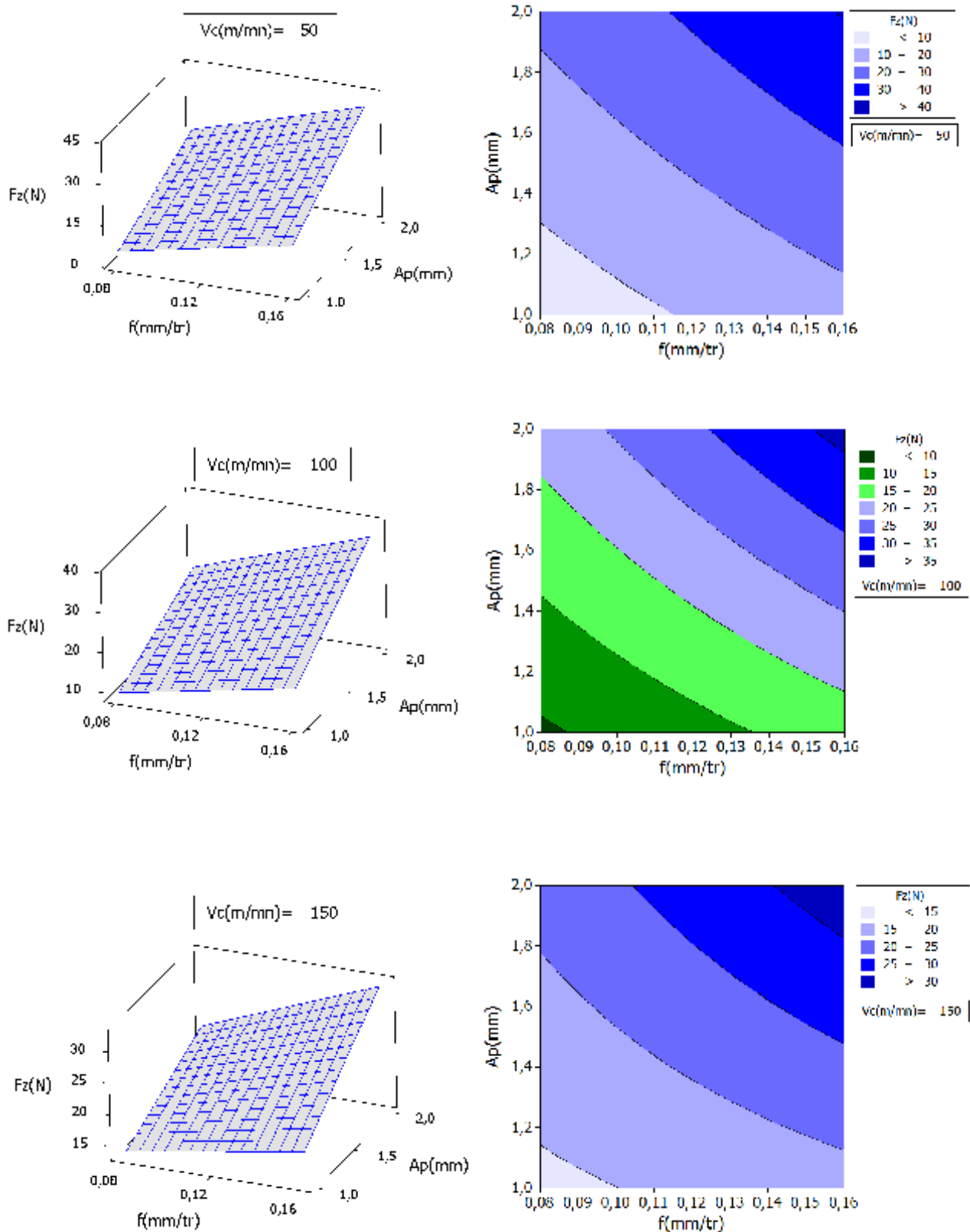
Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (F_z), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



a) F_z en fonction de (V_c, f) pour $A_p(\text{mm}) = 1; 1,5; 2$.



b) F_z en fonction de (V_c, a_p) pour $f(\text{mm/tr}) = 0,08; 0,12; 0,16$.



c) F_z en fonction de (f, a_p) pour $V_c(m/min) = 50; 100; 150$.

Figure IV-9 La surface de réponse de l'effort (F_z) en fonction de V_c, f, a_p et les graphes de contour.

IV-2.2 Analyse des critères de la rugosité

IV-2.2.1 Analyse de la rugosité de surface Ra

Le *tableau IV-5* présente l'analyse de variance pour le critère de rugosité Ra. On remarque que les termes principaux et l'interaction $V_c \cdot A_p$ ont un impact significatif. Les autres interactions n'ont pas un impact significatif sur le critère Ra puisque la valeur de probabilité P est supérieure à 0,05. La vitesse de coupe est le facteur le plus prépondérant avec une contribution de 29,32%, suivi par la profondeur de passe avec une contribution de 12,98 % et en dernier lieu par l'avance avec une contribution de 10,73 %.

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|-------------------|----|---------|---------|-------|-------|------------------|
| Vc(m/mn) | 2 | 2,20876 | 1,10438 | 14,61 | 0,002 | 29,32 |
| f(mm/tr) | 2 | 0,8081 | 0,40405 | 5,34 | 0,034 | 10,73 |
| Ap(mm) | 2 | 0,97799 | 0,48899 | 6,47 | 0,021 | 12,98 |
| Vc(m/mn)*f(mm/tr) | 4 | 0,49073 | 0,12268 | 1,62 | 0,259 | 6,51 |
| Vc(m/mn)*Ap(mm) | 4 | 1,8127 | 0,45318 | 5,99 | 0,016 | 24,06 |
| f(mm/tr)*Ap(mm) | 4 | 0,63137 | 0,15784 | 2,09 | 0,174 | 8,38 |
| Erreur | 8 | 0,60481 | 0,0756 | | | 8,03 |
| Total | 26 | 7,53445 | | | | 100,00 |

Tableau IV-5 Résultats de l'analyse de variance pour Ra.

A/ Analyse de régression

1/ Modèle généralisé

L'analyse de régression de Ra en fonction de V_c , f et ap donne l'équation du modèle complet (IV-7) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 93,07\%$).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Ra(\mu m)} = & -0,739074 + 0,0051 V_c(\text{m/mn}) + 24,4583 f(\text{mm/tr}) \\
 & + 1,39333 A_p(\text{mm}) - 0,0258333 V_c(\text{m/mn}) * f(\text{mm/tr}) \\
 & - 0,00513333 V_c(\text{m/mn}) * A_p(\text{mm}) - 11,1667 f(\text{mm/tr}) * A_p(\text{mm}) \quad (\text{IV-7})
 \end{aligned}$$

2/ Modèle réduit

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, le modèle réduit de la rugosité de surface R_a en fonction de V_c , f et a_p donne l'équation (IV-8), avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 90,24 \%$).

$$\begin{aligned} Ra(\mu\text{m}) = & 1,58093 + 0,002 V_c(\text{m/mn}) + 5,125 f(\text{mm/tr}) \\ & + 0,0533333 A_p(\text{mm}) - 0,00513333 V_c(\text{m/mn}) * A_p(\text{mm}) \end{aligned} \quad (\text{IV-8})$$

B/ Graphique des effets principaux pour R_a

La *figure IV-10* illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité R_a . On remarque que l'augmentation de la vitesse de coupe et la profondeur de passe minimise R_a . La rugosité R_a s'élève légèrement avec l'augmentation de l'avance. La vitesse de coupe est plus prépondérante car sa pente est plus grande (sa contribution est de 29,32 %).

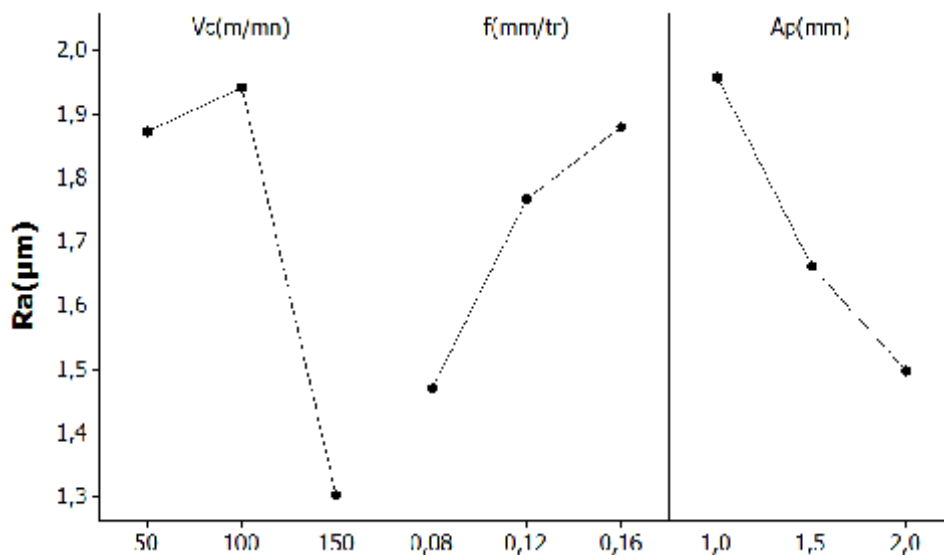


Figure IV-10 Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur R_a .

C/ Diagramme des interactions pour R_t

La *figure IV-11* montre le diagramme d'interaction pour R_t en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

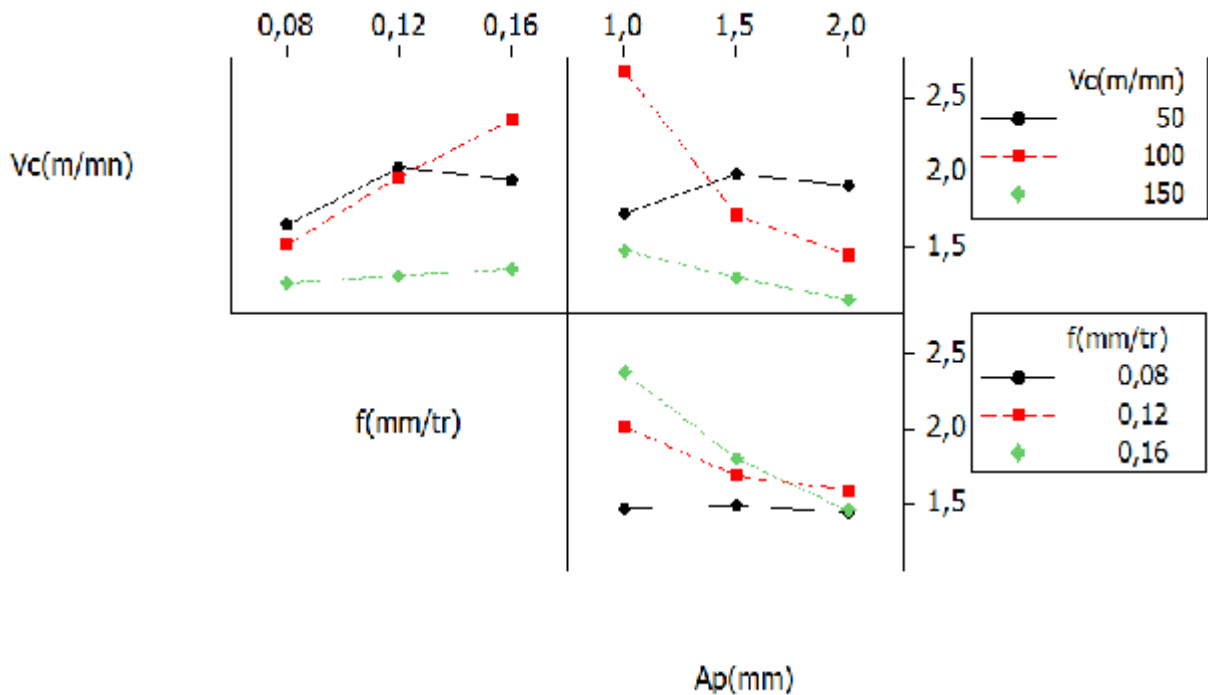
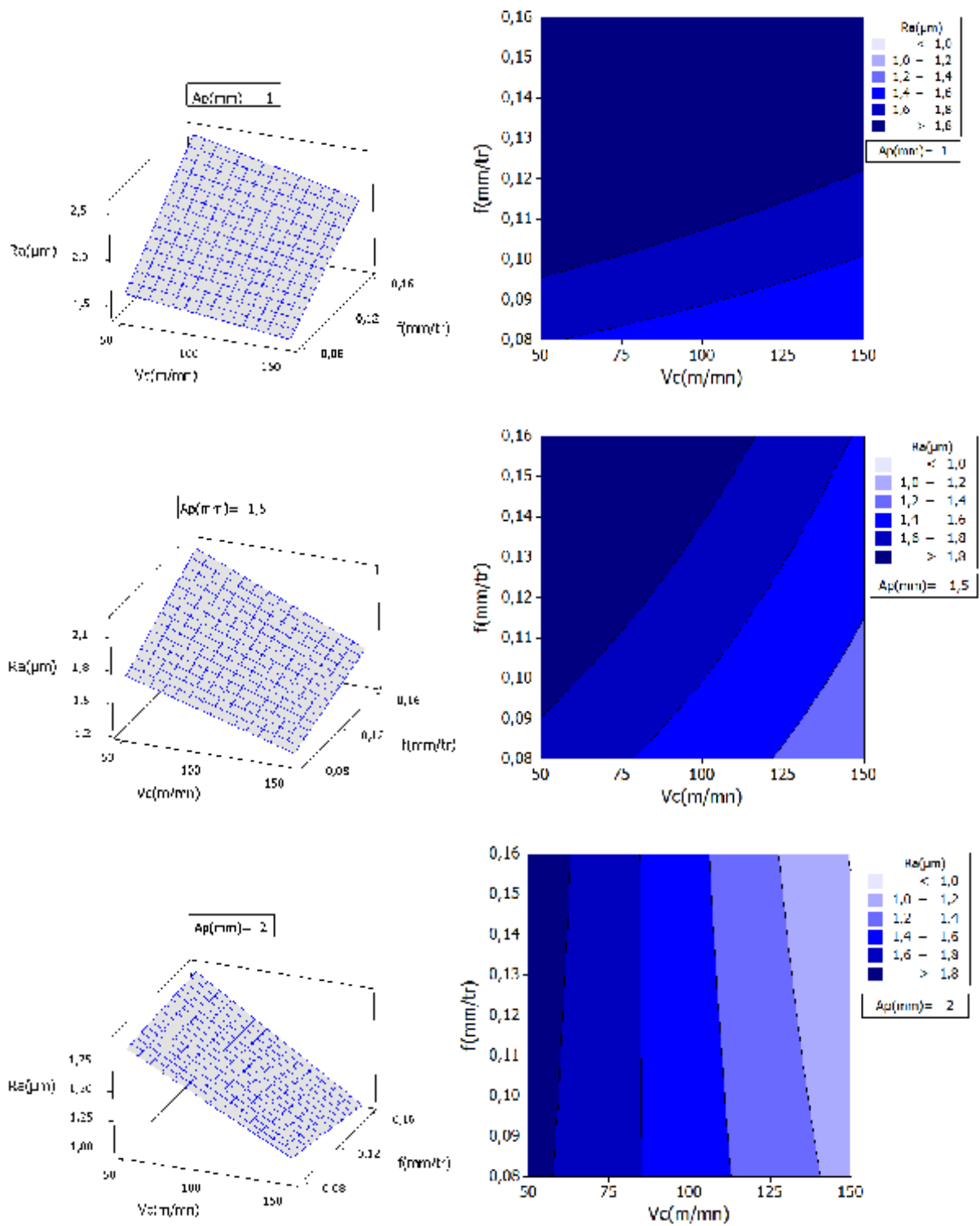


Figure IV-11 Diagramme d'interaction pour Ra.

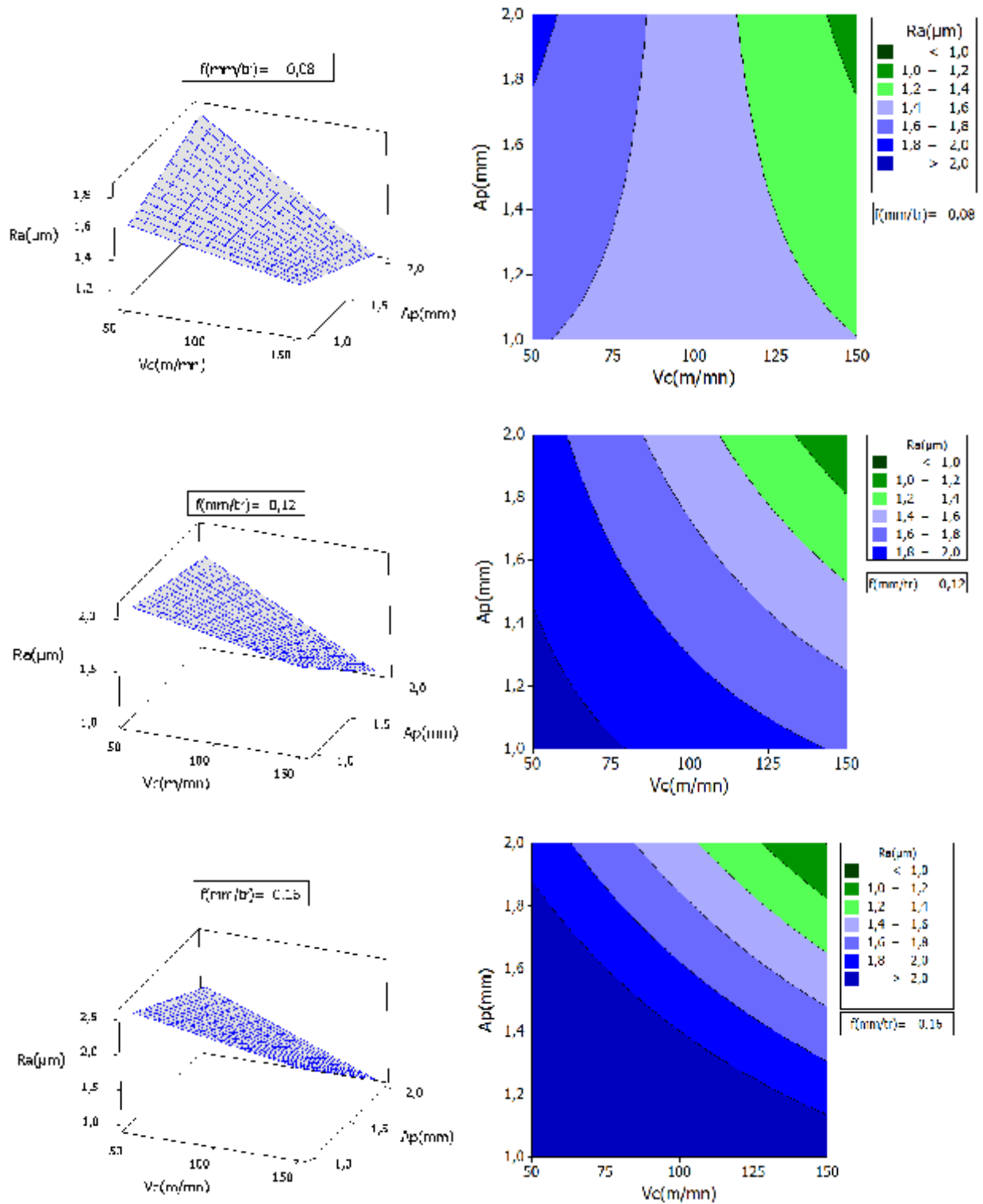
La *figure IV-11* présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $Vc \cdot ap$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 24,06 % suivant le *tableau IV-5*.

D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour Ra

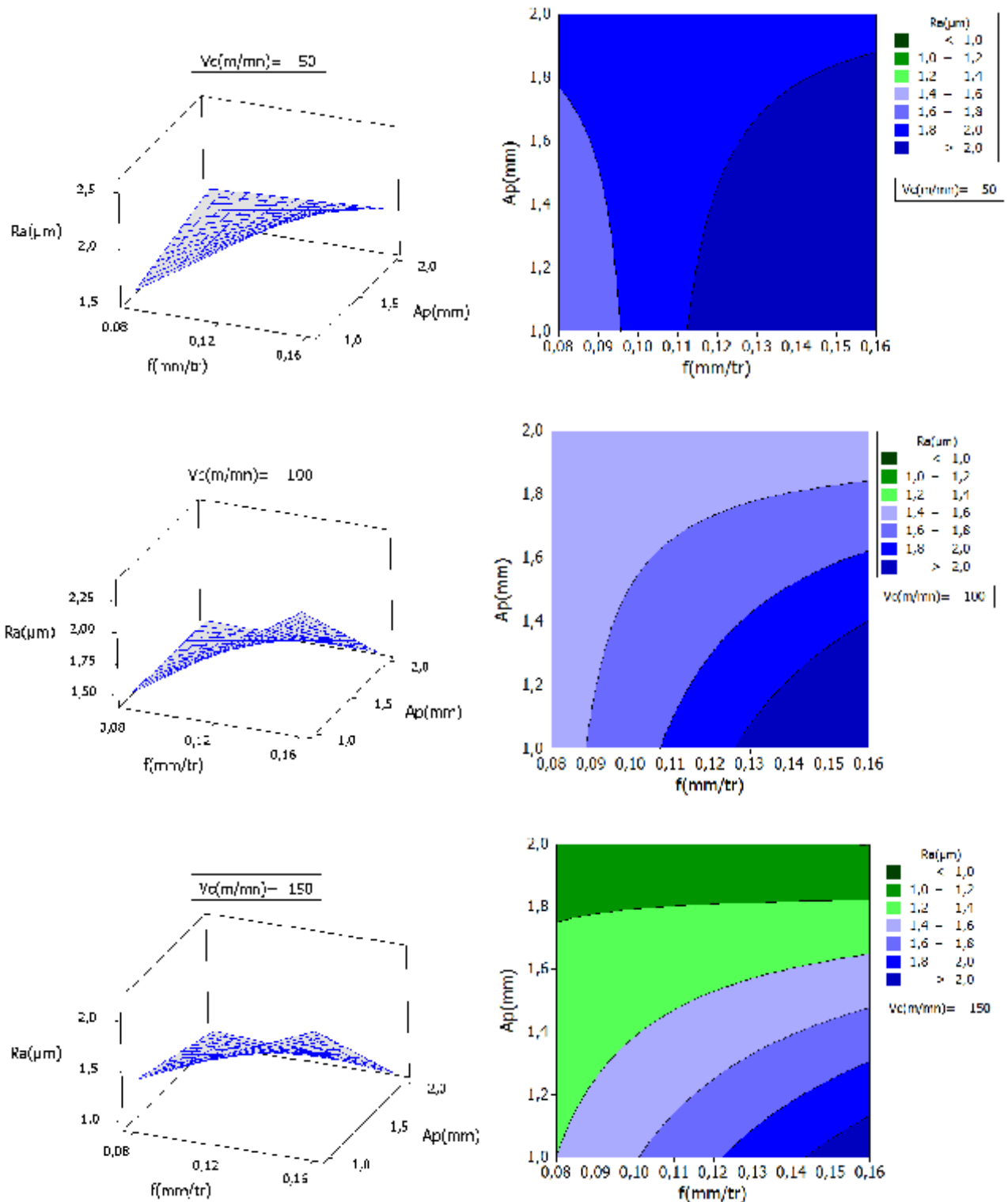
La *figure IV-12* montre le domaine d'influence de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe sur la rugosité Ra. Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (Ra), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



a) R_a en fonction de (V_c, f) pour $A_p(\text{mm})=1; 1,5; 2$.



b) Ra en fonction de (Vc , ap) pour $f(mm/tr)=0,08; 0,12; 0,16$.



c) R_a en fonction de (f, a_p) pour $V_c(m/min)=50; 100; 150$.

Figure IV-12 La surface de réponse de rugosité (R_a) en fonction de V_c, f, a_p et les graphes de contour

IV-2.2.2 Modélisation de la rugosité de surface R_t

Le *tableau IV-6* présente l'analyse de variance pour R_t . On remarque dans le *tableau IV-6* que tous les paramètres de régime de coupe ont un impacte significatif sur la rugosité de surface R_t sauf la vitesse d'avance, les interactions probable n'ont pas un effet significatif car leurs probabilités ($P > 0,05$).

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|-------------------|----|---------|--------|------|-------|------------------|
| Vc(m/mn) | 2 | 249,24 | 124,62 | 3,56 | 0,078 | 14,69 |
| f(mm/tr) | 2 | 128,3 | 64,15 | 1,83 | 0,221 | 7,56 |
| Ap(mm) | 2 | 250,18 | 125,09 | 3,57 | 0,078 | 14,74 |
| Vc(m/mn)*f(mm/tr) | 4 | 208,08 | 52,02 | 1,48 | 0,293 | 12,26 |
| Vc(m/mn)*Ap(mm) | 4 | 373,68 | 93,42 | 2,67 | 0,111 | 22,02 |
| f(mm/tr)*Ap(mm) | 4 | 207,43 | 51,86 | 1,48 | 0,295 | 12,22 |
| Erreur | 8 | 280,26 | 35,03 | | | 16,51 |
| Total | 26 | 1697,16 | | | | 100,00 |

Tableau IV-6 Résultats de l'analyse de variance pour R_t

A/ Analyse de régression

1/ Modèle généralisé

L'analyse de régression de R_t en fonction de V_c , f et ap donne l'équation du modèle complet (IV-9) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 92,17\%$).

$$\begin{aligned}
 R_t(\mu\text{m}) = & -19,9393 + 0,0156167 V_c(\text{m/mn}) + 349,986 f(\text{mm/tr}) \\
 & + 18,93 Ap(\text{mm}) + 0,03625 V_c(\text{m/mn}) * f(\text{mm/tr}) \\
 & - 0,0279333 V_c(\text{m/mn}) * Ap(\text{mm}) - 192,833 f(\text{mm/tr}) * Ap(\text{mm}) \quad (\text{IV-9})
 \end{aligned}$$

2/ Modèle réduit

En introduisant seulement les facteurs qui ont un effet significatif, le modèle réduit du critère de la rugosité R_t en fonction de V_c , f et ap donne l'équation (IV-10). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 90,13\%$).

$$Rt(\mu\text{m}) = 18,5257 - 0,0219333 Vc(\text{m/mn}) + 64,3611 f(\text{mm/tr}) - 7,00333 Ap(\text{mm}) \quad (\text{IV-10})$$

B/ Graphique des effets principaux pour Rt

La *figure IV-13* montre les effets principaux de la vitesse de coupe, de l'avance et la profondeur de passe sur le critère de rugosité Rt.

L'analyse des résultats de la *figure IV-13* montre que la profondeur de passe a un effet significatif sur le critère de rugosité Rt. En effet, on remarque que la pente du paramètre Ap est plus grande par rapport à la pente de la vitesse de coupe et l'avance par tour.

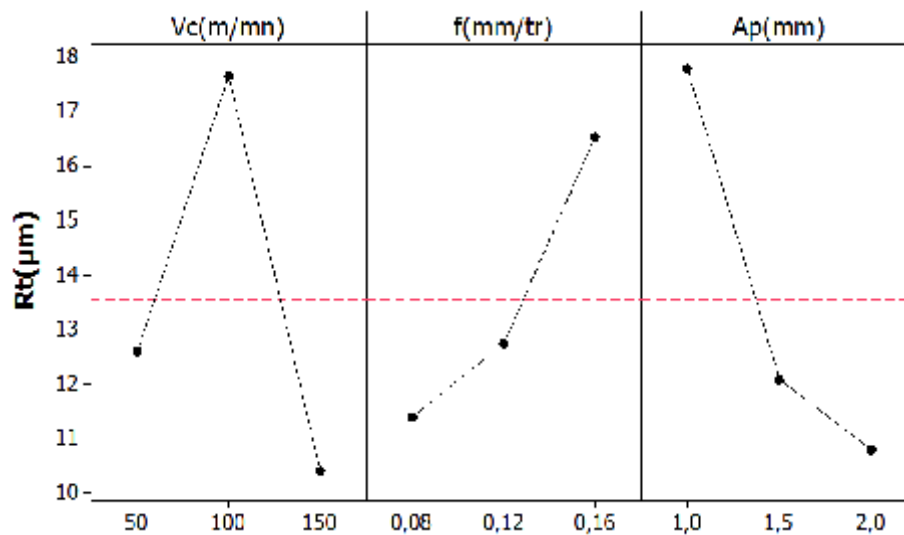


Figure IV-13 Graphes des effets principaux de Vc, f et ap sur Rt

C/ Diagramme des interactions pour Rt

La *figure IV-14* montre le diagramme d'interaction pour Rt en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

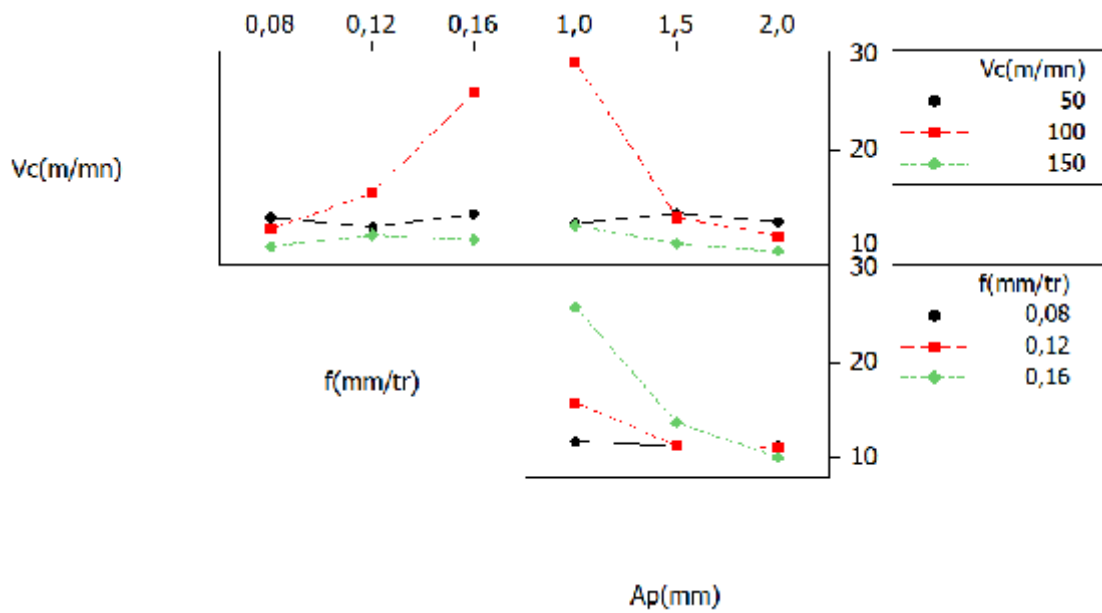
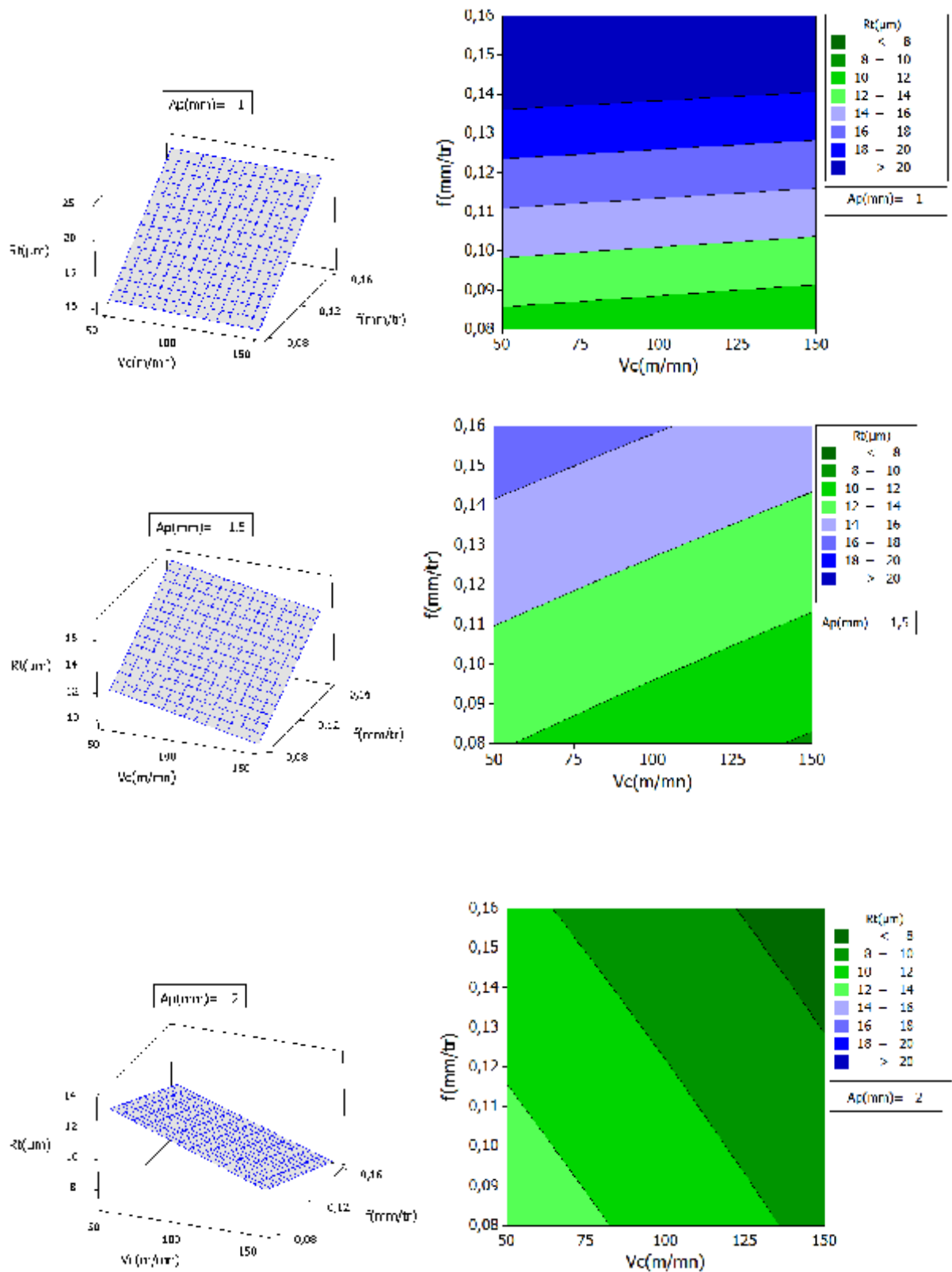


Figure IV-14 Diagramme d'interaction pour R_t

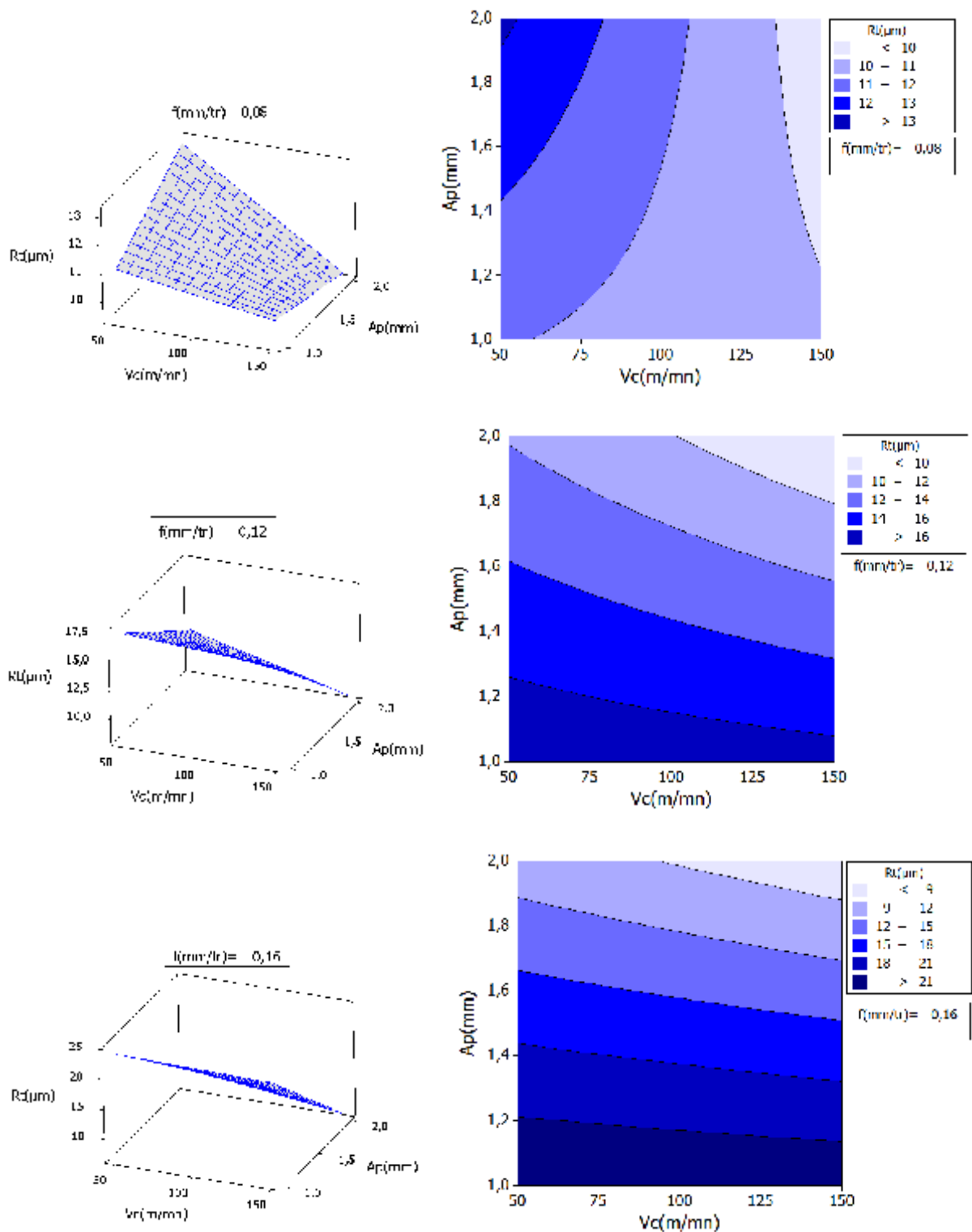
Ce diagramme des interactions nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $V_c \times A_p$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 22,02% suivant le **tableau IV-6**.

D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour R_t

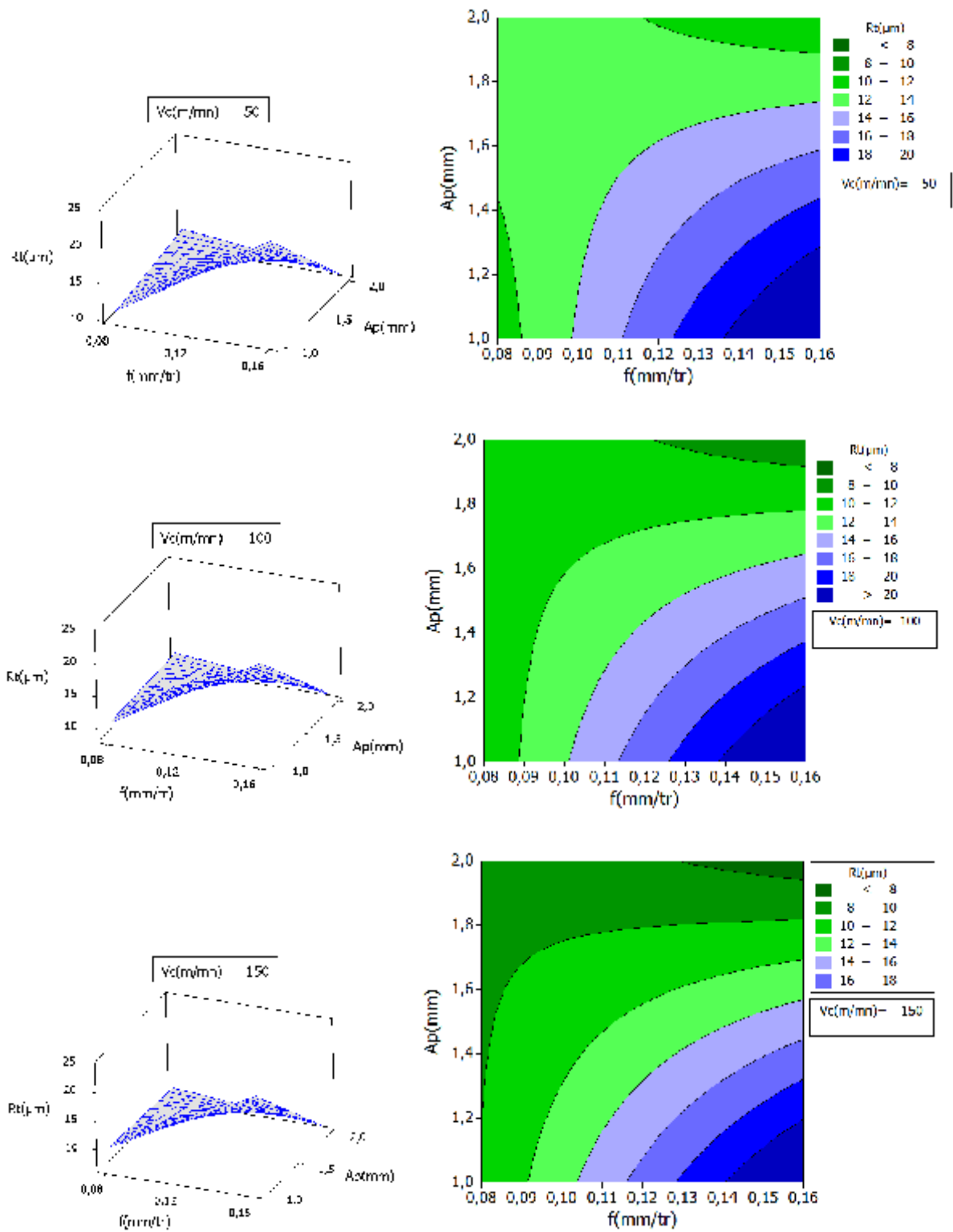
La surface de la réponse de la rugosité R_t en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur le graphique (**figure IV-15**). Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur R_t et cela pour trois vitesses de coupe (50; 100 et 150), trois vitesses d'avance (0,08; 0,12 et 0,16) et pour trois profondeurs de passe (1; 1,5 et 2).



a) R_t en fonction de (V_c, f) pour $A_p(\text{mm})=1; 1,5; 2$.



b) R_t en fonction de (V_c, a_p) pour $f(\text{mm/tr})=0,08; 0,12; 0,16$.



c) R_t en fonction de (f, a_p) pour $V_c(\text{m/min})=50; 100; 150$.

Figure IV-15 La surface de réponse de la rugosité (R_t) en fonction de V_c, f, a_p et les graphes de contour.

IV-3 Modélisation des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage lubrifié

Le *tableau IV-7* présente les résultats expérimentaux correspondants aux efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) et la rugosité de surface (R_a et R_t). Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan $N = 3^3$), lors de tournage de polyamide PA6 par un outil de nuance SPMR120308 on ajoutant la condition de lubrification par les huiles soluble. L'analyse des résultats de ce tableau montre que les valeurs minimales correspond aux efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) respectivement (2,54; 4,74; 5,73), ont été trouvées suivant les conditions de essais N°10 (100 m/min; 0,08 mm/tr et 1 mm). Les valeurs minimales de la rugosité de surface (R_a et R_t) respectivement (0,46; 4,26) μm sont observées dans l'essai N°19 (150 m/min; 0,08 mm/tr et 1 mm). Les valeurs maximales des efforts (F_x , F_y , F_z) respectivement (18,55; 13,51; 49,81) N, ont été observées à l'essai N° 9 c.-à-d. (50 m/min; 0,16 mm/tr et 2 mm). Les maximums de valeur pour les rugosité de surface (R_a et R_t) respectivement (3,29; 22,07) μm ont été observées aux essais N°7 c.-à-d. (50 m/min; 0,16 mm/tr et 1mm), N°27 c.-à-d.(150 m/min; 0,16 mm/tr et 2mm).

| N° | Vc (m/min) | f (mm/tr) | Ap (mm) | Fx (N) | Fy (N) | Fz (N) | Ra (μm) | Rt (μm) |
|----|---------------|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 50 | 0,08 | 1 | 3,45 | 6,02 | 8,54 | 0,74 | 1,25 |
| 2 | 50 | 0,08 | 1,5 | 6,39 | 6,95 | 12,17 | 0,56 | 1,31 |
| 3 | 50 | 0,08 | 2 | 11,49 | 11,66 | 19,28 | 0,72 | 1,69 |
| 4 | 50 | 0,12 | 1 | 3,78 | 6,83 | 12,08 | 1,45 | 2,11 |
| 5 | 50 | 0,12 | 1,5 | 10,91 | 8,64 | 19,79 | 1,81 | 2,46 |
| 6 | 50 | 0,12 | 2 | 16,05 | 12,71 | 33,90 | 1,16 | 2,10 |
| 7 | 50 | 0,16 | 1 | 4,69 | 7,91 | 18,10 | 3,29 | 3,99 |
| 8 | 50 | 0,16 | 1,5 | 10,37 | 11,10 | 30,54 | 2,84 | 2,98 |
| 9 | 50 | 0,16 | 2 | 18,58 | 13,52 | 49,81 | 2,17 | 3,01 |
| 10 | 100 | 0,08 | 1 | 2,54 | 4,74 | 5,73 | 0,60 | 1,04 |
| 11 | 100 | 0,08 | 1,5 | 6,65 | 6,52 | 13,68 | 0,91 | 1,10 |
| 12 | 100 | 0,08 | 2 | 10,91 | 10,98 | 20,07 | 0,50 | 1,04 |
| 13 | 100 | 0,12 | 1 | 2,69 | 6,38 | 11,87 | 1,12 | 1,72 |
| 14 | 100 | 0,12 | 1,5 | 8,32 | 8,77 | 20,10 | 1,67 | 2,53 |
| 15 | 100 | 0,12 | 2 | 12,25 | 11,87 | 30,08 | 1,46 | 2,81 |
| 16 | 100 | 0,16 | 1 | 4,18 | 9,05 | 17,65 | 3,01 | 3,62 |
| 17 | 100 | 0,16 | 1,5 | 8,43 | 10,53 | 32,02 | 2,89 | 3,45 |
| 18 | 100 | 0,16 | 2 | 17,16 | 12,81 | 46,00 | 3,05 | 4,12 |
| 19 | 150 | 0,08 | 1 | 3,68 | 6,73 | 8,91 | 0,46 | 0,86 |
| 20 | 150 | 0,08 | 1,5 | 6,06 | 6,31 | 11,83 | 0,48 | 1,01 |

| | | | | | | | | |
|----|-----|------|-----|-------|-------|-------|------|------|
| 21 | 150 | 0,08 | 2 | 10,64 | 9,45 | 16,38 | 1,23 | 2,82 |
| 22 | 150 | 0,12 | 1 | 3,47 | 5,54 | 11,16 | 1,64 | 2,13 |
| 23 | 150 | 0,12 | 1,5 | 6,54 | 8,16 | 15,75 | 1,44 | 1,91 |
| 24 | 150 | 0,12 | 2 | 9,01 | 8,38 | 27,78 | 1,43 | 1,91 |
| 25 | 150 | 0,16 | 1 | 2,94 | 7,18 | 14,71 | 3,27 | 4,06 |
| 26 | 150 | 0,16 | 1,5 | 3,78 | 9,57 | 27,75 | 2,89 | 3,86 |
| 27 | 150 | 0,16 | 2 | 13,89 | 11,12 | 39,71 | 3,25 | 3,91 |

Tableau IV-7 Résultats de la rugosité et effort de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe lubrifié (Le tableau orthogonal standard de Taguchi L27; $N=3^3$).

IV-3.1 Analyse des efforts de coupe

IV-3.1.1 Modélisation de l'effort axial F_x

Le **tableau IV-8** expose les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour déterminer l'influence des différents facteurs sur l'effort axial. L'analyse des résultats montre que la profondeur de passe influe énormément sur l'effort axial avec une contribution de 77,18 %. La vitesse de coupe et l'interaction entre la profondeur de passe et l'avance ($f \times Ap$) présentent une contribution de (6,42 et 5,33)% successivement.

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|-------------------|----|---------|---------|--------|--------|------------------|
| Vc(m/mn) | 2 | 36,671 | 18,335 | 22,78 | <0,001 | 6,42 |
| f(mm/tr) | 2 | 27,39 | 13,695 | 17,01 | 0,001 | 4,79 |
| Ap(mm) | 2 | 440,893 | 220,447 | 273,83 | <0,001 | 77,18 |
| Vc(m/mn)*f(mm/tr) | 4 | 16,913 | 4,228 | 5,25 | 0,023 | 2,96 |
| Vc(m/mn)*Ap(mm) | 4 | 12,53 | 3,132 | 3,89 | 0,048 | 2,19 |
| f(mm/tr)*Ap(mm) | 4 | 30,42 | 7,605 | 9,45 | 0,004 | 5,33 |
| Erreur | 8 | 6,44 | 0,805 | | | 1,13 |
| Total | 26 | 571,256 | | | | 100,00 |

Tableau IV-8 Résultats de l'analyse de variance pour F_x .

A/ Analyse de régression

1/ Modèle généralisé

Le modèle qui décrit la variation de F_x en fonction des tous les facteurs et les interactions est défini de la façon suivante:

$$\begin{aligned}
 F_x \text{ (N)} = & - 8,08002 + 0,0856686 V_c(\text{m/mn}) - 9,17686 f(\text{mm/tr}) \\
 & + 6,1979 A_p(\text{mm}) - 0,50355 V_c(\text{m/mn}) \times f(\text{mm/tr}) \\
 & - 0,0358582 V_c(\text{m/mn}) \times A_p(\text{mm}) + 60,2468 f(\text{mm/tr}) \times A_p(\text{mm}) \quad (\text{IV-11})
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 94,38\%$$

2/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de F_x en fonction des facteurs et des interactions significatif peut être défini de la façon suivante:

$$F_x \text{ (N)} = -7,50312 - 0,0285447 V_c(\text{m/mn}) + 30,8383 f(\text{mm/tr}) + 9,8417 A_p(\text{mm}) \quad (\text{IV-12})$$

$$R^2 = 87,51 \%$$

B/ Graphique des effets principaux pour F_x

La *figure IV-16* illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort axial. On remarque que F_x s'élève légèrement avec l'augmentation de l'avance. L'effet de la profondeur de passe est prépondérant car sa pente est plus grande.

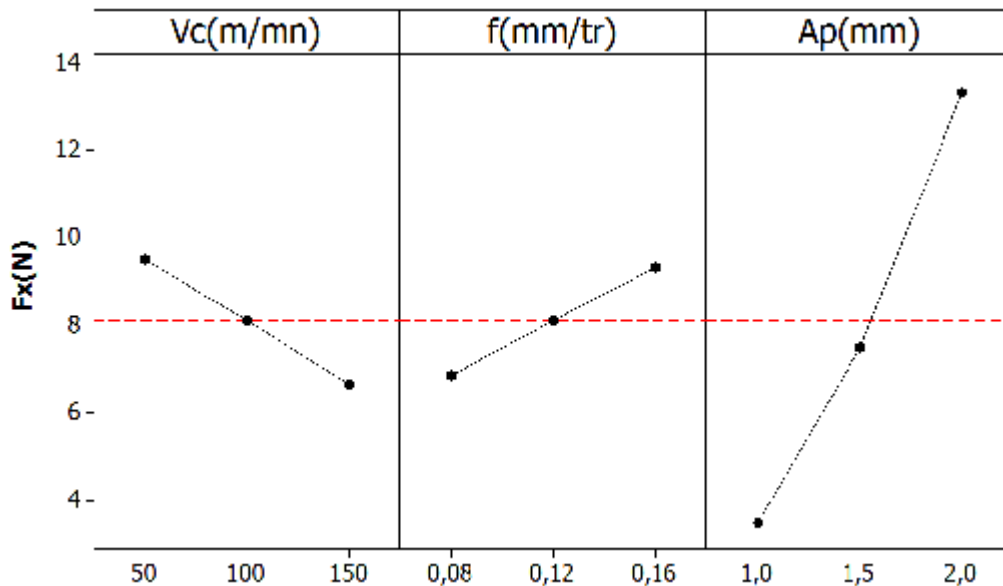


Figure IV-16 Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur F_x .

C/ Diagramme des interactions pour F_x

La *figure IV-17* présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction f^*ap est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 5,33% suivant le *tableau IV-8*.

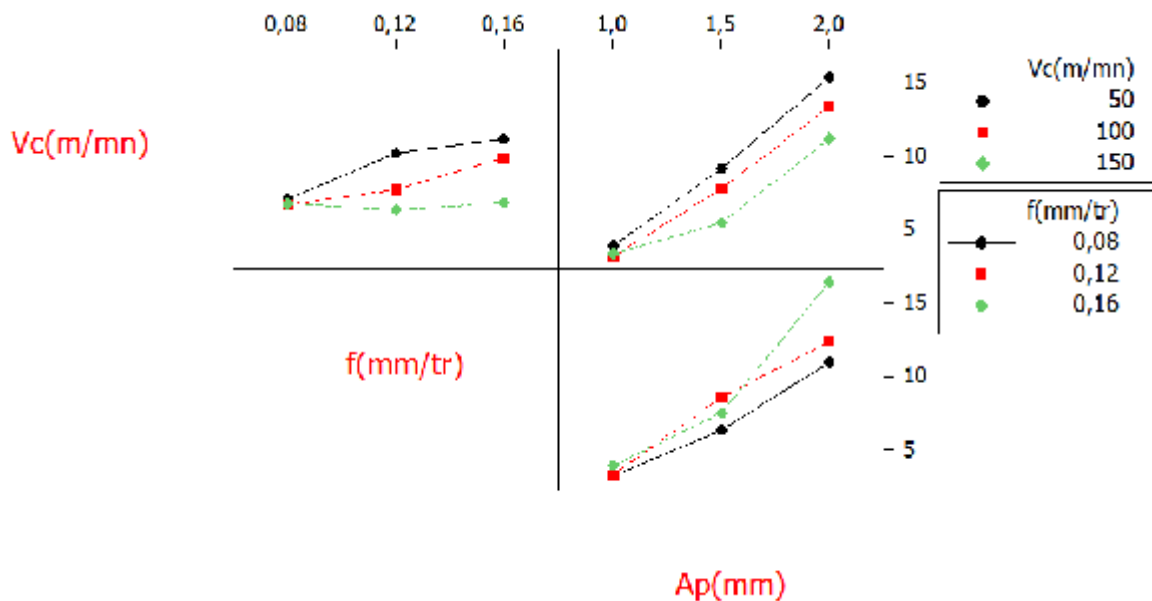
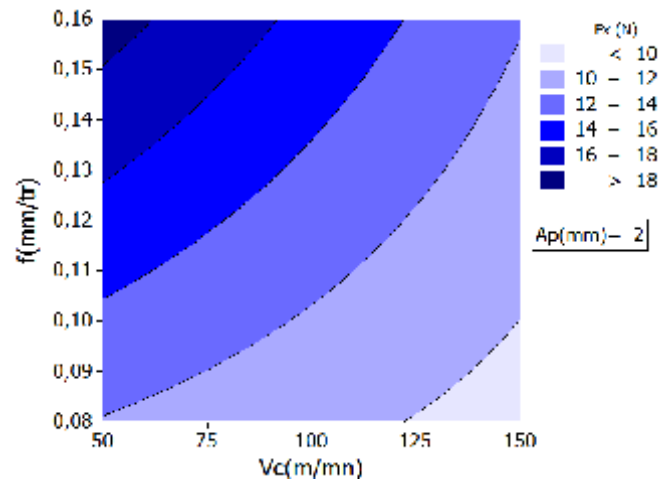
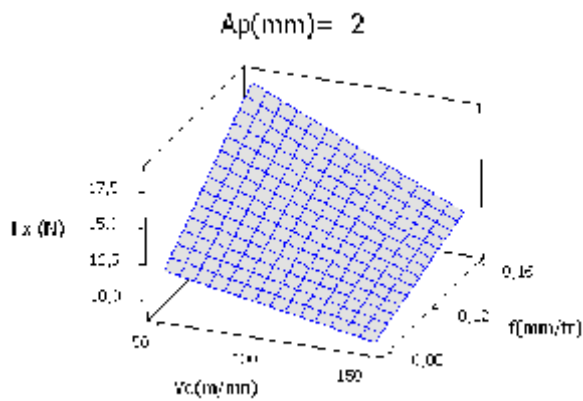
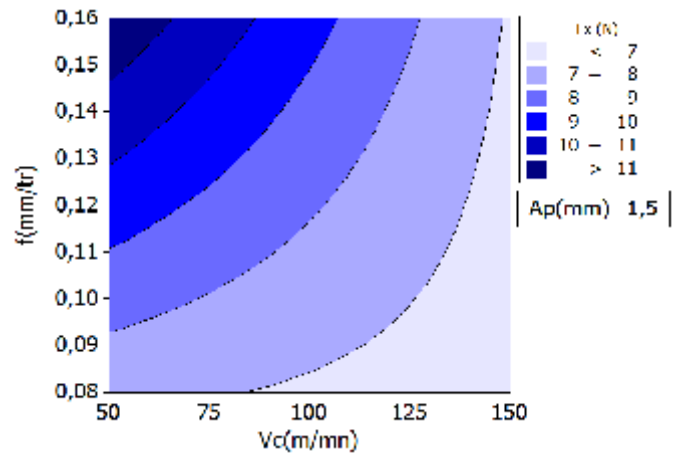
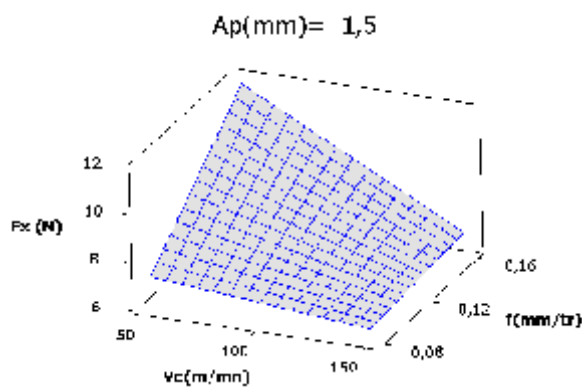
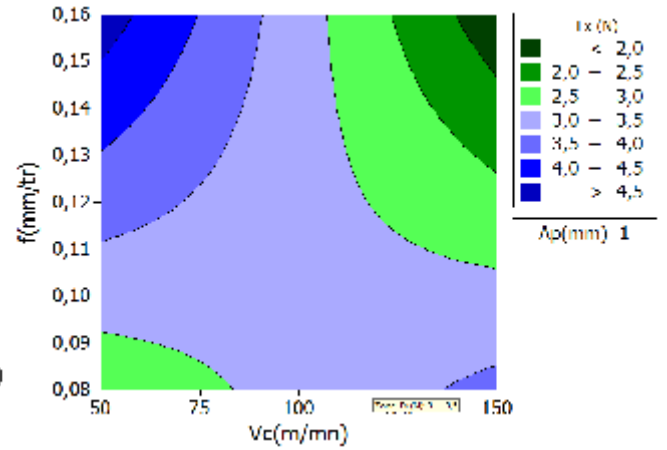
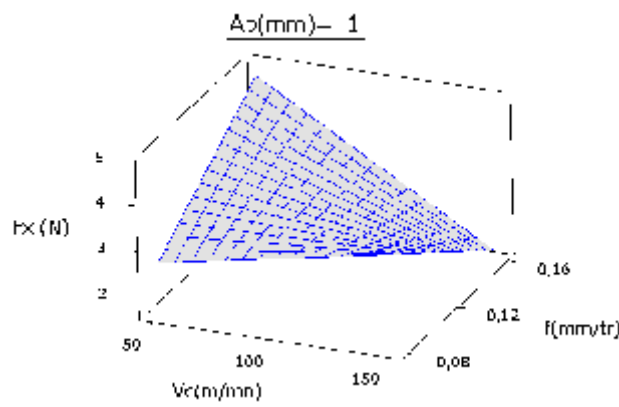


Figure IV-17 Diagramme d'interaction pour F_x .

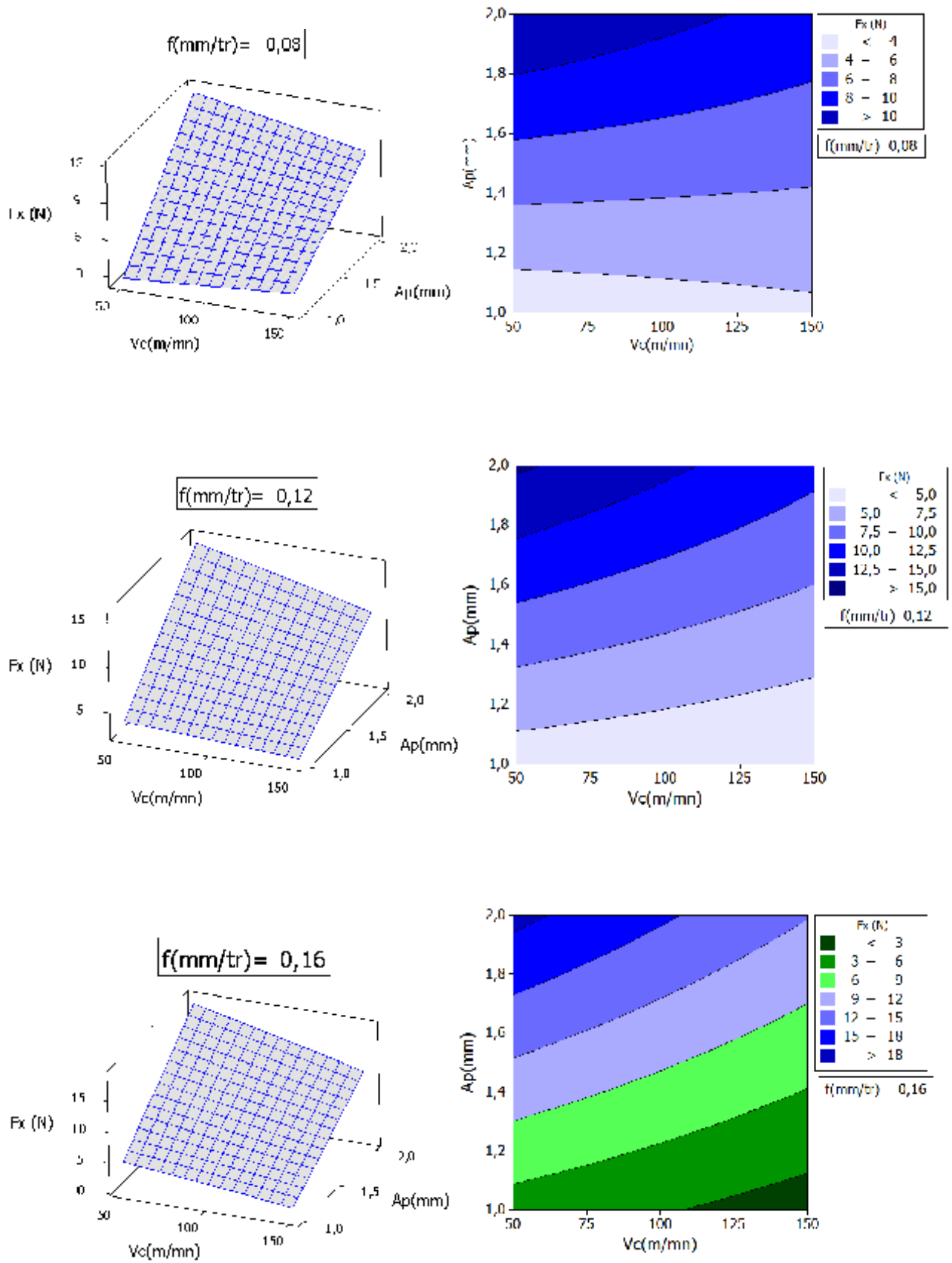
D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour F_x

La surface de réponse de la composante de l'effort de coupe F_x en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur cette *figure IV-18*. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur l'effort F_x . La présentation en 3D (*figure IV-18*) montre que la pente de la profondeur de passe est supérieure par rapport aux autres facteurs, ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort axial suivi par la vitesse de coupe et en dernier lieu par l'avance par tour.

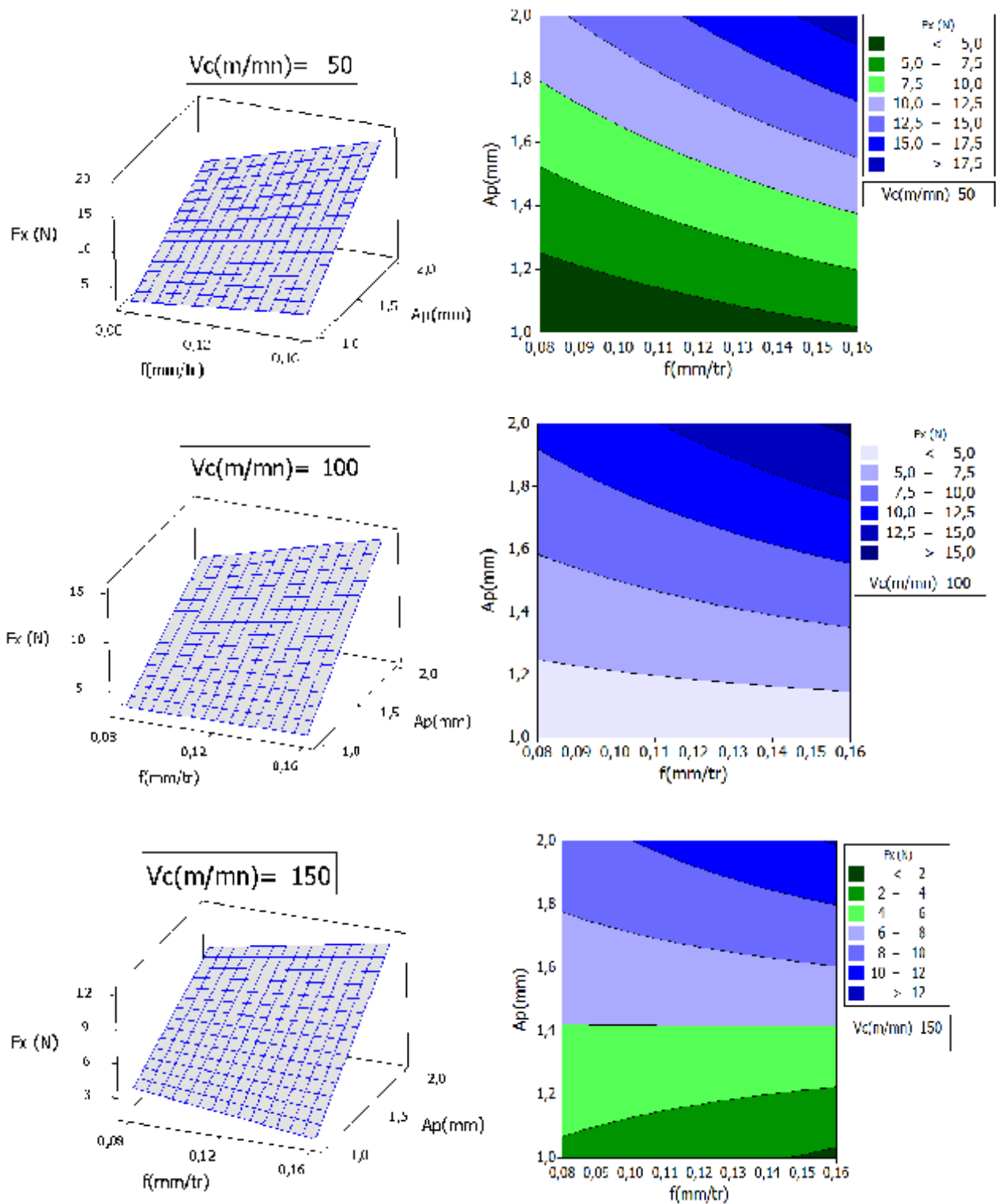
Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (F_x) et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



a) F_x en fonction de (V_c, f) pour $A_p(mm)=1; 1,5; 2$.



b) F_x en fonction de (V_c, a_p) pour $f(\text{mm/tr})=0,08; 0,12; 0,16$.



c) F_x en fonction de (f, a_p) pour $V_c(m/min)=50; 100; 150$.

Figure IV-18 La surface de réponse de l'effort (F_x) en fonction de V_c, f, a_p et les graphes de contour.

IV-3.1.2 Modélisation de l'effort radial F_y

Le *tableau IV-9* présente l'analyse de variance pour F_y . On remarque que seuls les termes principaux ont un impact significatif. Par contre les différentes interactions n'ont pas un impact significatif sur l'effort radial puisque la valeur de probabilité P est supérieure à 0,05. La profondeur de passe est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 63,35%. Ainsi que l'avance a une influence importante et elle présente un pourcentage de contribution de 19,95% et en dernier lieu la vitesse de coupe avec une contribution de 6,2 %.

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|-------------------|----|----------|---------|--------|--------------|------------------|
| Vc(m/mn) | 2 | 9,82 | 4,91 | 11,31 | 0,005 | 6,20 |
| f(mm/tr) | 2 | 31,5952 | 15,7976 | 36,4 | <0,001 | 19,95 |
| Ap(mm) | 2 | 100,3186 | 50,1593 | 115,58 | <0,001 | 63,35 |
| Vc(m/mn)×f(mm/tr) | 4 | 3,0359 | 0,759 | 1,75 | 0,232 | 1,92 |
| Vc(m/mn)×Ap(mm) | 4 | 6,1234 | 1,5308 | 3,53 | 0,061 | 3,87 |
| f(mm/tr)×Ap(mm) | 4 | 3,9934 | 0,9983 | 2,3 | 0,147 | 2,52 |
| Erreur | 8 | 3,472 | 0,434 | | | 2,19 |
| Total | 26 | 158,3584 | | | | 100,00 |

Tableau IV-9 Résultats de l'analyse de variance pour F_y .

A/ Analyse de régression

1/ Modèle généralisé

L'analyse de régression de F_y en fonction de V_c , f et ap donne l'équation du modèle complet (IV-12) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 90,83\%$)

$$\begin{aligned}
 F_y \text{ (N)} = & -6,67562 + 0,0364013 V_c(\text{m/mn}) + 51,2149 f(\text{mm/tr}) \\
 & + 7,87249 A_p(\text{mm}) - 0,105136 V_c(\text{m/mn}) \times f(\text{mm/tr}) \\
 & - 0,0254171 V_c(\text{m/mn}) \times A_p(\text{mm}) - 5,42816 f(\text{mm/tr}) \times A_p(\text{mm}) \quad \text{(IV-13)}
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 90,83\%$$

2/ Modèle réduit

Le modèle qui décrit la variation de F_y en fonction des facteurs significatifs peut être défini de la façon suivante:

$$F_y (N) = -0,624354 - 0,0143406 V_c(m/mn) + 32,5591 f(mm/tr) + 4,6794 A_p(mm) \quad (IV-14)$$

$$R^2 = 87,35 \%$$

B/ Graphique des effets principaux pour F_y

La *figure IV-19* présente les effets principaux de l'avance, vitesse de coupe, la profondeur de passe sur l'effort radial.

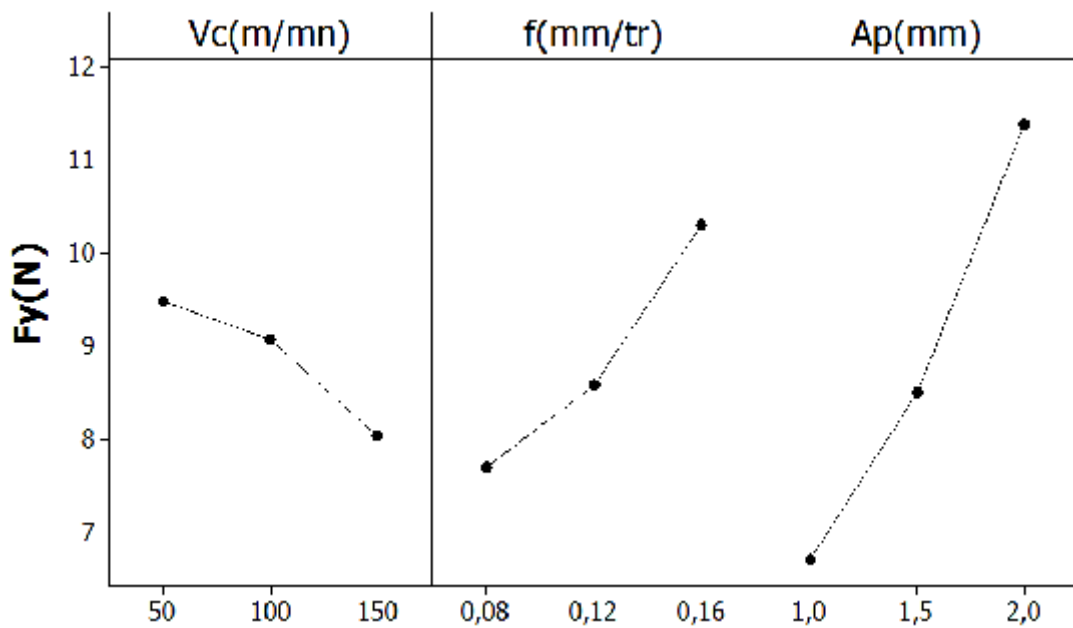


Figure IV-19 Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur F_y .

L'analyse de graph de cette figure montre que la profondeur de passe a la plus grande pente suivie par la vitesse d'avance.

C/ Diagramme des interactions pour F_y

La *figure IV-20* montre le diagramme d'interaction pour F_y en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et la profondeur de passe.

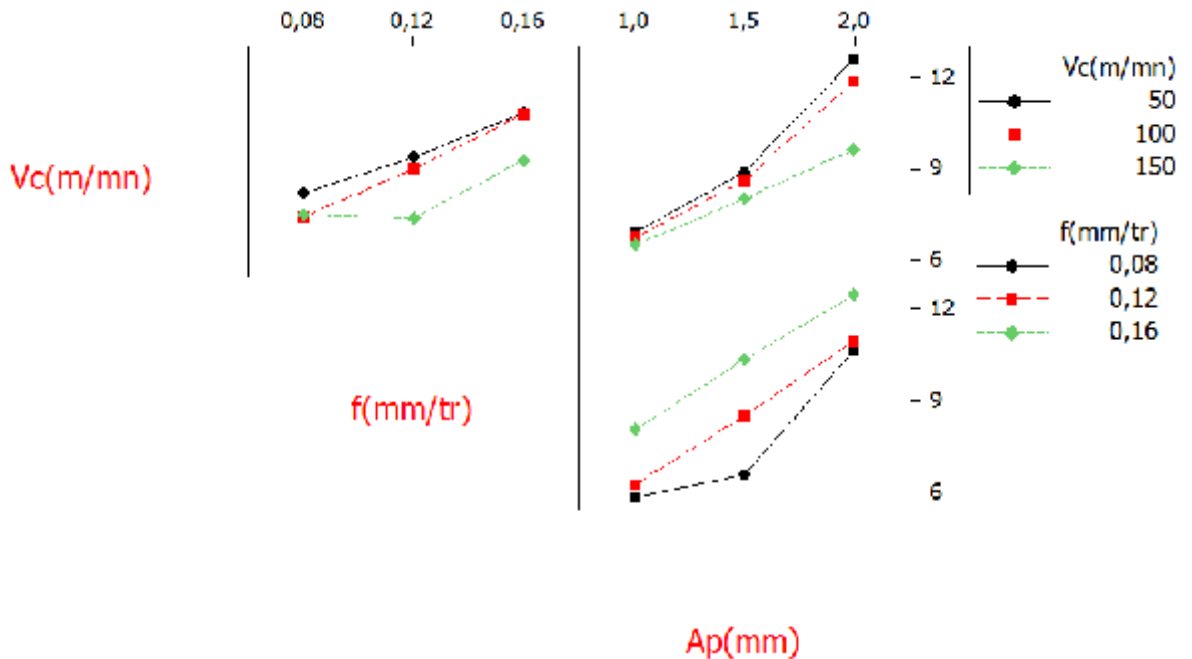


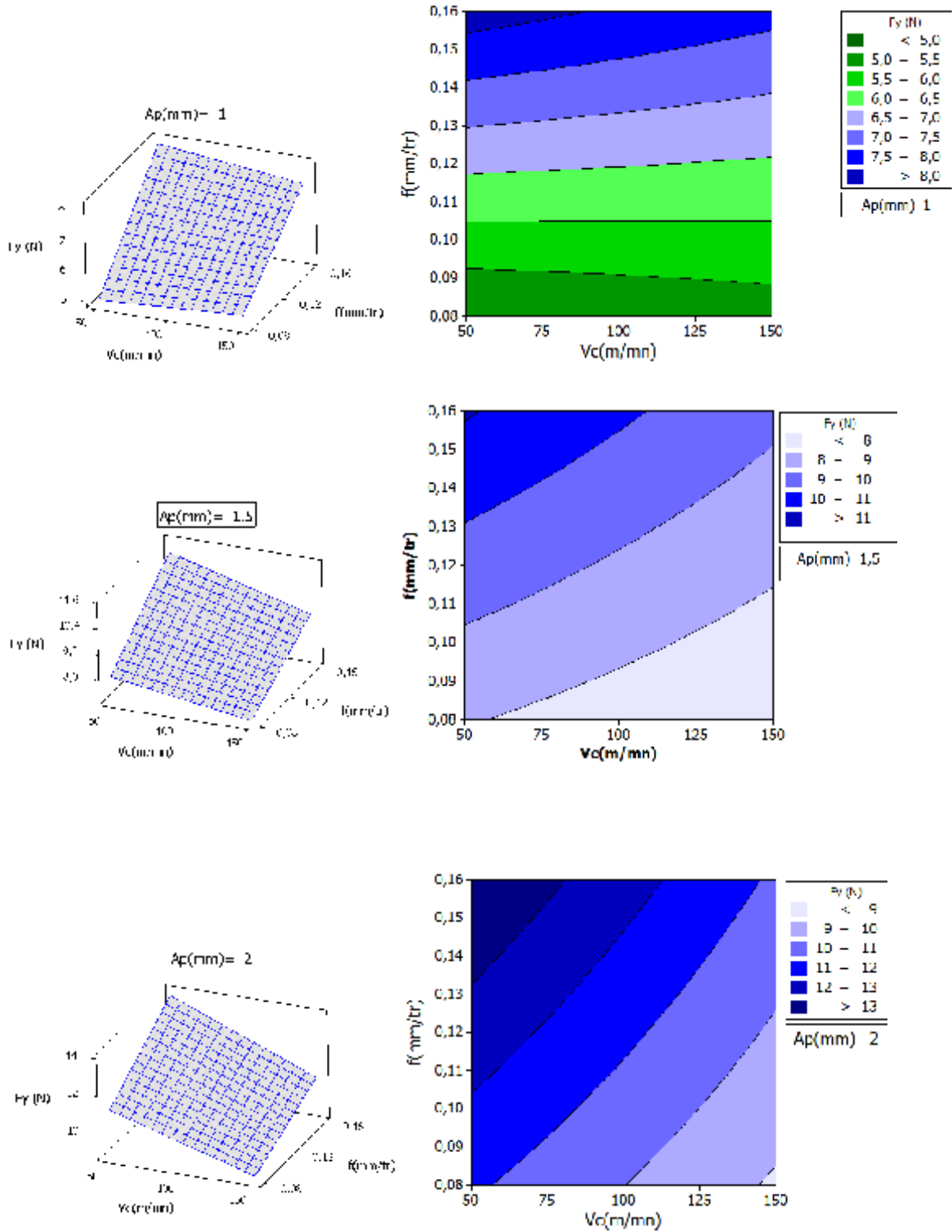
Figure IV-20 Diagramme d'interaction pour F_y .

La *figure IV-20* présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $V_c \cdot A_p$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 3,87 % suivant le *tableau IV-9*.

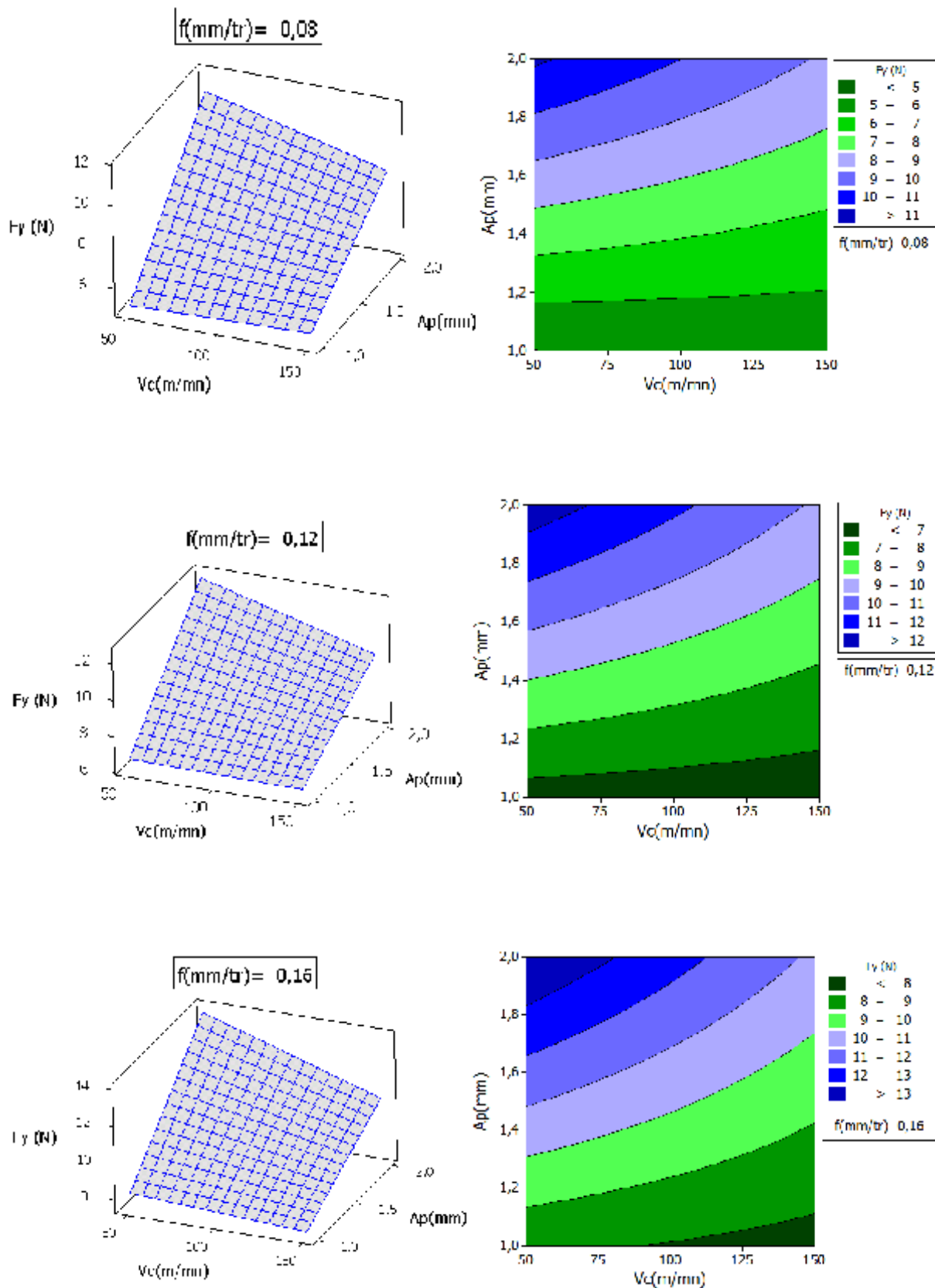
D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour F_y

La surface de réponse de la composante de l'effort de coupe F_y en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur la *figure IV-21*. Cette figure montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe sur l'effort F_y . La présentation en 3D (*figure IV-21*) montre que la pente de la profondeur de passe est supérieure par rapport aux autres facteurs, ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort radial suivi par l'avance par tour et en dernier lieu par la vitesse de coupe.

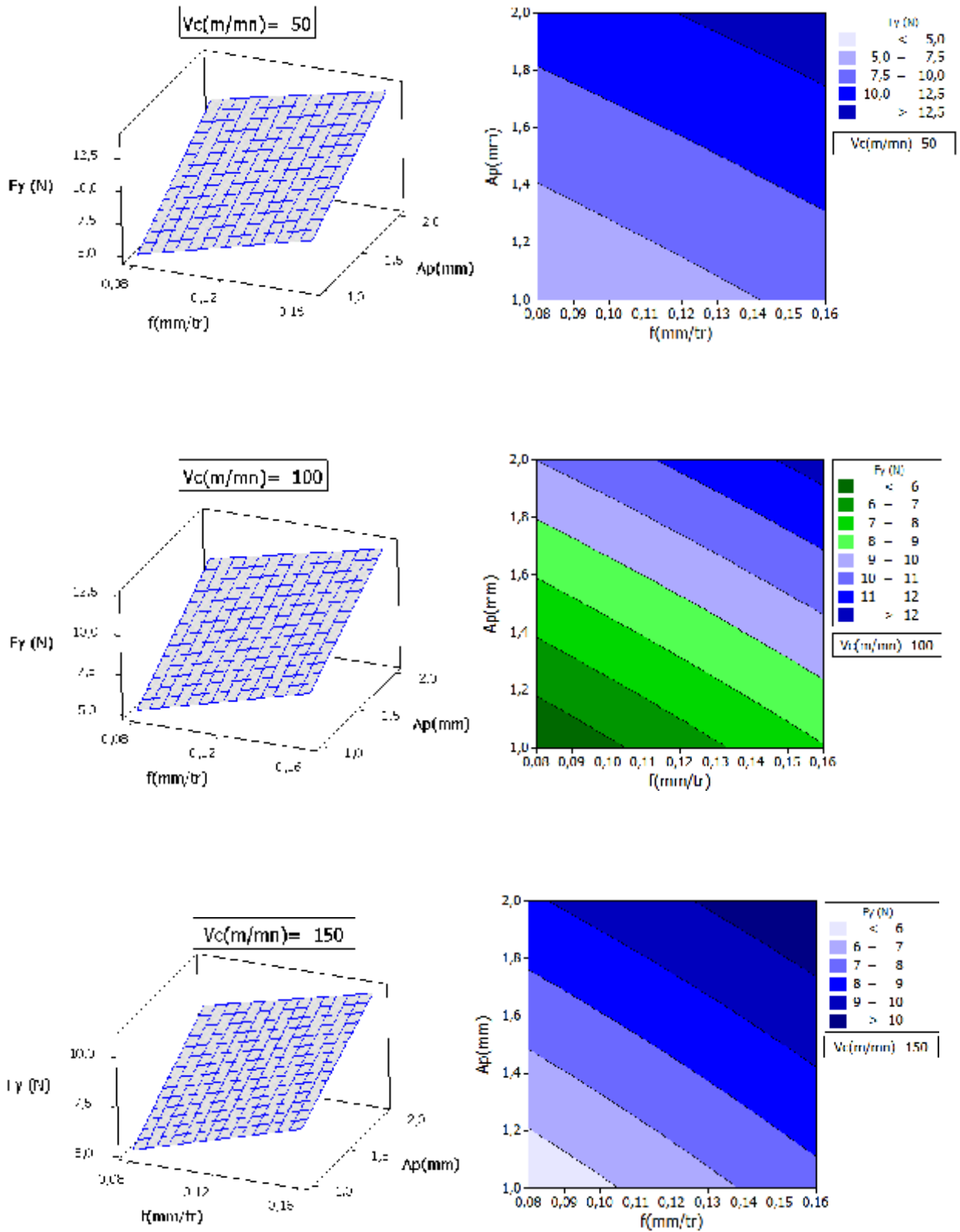
Les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse (F_y), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



a) F_y en fonction de (V_c, f) pour $A_p(mm)=1; 1,5; 2$.



b) F_y en fonction de (V_c, a_p) pour $f(\text{mm/tr})=0,08; 0,12; 0,16$.



c) F_z en fonction de (f, a_p) pour $V_c(m/min)=50; 100; 150$.

Figure IV-21 La surface de réponse de l'effort (F_y) en fonction de V_c, f, a_p et les graphes de contour.

IV-3.1.3 Modélisation de l'effort tangentiel F_z

Le *tableau IV-10* présente les résultats d'ANOVA sur la force tangentielle (F_z). On peut voir que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important affectant la force tangentielle, sa contribution est de 48,80%. Le second facteur est la vitesse d'avance (f) avec une contribution de 41,14%. Quant à la vitesse de coupe (V_c), son influence est faible, car sa contribution est de 1,6%. L'interaction de la profondeur de passe avec la vitesse d'avance ($ap \times f$) a un impact statistiquement significative sur l'effort tangentiel. Les interactions ($V_c \times f$), ($V_c \times ap$), ne sont pas significatives, leurs contributions sont (0,51; 0,84) % respectivement.

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|-----------------------------------|----|---------|--------|--------|--------------|------------------|
| V_c (m/mn) | 2 | 55,63 | 27,82 | 17,56 | 0,001 | 1,60 |
| f (mm/tr) | 2 | 1431,53 | 715,77 | 451,95 | <0,001 | 41,14 |
| Ap (mm) | 2 | 1698,39 | 849,19 | 536,2 | <0,001 | 48,80 |
| V_c (m/mn) \times f (mm/tr) | 4 | 17,71 | 4,43 | 2,8 | 0,101 | 0,51 |
| V_c (m/mn) \times Ap (mm) | 4 | 29,14 | 7,29 | 4,6 | 0,032 | 0,84 |
| f (mm/tr) \times Ap (mm) | 4 | 234,94 | 58,73 | 37,09 | <0,001 | 6,75 |
| Erreur | 8 | 12,67 | 1,58 | | | 0,36 |
| Total | 26 | 3480,01 | | | | 100,00 |

Tableau IV-10 Résultats de l'analyse de variance pour F_z

A/ Analyse de régression

1/ Modèle généralisé

L'analyse de régression de F_z en fonction de V_c , f et ap donne l'équation du modèle complet (IV-14) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 98,25\%$)

$$\begin{aligned}
 F_z \text{ (N)} = & - 5,91764 + 0,109448 V_c(\text{m/mn}) - 50,4315 f(\text{mm/tr}) \\
 & - 1,82642 A_p(\text{mm}) - 0,559079 V_c(\text{m/mn}) \times f(\text{mm/tr}) \\
 & - 0,0506304 V_c(\text{m/mn}) \times A_p(\text{mm}) + 218,776 f(\text{mm/tr}) \times A_p(\text{mm}) \quad (\text{IV-15})
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 98,25 \%$$

2/ Modèle réduit

$$\begin{aligned}
 F_z \text{ (N)} = & 0,791308 + 0,0423585 V_c(\text{m/mn}) - 106,339 f(\text{mm/tr}) \\
 & - 1,82642 A_p(\text{mm}) - 0,0506304 V_c(\text{m/mn}) \times A_p(\text{mm}) \\
 & + 218,776 f(\text{mm/tr}) \times A_p(\text{mm}) \quad (\text{IV-16})
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 97,82 \%$$

B/ Graphique des effets principaux pour Fz

La *figure IV-22* illustre les effets moyens de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe sur l'effort tangentiel. D'après cette figure on constate que la pente de la profondeur de passe est la plus grande suivie par l'avance et en dernier lieu par la vitesse de coupe.

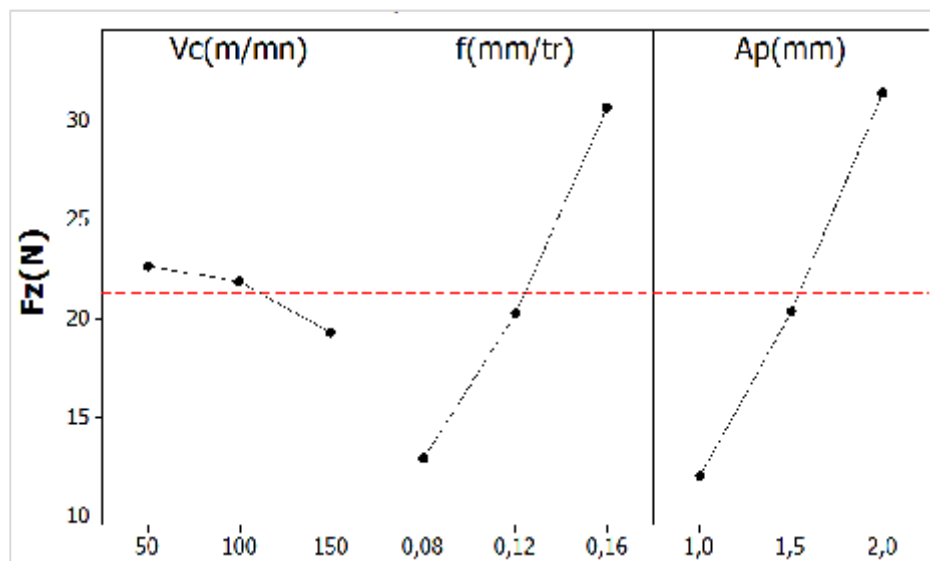


Figure IV-22 Graphes des effets principaux de V_c , f et a_p sur F_z

C/ Diagramme des interactions pour F_z

La *figure IV-23* présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $V_c \cdot a_p$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 6,75% suivant le *tableau IV-10*.

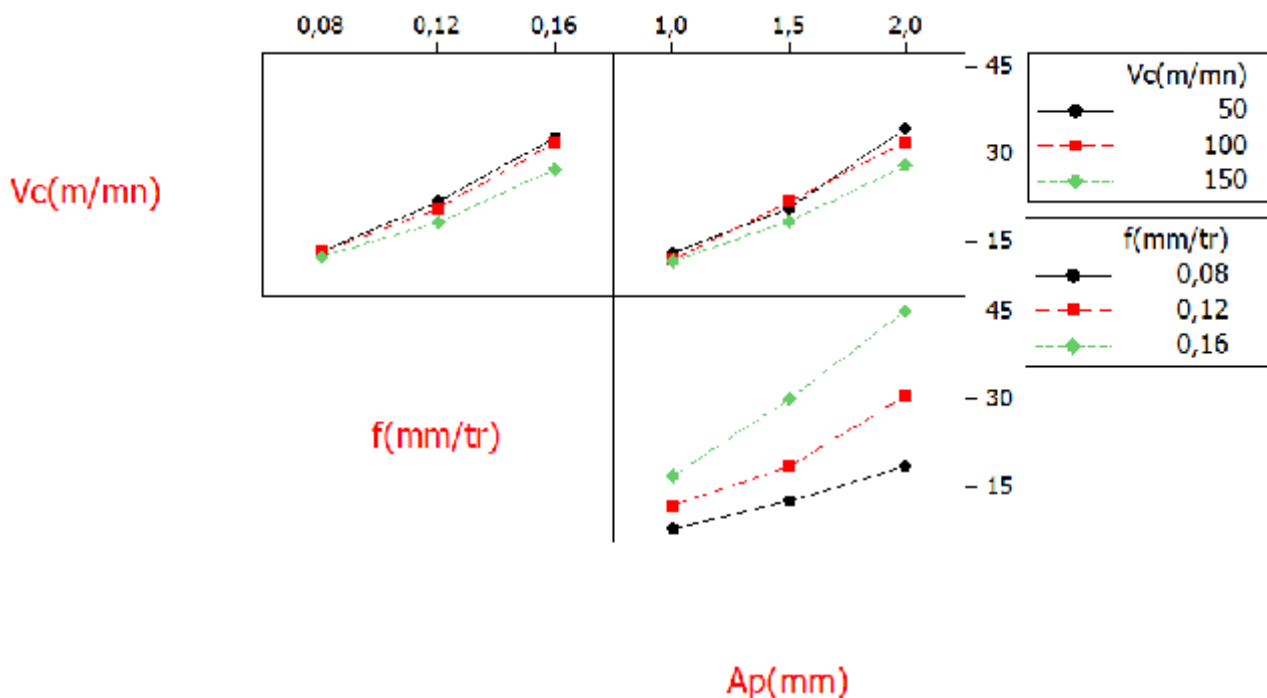
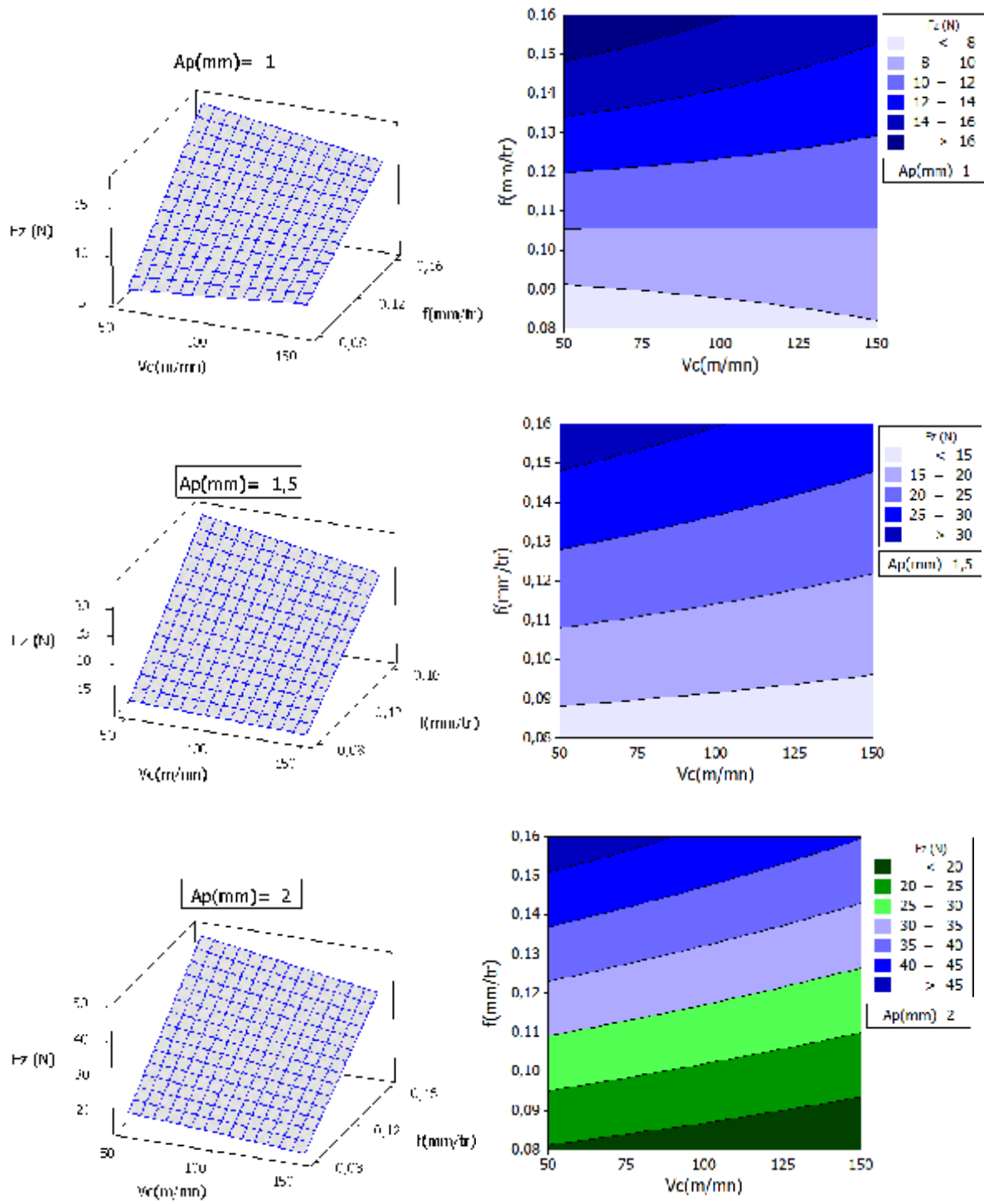


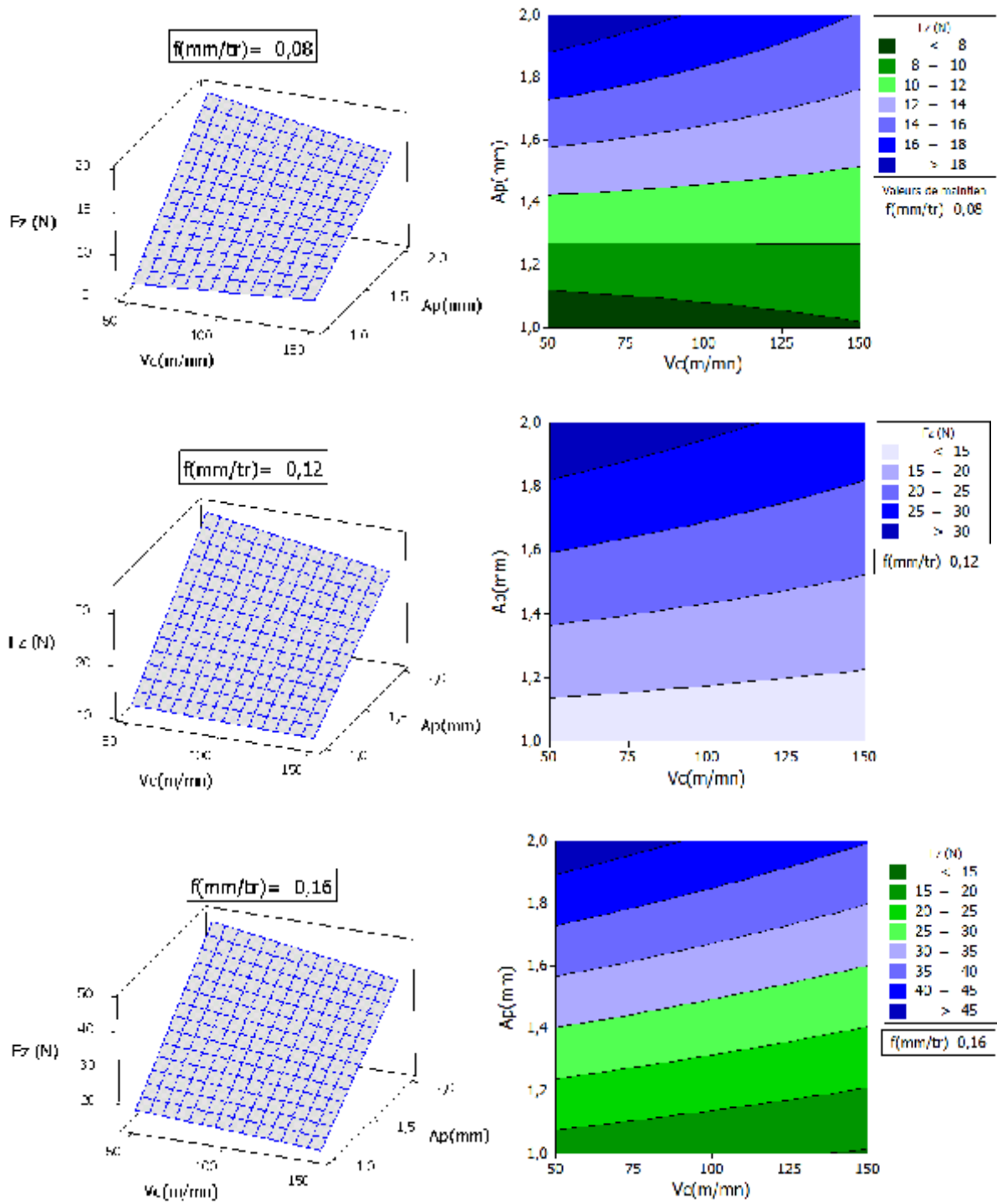
Figure IV-23 Diagramme d'interaction pour F_z .

D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour F_z

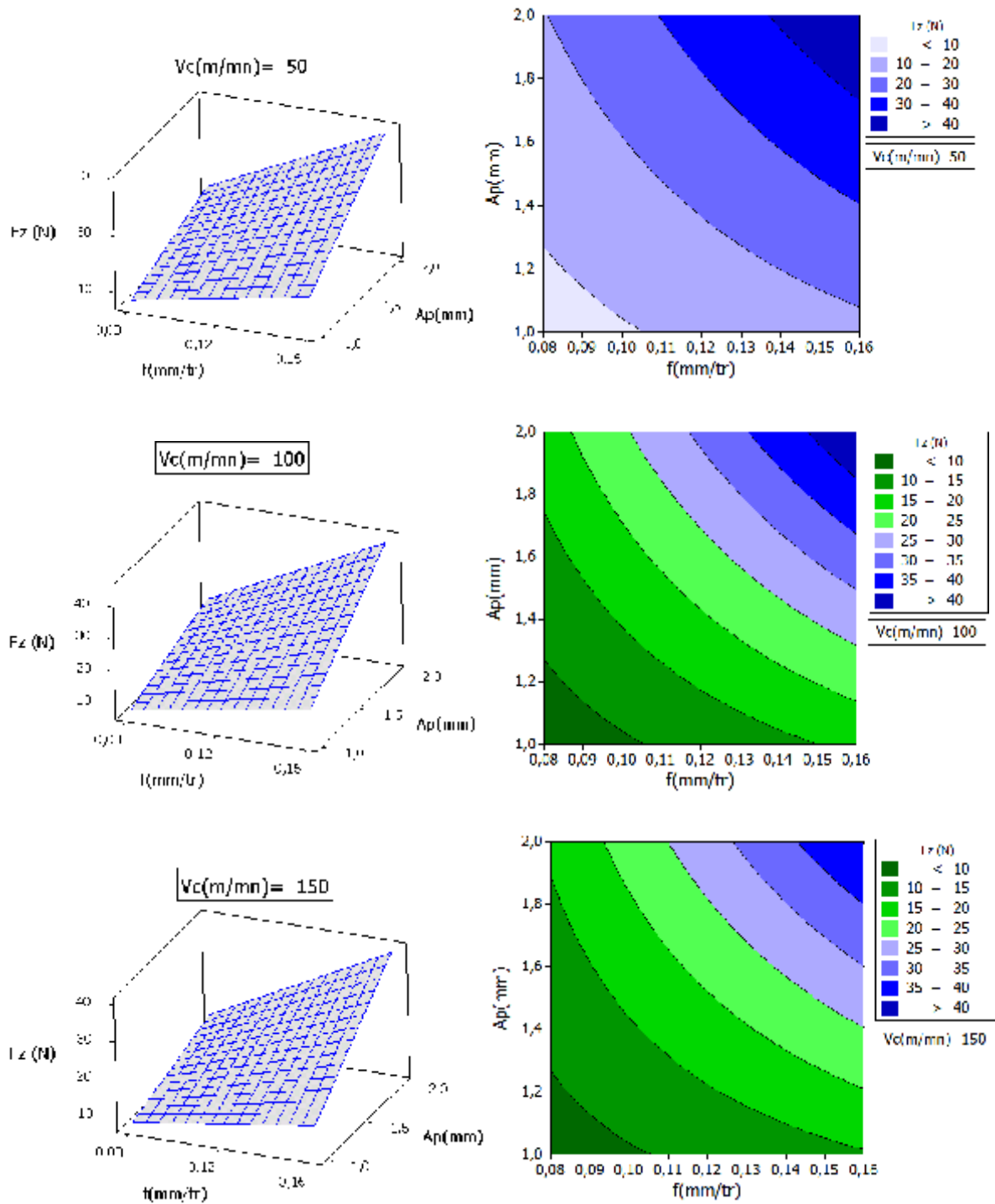
La surface de réponse (*figure IV-24*) montre la variation de la force tangentielle avec la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (a_p). En se basant sur l'analyse précédente (ANOVA), on constate que l'interaction de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe sont statistiquement significatives sur la force tangentielle. La *figure IV-24* montre que l'effet de la vitesse de coupe est faible.



a) F_z en fonction de (V_c, f) pour $A_p(mm)=1; 1,5; 2$.



b) F_z en fonction de (V_c, a_p) pour $f(\text{mm/tr})=0,08; 0,12; 0,16$.



c) F_z en fonction de (f, a_p) pour $V_c(m/min)=50; 100; 150$.

Figure IV-24 La surface de réponse de l'effort (F_z) en fonction de V_c , f , a_p et les graphes de contour.

IV-3.2 Analyse des critères de la rugosité

IV-3.2.1 Analyse de la rugosité de surface Ra

Les résultats présentés dans le *tableau IV-11* (ANOVA) sont analysés par le logiciel MINITAB 16. En appliquant l'analyse de la variance, nous considérons un intervalle de confiance de 95% ($\alpha=0,05$), on constate que le facteur de base (f) et l'interaction de la vitesse de coupe avec la profondeur de passe ont un impact significative sur Ra, par contre la vitesse de coupe et l'avance et les autres interactions n'ont pas un effet significatif puisque ses valeurs de la probabilité P sont supérieures à 0,05. Dans ce cas la vitesse d'avance est le facteur le plus significatif car sa contribution est de 92,85%.

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|-------------------|----|---------|---------|--------|--------------|------------------|
| Vc(m/mn) | 2 | 0,1061 | 0,0531 | 0,83 | 0,472 | 0,41 |
| f(mm/tr) | 2 | 24,0309 | 12,0154 | 186,96 | <0,001 | 92,85 |
| Ap(mm) | 2 | 0,0251 | 0,0126 | 0,2 | 0,826 | 0,10 |
| Vc(m/mn)×f(mm/tr) | 4 | 0,118 | 0,0295 | 0,46 | 0,764 | 0,46 |
| Vc(m/mn)×Ap(mm) | 4 | 0,6575 | 0,1644 | 2,56 | 0,12 | 2,54 |
| f(mm/tr)×Ap(mm) | 4 | 0,4287 | 0,1072 | 1,67 | 0,249 | 1,66 |
| Erreur | 8 | 0,5141 | 0,0643 | | | 1,99 |
| Total | 26 | 25,8805 | | | | 100,00 |

Tableau IV-11 Résultats de l'analyse de variance pour Ra.

A/ Analyse de régression

L'analyse de régression de la rugosité Ra en fonction de Vc, f, ap donne l'équation du modèle complet (IV-15) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 92,87\%$).

1/ Modèle généralisé

$$\begin{aligned}
 \text{Ra}(\mu\text{m}) = & -1,59412 - 0,0131851 \text{ Vc(m/mn)} + 35,3882 \text{ f(mm/tr)} \\
 & + 0,143645 \text{ Ap(mm)} + 0,0396913 \text{ Vc(m/mn)} \times \text{f(mm/tr)} \\
 & + 0,00662277 \text{ Vc(m/mn)} \times \text{Ap(mm)} - 7,29563 \text{ f(mm/tr)} \\
 & \times \text{Ap(mm)}
 \end{aligned}
 \tag{IV-17}$$

$$R^2 = 92,87 \%$$

2/ Modèle réduit

Le modèle réduit qui décrit la variation de Ra en fonction des facteurs principaux peut être définie de la façon suivante:

$$\begin{aligned} Ra(\mu\text{m}) = & -1,75062 + 0,00151205 Vc(\text{m/mn}) + 28,4139 f(\text{mm/tr}) \\ & - 0,0695542 Ap(\text{mm}) \end{aligned} \quad (\text{IV-18})$$

$$R^2 = 90,32 \%$$

B/ Graphique des effets principaux pour Ra

La *figure IV-25* illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité de surface Ra . La rugosité de surface Ra n'est pas influencée par la profondeur de passe. Mais par contre l'avance est le facteur le plus influent sur la rugosité Ra .

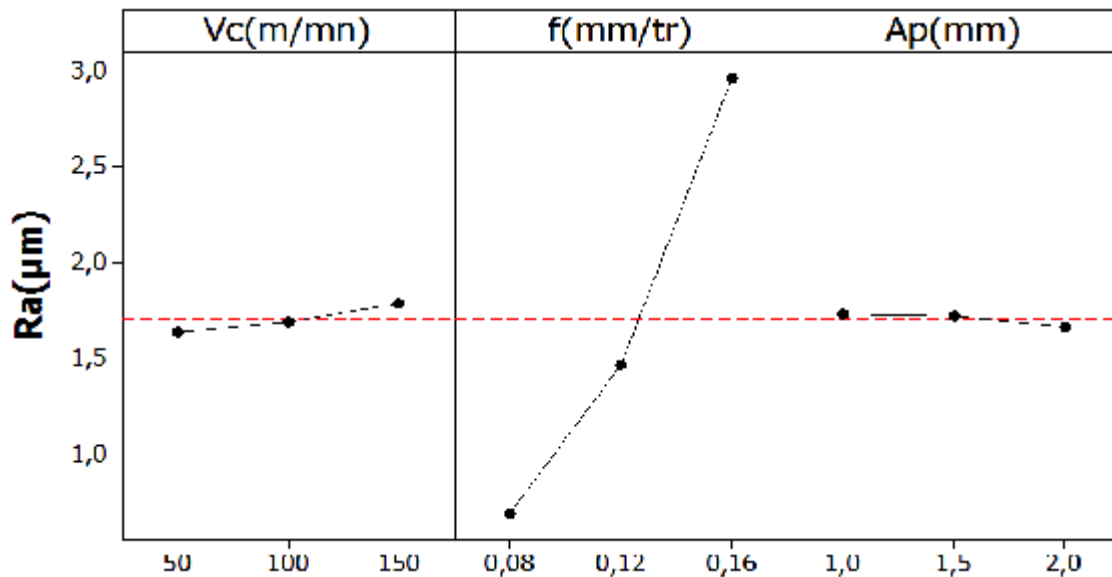


Figure IV-25 Graphes des effets principaux de Vc , f et ap sur Ra .

C/ Diagramme des interactions pour Ra

La *figure IV-26* présente le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $V_c \cdot a_p$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 2,54 % suivant le *tableau IV-12*.

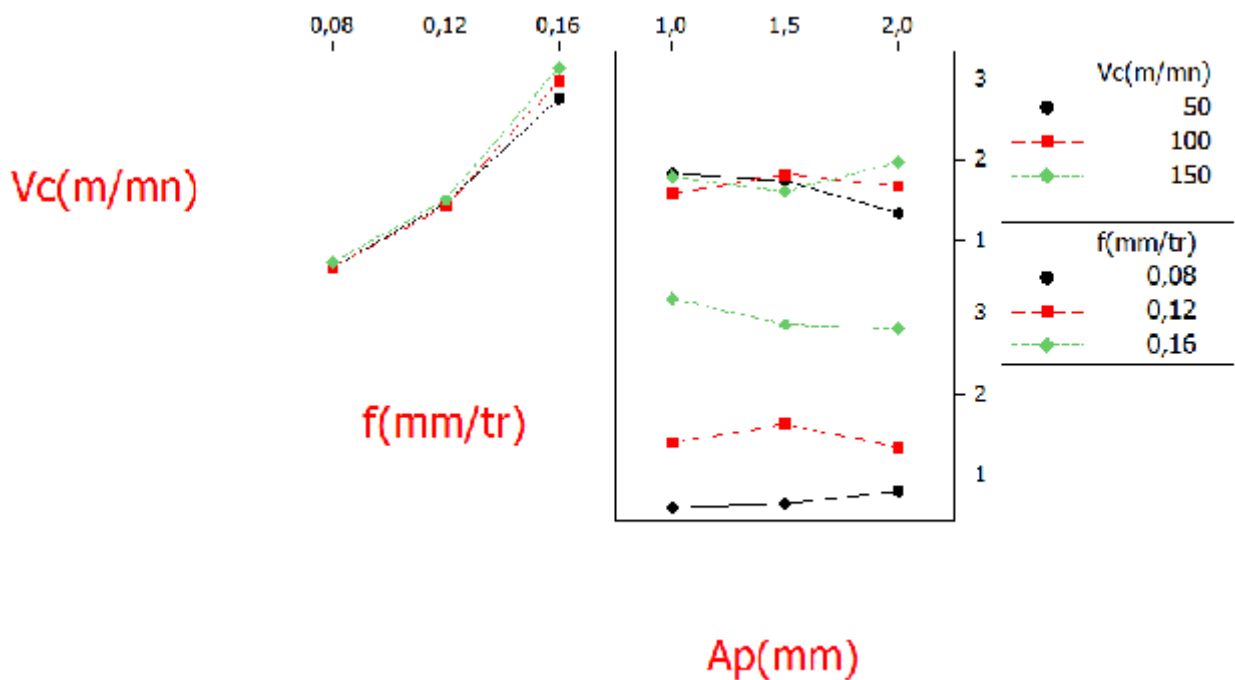
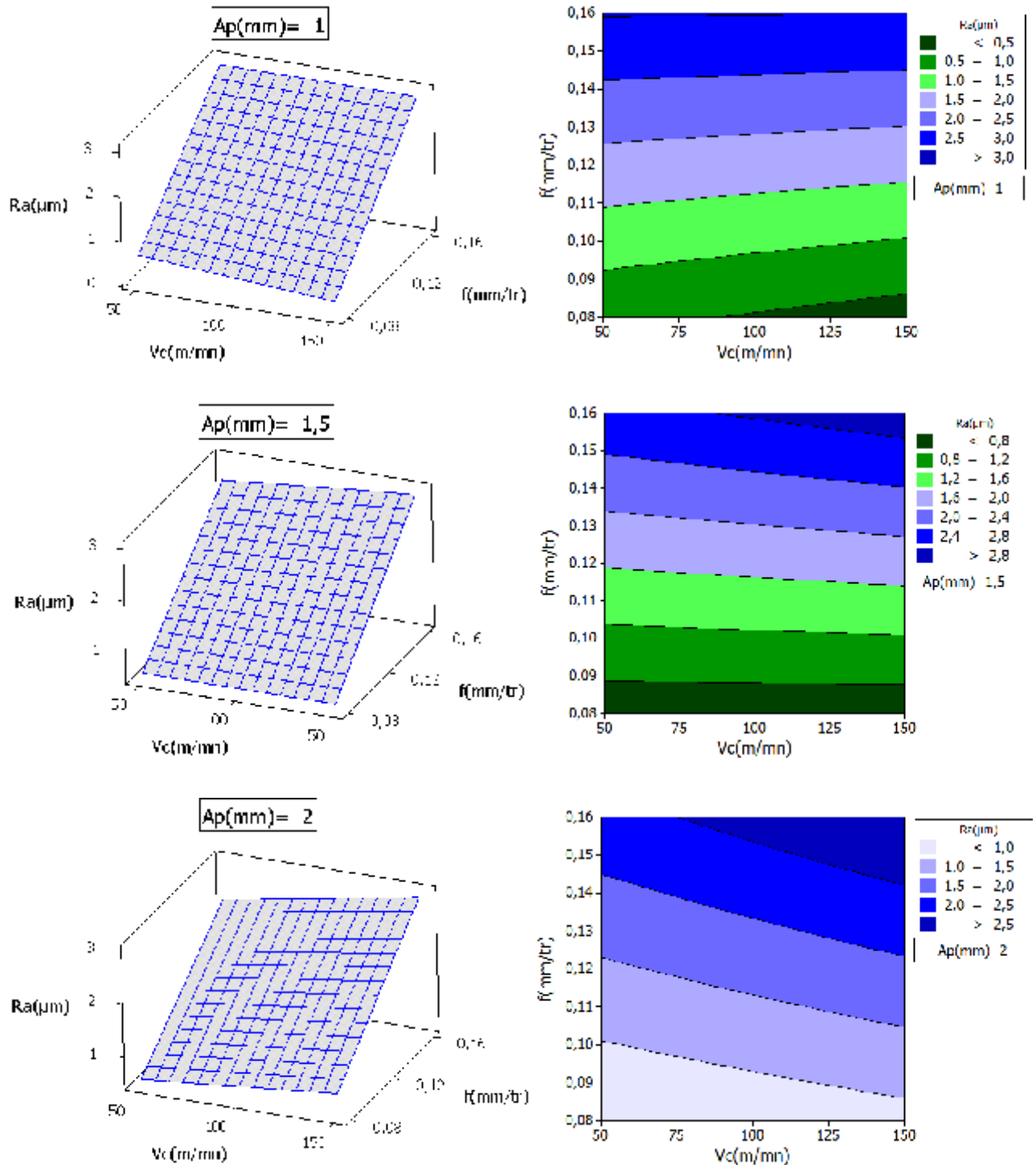


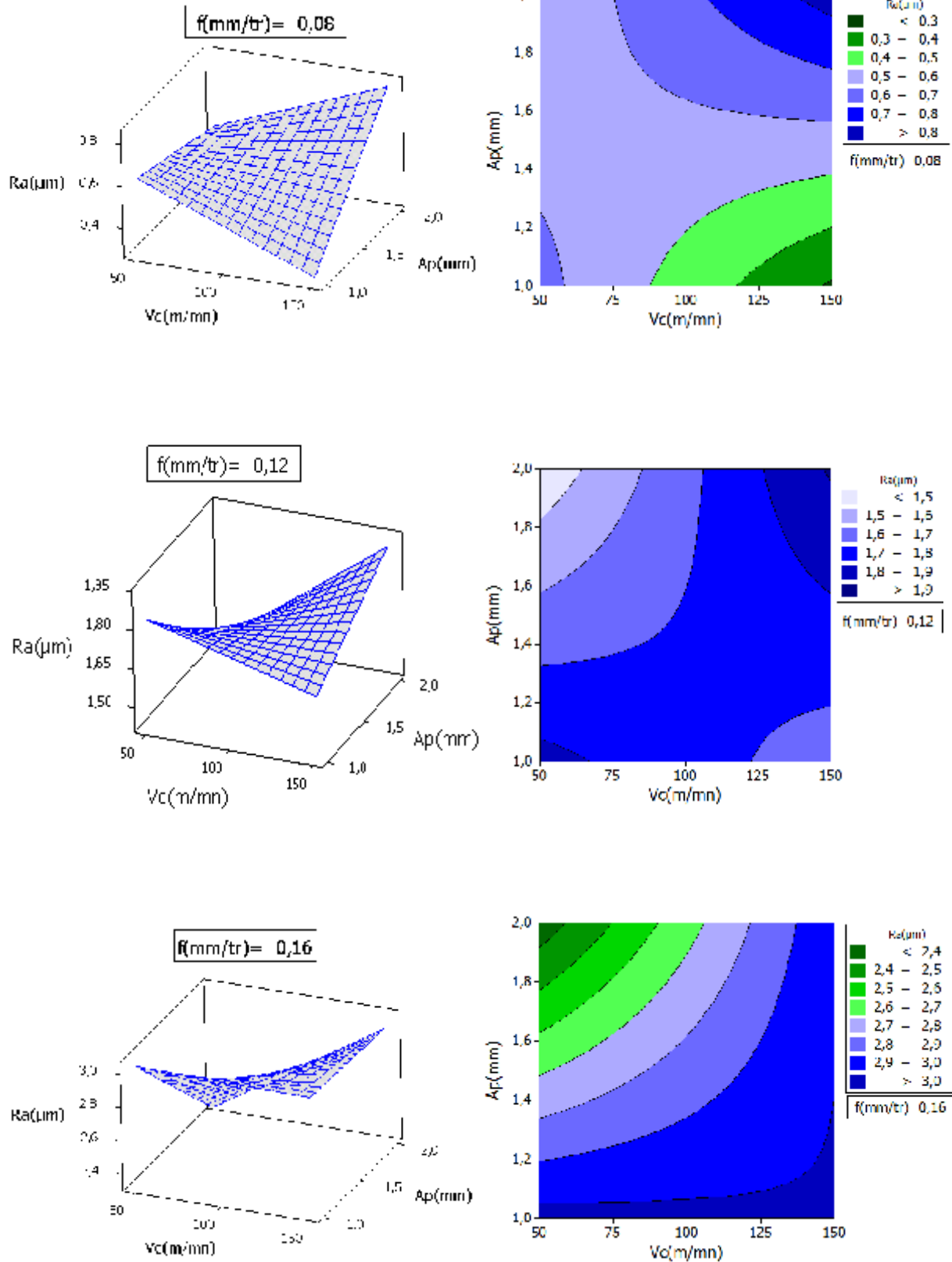
Figure IV-26 Diagramme d'interaction pour Ra

D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour Ra

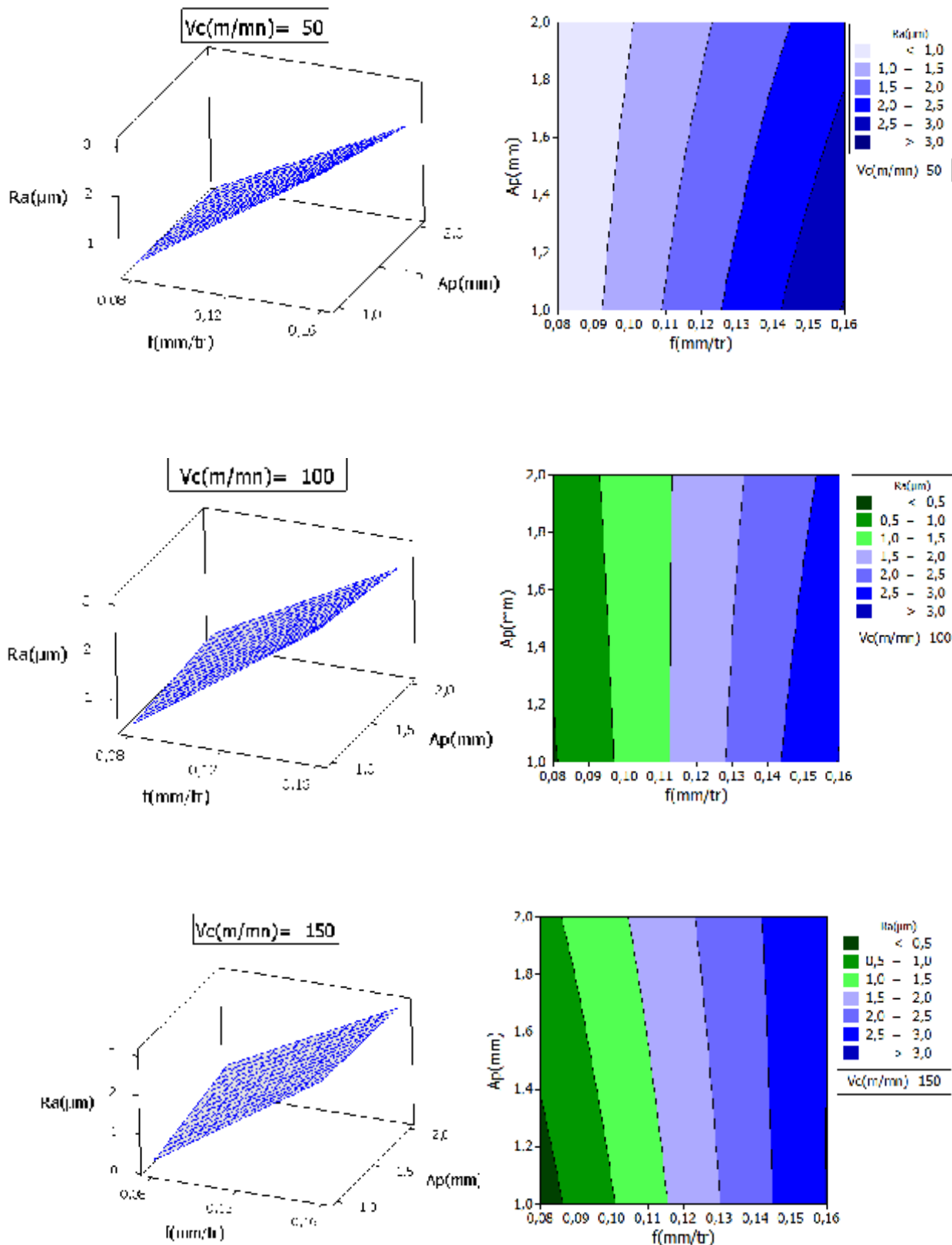
La présentation en 3D de la surface de réponse est donnée par la *figure IV-27*, elle montre l'influence de la vitesse de coupe (V_c) et de l'avance par tour (f) sur la rugosité de surface (R_a). Les résultats d'ANOVA montrent que l'effet de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface n'est pas statistiquement significatif (*tableau IV-11*). La meilleure rugosité de surface est obtenue avec la combinaison de l'avance la plus basse et de la vitesse de coupe la plus élevée.



a) Ra en fonction de (Vc, f) pour $A_p(mm)=1; 1,5; 2$.



b) Ra en fonction de (Vc, ap) pour $f(\text{mm/tr})=0,08; 0,12; 0,16$.



c) Ra en fonction de (f, ap) pour $V_c(m/min)=50; 100; 150$.

Figure IV-27 La surface de réponse de la rugosité de surface (Ra) en fonction de V_c , f , ap et les graphes de contour.

IV-3.2.2 Analyse de la rugosité de surface R_t

L'analyse détaillée des valeurs de R_t présentées dans le *tableau IV-12*, montre que l'avance a un effet important sur la rugosité de surface R_t avec une contribution de 82,19%, les autres facteurs ne sont pas significatif car leurs contributions ne dépassent pas 4%

| Source | DL | SC | CM | F | P | Contribution (%) |
|-------------------|----|---------|---------|-------|--------------|------------------|
| Vc(m/mn) | 2 | 0,1404 | 0,0702 | 0,3 | 0,752 | 0,47 |
| f(mm/tr) | 2 | 24,8026 | 12,4013 | 52,29 | <0,001 | 82,19 |
| Ap(mm) | 2 | 0,544 | 0,272 | 1,15 | 0,365 | 1,80 |
| Vc(m/mn)×f(mm/tr) | 4 | 1,0632 | 0,2658 | 1,12 | 0,411 | 3,52 |
| Vc(m/mn)×Ap(mm) | 4 | 0,6228 | 0,1557 | 0,66 | 0,639 | 2,06 |
| f(mm/tr)×Ap(mm) | 4 | 1,1063 | 0,2766 | 1,17 | 0,394 | 3,67 |
| Erreur | 8 | 1,8972 | 0,2372 | | | 6,29 |
| Total | 26 | 30,1765 | | | | 100,00 |

Tableau IV-12 Résultats de l'analyse de variance pour R_t .

A/ Analyse de régression

1/ Modèle généralisé

L'équation (IV-19) exprime le modèle complet de la rugosité R_t avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

$$\begin{aligned}
 R_t(\mu\text{m}) = & -2,18677 - 0,0160674 Vc(\text{m/mn}) + 42,0482 f(\text{mm/tr}) \\
 & + 1,09801 Ap(\text{mm}) + 0,0591754 Vc(\text{m/mn}) \times f(\text{mm/tr}) \\
 & + 0,00713404 Vc(\text{m/mn}) \times Ap(\text{mm}) - 12,6598 f(\text{mm/tr}) \times Ap(\text{mm}) \quad (\text{IV-19})
 \end{aligned}$$

$$R^2 = 86,22 \%$$

2/ Modèle réduit

L'équation (IV-20) exprime le modèle réduit de la rugosité R_t avec les facteurs principaux.

$$Rt(\mu\text{m}) = -1,68821 + 0,00173471 Vc(\text{m/mn}) + 28,976 f(\text{mm/tr}) + 0,292235 Ap(\text{mm}) \quad (\text{IV-20})$$

$$R^2 = 81,85 \%$$

B/ Graphique des effets principaux pour Rt

La *figure IV-28* illustre les effets moyens des paramètres de la vitesse coupe, de l'avance, de la profondeur de passe sur la rugosité Rt . On remarque que la pente de la vitesse d'avance est la plus grande.

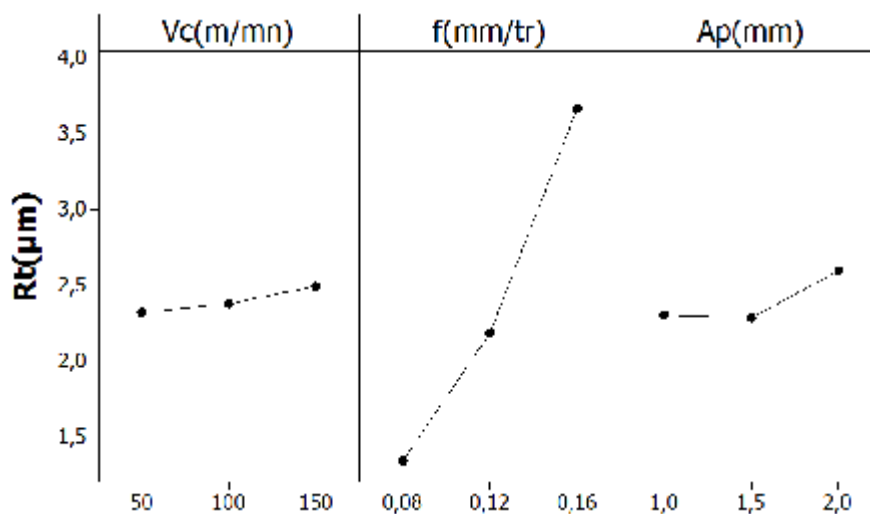


Figure IV-28 Graphes des effets principaux de Vc , f et ap sur Rt .

C/ Diagramme des interactions pour Rt

La *figure IV-29* montre le diagramme d'interaction pour Rt en fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe.

Elle présente aussi le diagramme des interactions qui nous permet de mesurer l'importance des effets et d'amplifier ou diminuer les effets principaux. L'analyse des résultats montre que l'interaction $f \cdot ap$ est plus importante que les deux autres interactions avec une contribution de 3,67% suivant le *tableau IV-12*.

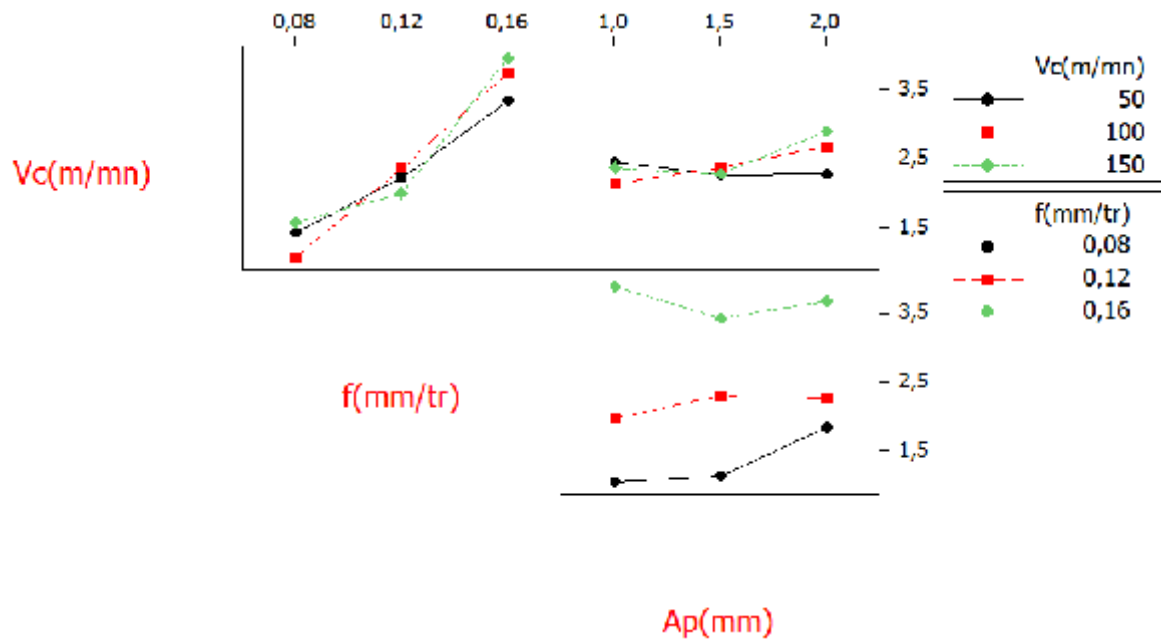
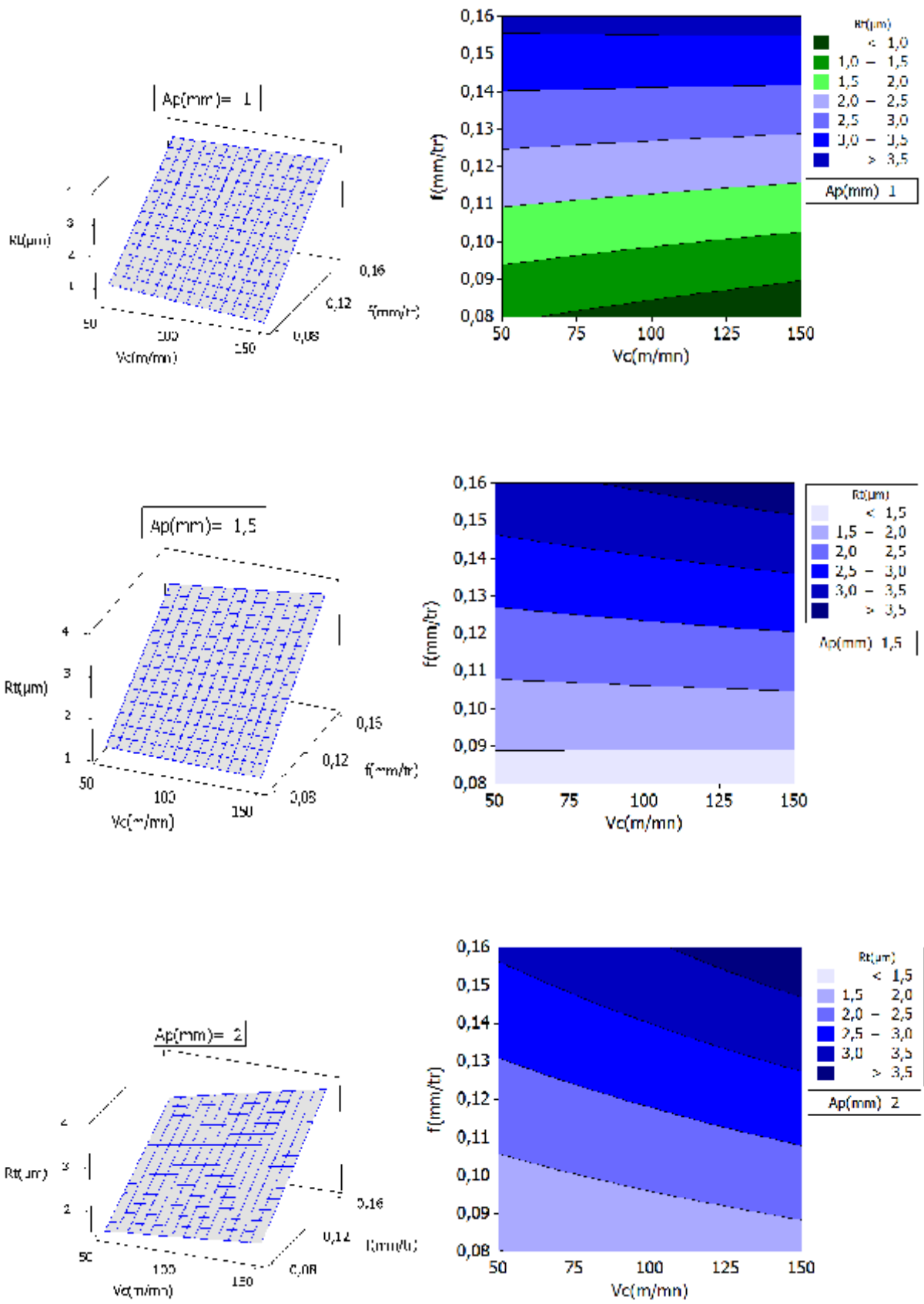


Figure IV-29 Diagramme d'interaction pour R_t

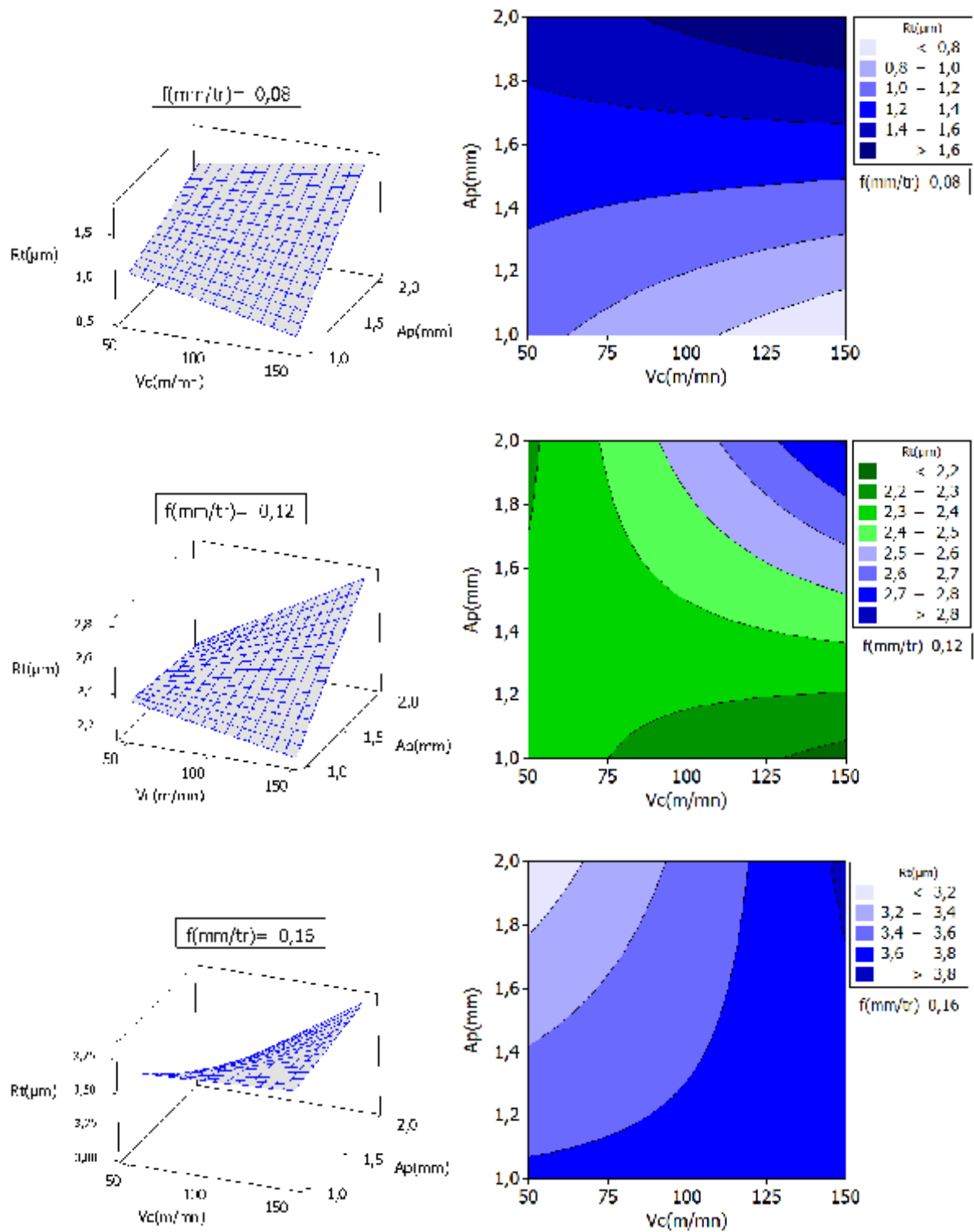
D/ Surface de réponse et graphique des interactions pour R_t

La surface de réponse de la rugosité R_t en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur le graphique (figure IV-30). Elle montre les effets de la variation de la vitesse de coupe, l'avance et de la profondeur de passe sur la rugosité R_t et. Pour trois vitesses de coupe (50 ;100 et 150), trois vitesses d'avance (0,08; 0,12 et 0,16) et trois profondeurs de passe (1 ; 1,5 et 2).

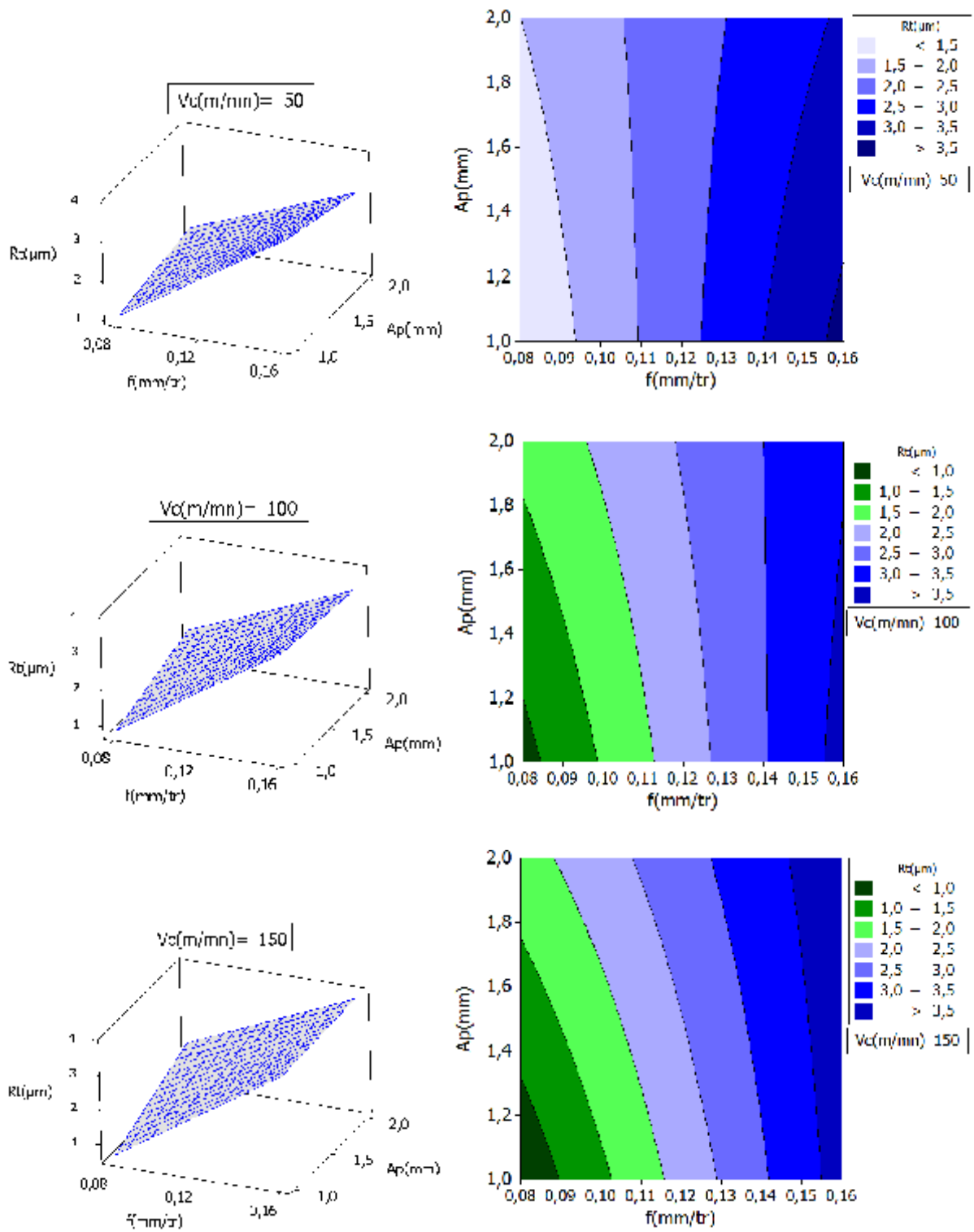
Ces graphes permettent aussi de visualiser la surface de réponse (R_t), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables.



a) R_t en fonction de (V_c, f) pour $A_p(mm)=1; 1,5; 2$.



b) R_t en fonction de (V_c, a_p) pour f (mm/tr)=0,08; 0,12; 0,16.



c) R_t en fonction de (f, a_p) pour $V_c(m/min)=50; 100; 150$.

Figure IV-30 La surface de réponse de la rugosité de surface (R_t) en fonction de V_c , f , a_p et les graphes de contour.

IV-4 Conclusion

La première partie de ce chapitre nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que rugosité et efforts de coupe (plan de 27 essais) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) lors de l'usinage a sec de polyamide PA6 avec le carbure métallique de nuance SPMR120308.

Les résultats de cette partie ont conduit aux conclusions suivantes:

Les modèles obtenus des différentes composantes de l'effort de coupe pour le matériau de coupe testé, montre que:

- La profondeur de passe est le paramètre le plus influent sur les composant de l'efforts de coupe (F_x ; F_y ; F_z) avec une contribution de (59,26; 39,58; 51,57)% respectivement, suivie par la vitesse d'avance avec une contribution de (27,38; 39,30; 26,47)% respectivement pour (F_x ; F_y ; F_z).

Les modèles obtenus des différents critères de la rugosité pour le matériau de coupe testé, montre que:

- La vitesse de coupe est le paramètre le plus influent sur le critère de rugosité R_a avec une contribution 29,32 %, suivie par la profondeur de passe avec une contribution de 12,98 %.
- Pour le critère de rugosité R_t le paramètre le plus influent est la profondeur de passe (A_p) avec une contribution de 14,74 % suivie par la vitesse de coupe (sa contribution est 14,69%)

Les résultats de la deuxième partie consacrée à l'usinage lubrifié du même polyamide avec le même matériau de coupe (plan de 27 essais), nous ont permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que (les efforts de coupe et la rugosité de la surface) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe).

Les résultats de cette partie ont conduit aux conclusions suivantes:

- Il est à signaler que parmi ces facteurs (V_c , f et a_p), la profondeur de passe est le facteur plus influent sur les efforts de coupe (F_x ; F_y ; F_z) avec une contribution de (77,18; 63,35; 48,80)% respectivement.
- La vitesse d'avance est le paramètre le plus influent sur les critères de la rugosité (R_a et R_t) avec une contribution de (92,85; 82,19)% respectivement.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude expérimentale du comportement des matériaux de coupe lors du tournage du polyamide PA6 avec les deux plaquettes de coupe, nous a permis d'étudier l'usinabilité de ce polymère en se basant sur les critères suivants : efforts, les pressions de coupe et la rugosité des surfaces usinées. A cet effet nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- ✓ Les résultats des efforts de coupe montrent que l'effort radial (F_y) est l'effort le plus prépondérant, par rapport au deux autres composantes (F_x et F_z) ceci est pour la plaquette SPUN, par contre pour la plaquette SPMR (Brise-copeaux) l'effort le plus prépondérant est l'effort tangentiel (F_z).
- ✓ Les efforts de coupe et les pressions spécifiques diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Par exemple, une élévation de la vitesse de 50 à 220 m/min, contribue à une diminution des trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z) respectivement de (36,92; 37,97; 71,96)% pour l'usinage à sec avec SPUN, de (65,19; 57,07; 57,42)% pour l'usinage lubrifié, de (51,70; 60,29; 85,01)% pour l'usinage à sec avec SPMR et de (56,7; 68,56; 86,93)% pour l'usinage lubrifié
- ✓ Les efforts de coupe augmentent avec l'augmentation de l'avance, une augmentation de (0,08 à 24) mm/tours, donne un taux d'élévation pour les trois composantes (F_x , F_y , F_z) successivement de (22,37; 51,19; 35,09) % pour la nuance SPUN à sec, de (40,38; 40,42; 58,44) % avec lubrification pour la même nuance, de (60,63; 66,82; 22,31) % pour la nuance SPMR à sec et de (96,37; 76,52; 44,33) % pour la nuance SPMR avec lubrification.
- ✓ L'augmentation de la profondeur de passe conduit à une augmentation des efforts de coupe. par exemple, une augmentation de la profondeur de passe de (0,2 à 1) mm, conduit à un taux d'élévation pour les trois composantes (F_x , F_y , F_z) successivement de (22,37; 51,19; 35,09) % pour la nuance SPUN à sec, de (40,38; 40,42; 58,44) % avec lubrification pour la même nuance, de (60,63;

66,82; 22,31) % pour la nuance SPMR à sec, de (96,37; 76,52; 44,33) % pour la nuance SPMR avec lubrification.

- ✓ Les faibles valeurs des efforts de coupe sont obtenues lors de l'usinage lubrifié par la nuance SPMR (Brise-copeaux) suivie par l'usinage à sec pour la même nuance. Cela montre que cette nuance est la plus performante par rapport à l'autre nuance SPUN.
- ✓ Les résultats de l'influence des conditions de coupe sur la rugosité montrent en général que le facteur le plus intervenant sur l'état de surface est l'avance suivie par la vitesse de coupe et en dernier lieu par la profondeur de passe.
- ✓ Lors de l'usinage avec lubrification par la plaquette SPMR et en utilisant les vitesses de coupe élevées, on a enregistré un meilleur état de surface comparativement à l'usinage à sec. A titre d'exemple, à la vitesse 220m/min les rugosités obtenues sont de l'ordre de (1,03 μ m pour Ra; 9,01 μ m pour Rz; 6,29 μ m pour Rt et 1,67 μ m pour Rq).
- ✓ Les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe montrent que la nuance de carbure SPMR donne un bon état de surface dans les deux cas d'usinage avec ou sans lubrification.
- ✓ L'étude statistique réalisée, montre que lors de l'usinage à sec, la profondeur de passe est le paramètre le plus influent sur les efforts de coupe (F_x ; F_y ; F_z) avec une contribution de (59,26; 39,58; 51,57)% respectivement, suivie par la vitesse d'avance avec une contribution de (27,38; 39,30; 26,47)% respectivement pour (F_x ; F_y ; F_z).
- ✓ Durant l'usinage à sec, la vitesse de coupe est le paramètre le plus influent sur le critère de rugosité Ra avec une contribution 29,32%, suivie de la profondeur de passe avec une contribution de 12,98%. Pour le critère de rugosité Rt le paramètre le plus influent est la profondeur de passe (A_p) avec une contribution de 14,74% suivie par la vitesse de coupe avec une contribution est de 14,69%.

- ✓ Lors de l'usinage lubrifié, la vitesse d'avance est le facteur le plus influent sur les critères (R_a et R_t) avec une contribution de (92,85; 82,19)% respectivement.

- ✓ La détermination des modèles mathématiques concernant, les efforts de coupe, la rugosité, nous a permis d'en déduire le degré d'influence de chaque élément du régime de coupe. Ces modèles représentent aussi un intérêt industriel important, puisqu'ils permettent la détermination des conditions d'usinage optimales et l'élaboration des abaques. ils permettent aussi de calculer les efforts de coupe et la rugosité de surface sans retour aux expériences.

Perspectives

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche qui sont :

1. Continuer à étudier le comportement de nouveaux matériaux de coupe face aux polyamides.
2. Déterminer les modèles mathématiques en fonction d'autres variables tels que : la géométrie de la partie active de l'outil (rayon du bec de l'outil et l'angle d'attaque).
3. Déterminer l'influence d'absorption d'eau sur l'usinabilité de matériau polymères ou a matrice polymère.
4. Etudes des vibrations de l'outil et son influence sur la rugosité de surface lors du tournage de polyamide.
5. Faire une étude sur les polyamides renforcés.
6. Faire une étude sur l'optimisation du régime de coupe.

Nomenclature

| | |
|----------|--|
| ANOVA | Analyse de la variance. |
| ap | Profondeur de passe (mm). |
| CVD | Dépôt critique vapeur. |
| f | Avance par tour (mm/tr). |
| Fx (Fa) | Effort de coupe axial (N). |
| Fy (Fp) | Effort de coupe radial (N). |
| Fz (Ft) | Effort de coupe tangentiel (N). |
| F rés | Effort de coupe résultante |
| γ | Angle d'attaque (degré). |
| GFRP | Plastique renforcé par les fibres de verre |
| Kc | Pression spécifique de coupe (N/mm ²). |
| MODOP | Machine outil dispositif outil pièce |
| PVD | Dépôt physique vapeur. |
| Ra | Rugosité moyenne arithmétique (μm). |
| RSM | Méthodologie de la surface de réponse. |
| Rt | Rugosité totale (μm). |
| Rz | Profondeur moyenne de la rugosité (μm). |
| Tu | Temps de l'usinage (min) |
| VB | Hauteur de l'usure en dépouille (mm). |
| Vc | Vitesse de coupe (m/min). |
| α | Angle de dépouille principal (degré). |
| X | Angle de direction principal (degré). |

Références bibliographiques

- [1] : **S. BERKANI**; *Etude du comportement des matériaux de coupe lors du tournage d'un acier inoxydable*, département mécanique, université Guelma, 2009, P10.
- [2] : **MATECHPLAST**; *Usinage des thermoplastiques standards*, (<http://www.usinage-plastique.com/thermoplastiques-usuels.html>), le 13/02/2013.
- [3] : **C. TROMBERT**; *Usinabilité des aciers inoxydables*, techniques de l'ingénieur, Ref: M726.
- [4] : **P. CUNAT**; *Aciers inoxydables "Mise en œuvre"*, Techniques de l'ingénieur, Ref: M4542.
- [5] : **J. AUBRY**; *Les matières plastiques*, l'horloge de bureau, technologie 5ème édition, 2011, PP1-49.
- [6] : **J.M. HAUDIN**; *Matériaux pour l'ingénieur*, 2006, PP46-69.
- [7] : **GUIDE DE CONCEPTION**, *Utilisation marine de pièces en thermoplastique*, 1997, PP6-7.
- [8] : **A. SEYNI**, *Propriétés physico-chimiques*, université de Toulouse, 2008, PP13-26
- [9] : **MANUEL COMPLET GARANT**, *Réf: 11 0950DE, P78*
(<http://fr.scribd.com/doc/22251260/Manuel-Complet-Garant>), le 15/11/2012.
- [10]: **J.P. DAVIM**; *The Effect of Tool Geometry on the Machining of Polyamide During Precision Turning*, Journal of COMPOSITE MATERIALS, 2009, Vol 43, No 23
- [11]: **I. EI-SONBATY**, KHASHABA U.A, MACHALY T; *Factors affecting the machinability of GFR/Epoxy composite*, Composite Structure, 2004, 63, PP329–338.
- [12]: **G.V. RAO**, P. MAHAJAN, N. BHATNAGAR; *Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites cutting force analysis*. Composites Science and Technology, 2007, 67, PP579–593.
- [13]: **M. KADDACHE**, K. CHAOUI, M.A YALESSE; *Cutting parameters effects on the machining of two high density polyethylene pipes resins*, Journal of Mechanics & Industry, 2012, PP307-316.
- [14]: **T. MASUZAWA**; *State of the art of micromachining*, *annals of CIRP*, 2000, 49, PP473–488.
- [15]: **F.Z. FANG**, H. Wu, et ALL; *Tool geometry study in micromachining*, Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, 13, PP726–731.
- [16]: **A. DESSARTHE**; *Usinage des polymères*, technique d'ingénieur, Doc: AM 3 780, PP4-12.
- [17]: **Z. LU**, T.YONEYAMA; *Micro-cutting in the micro lathe turning system*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39, PP1171–1183.
- [18]: **M.C. FRANCISCO & All**, *Etude de l'effet des vitesses de coupe et d'avance sur la force d'usinage lors du chariotage des composés polyamides*, 2009.
- [19]: **Normes ISO 4287/1-1984 et ANSI/ASME B46.1-1985**.
- [20]: **W. WANG**, S.H. KWEON, S.H. YANG; *A study on roughness of the micro-end milled surface produced by a miniaturized machine tool*, Journal of Materials Processing Technology, 2005, PP162–163, PP702–708.
- [21]: **CRISTESCU**; *The influence of the geometry of the lathe tool on the surface condition at the processing of the polyamides*, technologies in machine building, 2008, ISSN, PP1221-4566.

- [22]: **F.MATA, J.P.DAVIM**; *Performance of diamond coated tools (CVD) in machining polyamides*, Int. J. Materials and Product Technology, Vol. 37, No. 1/2, 2010.
- [23]: **V.N.GAITONDE, J. P.DAVIM & ALL**; *Machinability study in microturning of PA66 GF30 polyamide with a PCD tool*, journal of composite materials, 2009; 43; P725.
- [24]: **M.MOȚOI**; *Studies regarding the influence of the improving elements upon the roughness of the surface processed of polyamides*, technologies in machine building, 2008, ISSN, PP1635-1636.
- [25]: **M.MOȚOI**; *Studies on the main cutting force in turning polyamide PA66*, annals of the oradea university, fascicle of management and technological engineering, Volume IX (XIX), 2010, NR2.
- [26]: **M.MOȚOI**; *Simulation of cutting process in turning polyamide pa 66*, annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume IX (XIX), 2010, NR3.
- [27]: **A.H. SYED & ALL**; *Surface roughness analysis in machining of GFRP composites by carbide tool (K20)*, European journal of scientific research, ISSN 1450-216X Vol.41 No.1, 2010, PP84-98.
- [28]: **M.SETAREH**; *Effect of H.S.S and Carbide Tools on Smoothness Surface of thermoplastic parts in milling process*, word academy of science, engineering and technology, 2011, P75.
- [29]: **J.F.AGASSANT, J.M.Haudin**; *Mise en forme des polymères thermoplastiques*, 1991, P93.
- [30]: **CATALOGUE ZELLAMID**; *ingénierie des produits plastiques semi-finis*, 2009, P20 <http://www.zellamid.com/downloads/>, le 3/10/2012.
- [31]: **Y.K. CHEN, O.P.MODI, A.S. MHAY, A. CHRYSANTHOU, J.M. O’SULLIVAN**; *The effect of different metallic counter face materials and different surface treatments on the wear and friction of polyamide 66 and it’s composite in rolling–sliding contact*, Wear, 2003, 255, PP714–721.